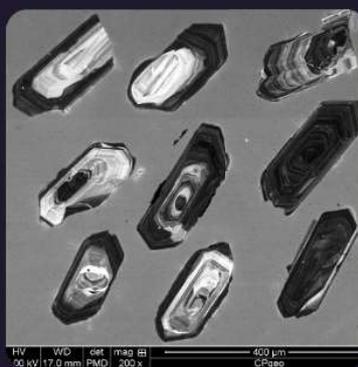


SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA

ANDRÉA RITTER JELINEK
CARLOS AUGUSTO SOMMER



IMAGENS DE CAPA E CONTRACAPA



Fotografia aérea do setor norte da Serra do Segredo, em Caçapava do Sul, RS, onde se destacam a Pedra do Segredo, em primeiro plano, e a Pedra da Abelha, logo à esquerda, geofórmulas esculpidas sobre conglomerados fluviais da Bacia do Camaquã. Ao fundo, alguns cerros formados por rochas metamórficas e o imponente alto de Caçapava, sobre granitoides diversos, rochas que registram diferentes momentos do Ciclo Brasileiro no sul do Brasil. A paisagem faz parte do Geoparque Caçapava Aspirante Unesco e é parcialmente inserida no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. Imagem obtida por Felipe Guadagnin. Legenda de André Weissheimer de Borba e Felipe Guadagnin.



Contato entre rochas sedimentares da Bacia do Paraná e soleira de diabásio do Grupo Serra Geral. Pedreira Carollo, região de Montenegro, RS. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.

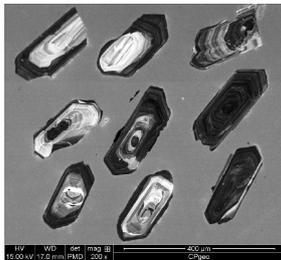


Imagem de catodoluminescência de cristais de zircão pertencentes ao Batólito de Florianópolis. Aumento de 200 vezes. Imagem e legenda de Andréa Ritter Jelinek.



Fotografia aérea oblíqua apresentando a morfologia da região correspondente ao extremo do Litoral Norte do RS, à direita observa-se a cidade de Torres/RS. Em primeiro plano observa-se a morfologia do campo de dunas localizado no Parque Estadual de Itapeva. Unidade essa localizada sobre o sistema Laguna-Barreira IV (holocênica). Logo após o baixio, na retaguarda do campo de dunas, ocorre a morfologia do sistema Laguna-Barreira III (pleistocênica). Ao fundo, com o relevo mais elevado, encontra-se a Formação Serra Geral pertencente à Bacia do Paraná. Imagem obtida por Eduardo H. R. Russo. Legenda de Eduardo Guimarães Barboza.



Minas do Camaquã, Mineração de cobre a céu aberto, Caçapava do Sul. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.



Derrames ácidos do Grupo Serra Geral, Bacia do Paraná, na região do Cânion Fortaleza, Parque Nacional da Serra Geral, Cambará do Sul, RS. Imagem licenciada de Depositphotos. Legenda de Carlos Augusto Sommer.



PUBLICAÇÃO ESPECIAL DO NÚCLEO RS/SC DA
SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

**CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA
DO RIO GRANDE DO SUL E
DE SANTA CATARINA**

Editores

Andréa Ritter Jelinek
Carlos Augusto Sommer



Porto Alegre, RS, 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial desta obra, sem autorização expressa dos autores ou da editora. A violação importará nas providências judiciais previstas no artigo 102, da Lei nº 9.610/1998, sem prejuízo da responsabilidade criminal. Os textos deste livro são de responsabilidade de seus autores.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

Edição: 1ª

Ano: 2021

Editora Compasso Lugar Cultura

Responsável André Suertegaray Rossato

Porto Alegre - RS - Brasil

Telefones (51) 984269928

compassolugarcultura@gmail.com

www.compassolugarcultura.com

Editores:

Andréa Ritter Jelinek

Carlos Augusto Sommer

Diagramador: Gabriel Zambom

Revisão de Texto: Gustavo Saldivar

Conselho Editorial Compasso Lugar Cultura

Álvaro Heidrich

Carlos Henrique Aigner

Cláudia Luíza Zeferino Pires

Dakir Larara Machado da Silva

Dilermando Cattaneo da Silveira

Dirce Maria Antunes Suertegaray

Helena Copetti Callai

Jaeme Luiz Callai

João Osvaldo Rodrigues Nunes

Laurindo Antonio Guasselli

Maíra Suertegaray Rossato

Nelson Rego

Roberto Verdum

Rosa Maria Vieira Medeiros

Sinthia Batista

Realização

Sociedade Brasileira de Geologia

Diretoria Núcleo RS/SC:

Diretora Presidente: Andréa Ritter Jelinek

Diretor Vice-Presidente: Carlos Augusto Sommer

Diretor Secretário: Lucas Debatin Vieira

Diretor Financeiro: Breno Leitão Weichel

Diretora de Programação Técnico-Científica: Rosemary Hoff

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

J47c

Jelinek, Andréa Ritter.

Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina /Andréa Ritter Jelinek e Carlos Augusto Sommer, organização – Sociedade Brasileira de Geologia - Porto Alegre : Compasso Lugar-Cultura, 2021.

504 p., il. col.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

<https://doi.org/10.29327/537860>

1. Geologia 2.Sociedade Brasileira de Geologia 3. Coletâneas de textos I. Jelinek, Andréa Ritter II. Sommer, Carlos Augusto III. Título

CDD 551

CDU 551.1/.4

Bibliotecária Responsável: Catarina Strapação Guedes Vianna CRB-10/2469

Índices para catálogo sistemático:

1. Geologia 551

O Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina

Antonio Pedro **Viero**^{1*}, Ari **Roisenberg**¹,
Marcos Alexandre **Freitas**², Pedro Antonio Roehé **Reginato**¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul

² Serviço Geológico do Brasil (CPRM)

*autor correspondente: antonio.viero@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), de natureza fissural e livre, representa uma das principais unidades hidroestratigráficas e a mais explorada do sul do Brasil, principalmente em razão do vasto território que abrange, da boa qualidade da água que possui, da boa vazão (média de 14 m³/h) e dos custos relativamente baixos de instalação de poços tubulares. O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) registra cerca de 13.000 poços tubulares em funcionamento no SASG, o que permite estimar uma retirada anual da ordem de 1,02 bilhão de metros cúbicos.

Províncias basálticas, como a da Bacia do Paraná, formam bons sistemas aquíferos, porque contêm água de excelente qualidade, geralmente caracterizada por baixa salinidade, possuem grandes extensões lateral e vertical e apresentam alta densidade de falhas e de fraturas, que lhe conferem boa condutividade hidráulica e a capacidade de acumular enormes volumes de fluídos. A intensidade e a anisotropia estrutural do SASG representam os registros tectônicos do ambiente deposicional vulcânico (derrames e fluxos piroclásticos), assim como estruturas tectônicas, relacionadas aos eventos deformacionais superimpostos, ocorridos ao longo da evolução tectônica da Bacia do Paraná.

A recarga do SASG ocorre, principalmente, pela infiltração de água da chuva, mas também recebe a contribuição importante dos aquíferos sedimentares sotopostos da Bacia do Paraná, que têm fluxo ascendente, através de falhas e de fraturas, devido ao elevado confinamento. Essa recarga ascendente resulta na salinização das águas do SASG, com intensidades variadas, chegando a comprometer a potabilidade em um número pouco expressivo de poços para os pa-

râmetros Sódio, Sulfato, Flúor e Ferro, além de Arsênio e de Selênio.

2 CONTEXTOS GEOLÓGICO E ESTRUTURAL

A ruptura continental do Gondwana, causada pela ação de plumas mantélicas, durante o Cretáceo Inferior, determinou a abertura do Oceano Atlântico do sul para o norte e o extravasamento de um espesso pacote vulcânico basáltico sobre a superfície sedimentar, constituída pelas formações Botucatu, Guará, Sanga do Cabral e Piramboia, que ocorrem nos estados de RS e de SC. O pacote vulcânico em pauta constitui o chamado Grupo Serra Geral, unidade litoestratigráfica constituída por intrusões hipoabissais (soleiras e diques) e por derrames de basaltos e de andesitos (escassos), de natureza toleítica e de caráter fissural, intercalados no topo ou sobrepostos por um pacote de natureza ácida, de composição riolítica. Em seu conjunto, o pacote vulcânico representa a Província Vulcânica Paraná-Etendeka, que cobre cerca de

917.000 km² do setor meridional da América do Sul (Frank *et al.*, 2009), enquanto a sequência em Etendeka (Namíbia) representa um pequeno fragmento da Província.

No RS, o pacote vulcânico cobre mais de 50% da superfície do estado, alcançando espessura máxima da ordem de 1.000 metros na escarpa da região nordeste, dos quais 600 metros correspondem aos derrames básicos a intermediários. A espessura total decresce para oeste, onde possui 50 a 100 metros na fronteira com a Argentina e com o Uruguai (Fig. 1). O pacote vulcânico ácido possui espessura total de, até, 400 metros no perfil da estrada que liga Lageado a Soledade (RS) e na escarpa leste do estado.

Em SC, a espessura do Grupo Serra Geral atinge, até, 1.200 metros na escarpa, à leste, correspondente à região de Urubici, onde o pacote ácido registra cerca de 450 metros no Morro da Igreja, com 1.712 metros de altitude. Tal como no Rio Grande do Sul, as cotas de topo do pacote vulcânico tendem a diminuir, em direção a oeste.

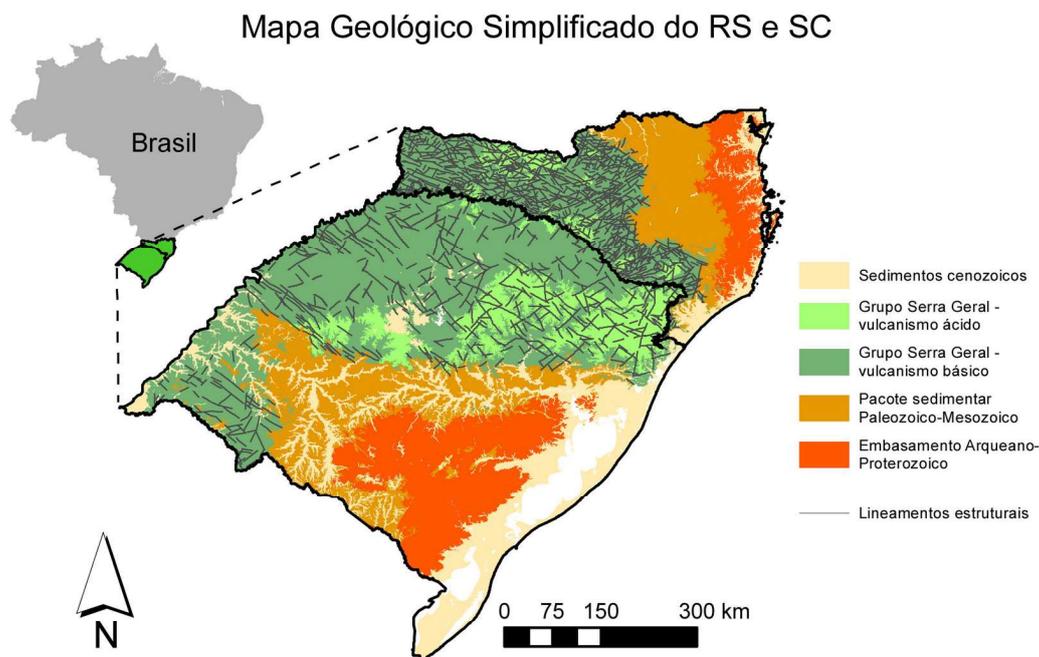


Figura 1 – Mapa geológico simplificado do RS e de SC, mostrando os principais compartimentos geológicos, hidrogeológicos e estruturais do Grupo Serra Geral, que constitui o SASG nos dois estados.

Sob o ponto de vista geoquímico, o vulcanismo básico a intermediário é compartimentado em dois tipos principais. A partir do Lineamento do Rio Piquiri (SC-PR), para o norte, predominam amplamente basaltos tipo alto-TiO₂, enquanto na região situada ao sul do Rio Pelotas o tipo baixo-TiO₂ é dominante, correspondendo ao pacote vulcânico encontrado no estado gaúcho. Ao norte do Rio Pelotas, até o Lineamento do Rio Piquiri (SC), situa-se uma zona de transição e os dois tipos litogeoquímicos aparecem e se interdigitam, mostrando origem, a partir de sistemas alimentadores independentes.

O pacote ácido do Grupo Serra Geral também é representado nos estados do RS e de SC por dois tipos, petrograficamente distintos. O tipo Chapecó se caracteriza pelo caráter notadamente porfirítico e ocorre no noroeste do RS e no sul de SC, enquanto o tipo Palmas, de caráter affrico, domina amplamente no RS, constituindo uma unidade tabular, que pode se estender, de forma contínua, por dezenas de quilômetros. Esta é uma das evidências que levaram Roisenberg & Viero (2002) a indicar se tratar, na maior parte, de rheognimbritos. Na região nordeste do RS, Lima *et al.* (2012) registram, em vários locais, a existência de condutos alimentadores e de derrames riolíticos associados.

É importante destacar, pelas implicações no condicionamento hidrogeológico, que a espessura individual dos derrames básicos varia, em geral, entre 15 a 20 metros e que é frequente o registro de lentes arenosas entre as unidades vulcânicas, constituindo, com a zona de contato entre derrames, os setores preferenciais para a surgência de água subterrânea.

Os solos são igualmente diferentes nas unidades básicas e ácidas, o que constitui parâmetro importante, que influencia as características das águas subterrâneas. As

rochas basálticas possuem uma sensibilidade maior à alteração intempérica, razão pela qual a espessura dos solos é maior, podendo constituir unidades pedológicas com mais de 10 m de espessura, como no oeste do RS e de SC. Já nas rochas ácidas, a espessura de solos é relativamente pequena, como na região da escarpa nordeste dos estados em estudo, onde pode não ultrapassar um metro, deixando as litologias aflorantes.

O contexto tectônico na região é de extrema relevância para o entendimento da circulação e da composição da água subterrânea no Sistema Aquífero Serra Geral, tendo sido objeto de inúmeros estudos regionais (Machado, 2005; Nanni *et al.*, 2009; Freitas *et al.*, 2016, entre outros), utilizando técnicas de sensoriamento remoto, associadas ou não à análise estatística, e de geofísica. Os lineamentos tectônicos observados representam, em muitos casos, a reativação de falhamentos, a partir do Escudo Cristalino, que constitui o embasamento da Bacia do Paraná, que possuem, segundo Zalán *et al.* (1991), três grupos de orientações principais, NW-SE, NE-SW e E-W, das quais as duas primeiras são as mais importantes. CPRM (2002), em estudo estrutural da região oeste de SC, destaca, como principais, as direções N30-50E e N40-60W, registrando falhas com direção N70E, que possuem, até, 135 km de extensão. Dentro desta perspectiva, Machado *et al.* (2012) descrevem que, na borda leste da escarpa vulcânica de SC, lineamentos, com direções N-S e E-W, são coincidentes com as direções encontradas na região do Domo de Lages, marcando a influência das intrusões alcalinas na geração de falhas, na região.

3 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

3.1 Circulação de água no sistema aquífero

A movimentação da água no SASG

ocorre de diferentes formas, tendo início no manto de alteração, existente sobre as rochas, e continuando no conjunto de estruturas, que formam o aquífero fraturado (Fig. 2).

O fluxo da água pelo manto de alteração e a possibilidade de formação de um aquífero granular livre já foi estudada por diferentes autores (Reginato, 2003; Reginato *et al.*, 2012; Bortolin, 2018). Esse aquífero possui dimensões reduzidas e pequenas espessuras saturadas, sendo condicionado pelos tipos de solos (menor quantidade de argila e maiores espessuras), pela litologia (tipo e grau de fraturamento), pela topografia e pelo

clima. Tem um papel importante na formação de nascentes e de fontes e na contribuição do fluxo de base dos rios.

A circulação e o armazenamento de água nas rochas vulcânicas são condicionados pelas estruturas tectônicas, pelos tipos e estruturas dos derrames de rochas vulcânicas e pelas condições geomorfológicas. Em geral, as fraturas tectônicas conectam as estruturas internas dos derrames, dando origem a diferentes tipos de aquíferos fraturados. As principais estruturas, associadas aos derrames, que têm influência nos processos de circulação e de armazenamento de água, são as zonas: vesiculares a amig-



Figura 2 – Mecanismos de circulação da água subterrânea nas rochas vulcânicas do SASG: A) circulação no contato de derrames (formação de fonte); B) circulação por estruturas sub-horizontais.

daloides, de brechas e autobrechas, de junções horizontais e verticais e de contato entre derrames. Deve-se destacar, também, que a circulação de água vai ocorrer, de forma diferenciada, nos derrames básicos e ácidos, sendo mais facilitada nos primeiros (Hausman, 1995; Freitas *et al.*, 2002; Reginato, 2003; Lisboa *et al.*, 2004; Freitas *et al.*, 2012; Machado, 2013; Reginato *et al.*, 2015; Freitas, 2016).

A profundidade de circulação da água subterrânea é variável e pode ser avaliada, por meio da análise de entradas de água, identificadas em poços tubulares. Em vários estudos realizados (Reginato, 2003; Freitas *et al.*, 2012; Machado, 2013; Frenzel & Reginato, 2018), o intervalo de profundidade entre 0 m e 100 m está associado à maior ocorrência de entradas de água (80% a 90%), sendo que 63% a 70% das entradas estão localizadas entre 20 m e 100 m. Deve-se salientar que, em diferentes regiões, são encontrados poços, que apresentam entradas de água em profundidades superiores a 150 metros. No entanto, Hausman (1995) considera que, em profundidades superiores a 300 metros, há uma dificuldade na circulação de água.

3. 2 Recarga

A recarga do Sistema Aquífero Serra Geral ocorre por precipitação pluviométrica, sendo condicionada por diversos fatores. Para Lisboa (1996), Freitas *et al.* (2002), Lisboa *et al.* (2004) e Machado (2013), as condições geomorfológicas e estruturais têm grande importância nos processos de recarga e de descarga. Segundo Descovi Filho (2015), a recarga vai ocorrer em áreas com maior cobertura vegetal, com manto de alteração bem desenvolvido e com topografia pouco acidentada. Para Bortolin (2018), as áreas localizadas em altos topográficos, com menores declividades, com curvatura do topo convexa

a divergente e com solos com maiores espessuras são as que apresentam maior potencial para a recarga. Já as áreas mais íngremes e dissecadas são as que possuem menor potencial e são favoráveis à descarga.

De acordo com Bortolin (2018), o processo de recarga ocorre em duas etapas, sendo, a primeira, no manto de alteração e, a segunda, pelo sistema de fraturas e de estruturas, existente nas rochas vulcânicas. Inicialmente, a água infiltra no solo, podendo recarregar o aquífero granular livre (quando esse existir) e, depois, dependendo do grau de fraturamento das rochas, haverá a recarga do aquífero fraturado. Assim, nem toda a água que infiltra no solo recarrega o aquífero fraturado. Além disso, o autor identificou que a resposta da recarga à precipitação é rápida, para o aquífero granular (taxas de elevação de níveis de água de, até, 1,5 m/dia), e mais lenta, para o aquífero fraturado (taxas entre 0,02 m/dia e 0,3 m/dia). Com base no uso de diferentes métodos, também foram identificados valores médios de recarga entre 20% e 26%, sendo que, nas bacias que possuem relevo mais dissecado, ocorrem as menores taxas de recarga.

Vários estudos demonstram que há recarga ascendente de aquíferos sotopostos, sendo que a mesma é responsável por misturas de águas entre os aquíferos e por alterações das composições físico-químicas das águas do SASG. Entre vários estudos, devem ser destacados os trabalhos de Lisboa (1996), de Freitas (2016), de Teixeira & Viero (2016), de Nanni (2018), de Tomasi & Roisenberg (2019), de Matos (2020) e de Teixeira (2020). Para esses autores, a recarga ascendente ocorre, em função da existência de grandes sistemas de falhas, que cortam o pacote de rochas vulcânicas e sedimentares e que propiciam a interligação entre os diferentes sistemas aquíferos. Além disso, a recarga só vai ocorrer, se também houver condições hidráulicas propícias.

A recarga descendente do SASG para os aquíferos sotopostos pode ocorrer, tendo sido avaliada em alguns trabalhos, como nos de Descovi Filho (2015), de Matos (2020) e de Teixeira (2020). A mesma pode ocorrer em algumas regiões, quando houver a existência de estruturas (falhas e fraturas), que conectam os sistemas aquíferos, além de condições potenciométricas favoráveis.

3.3 Avaliação hidrogeológica e hidrodinâmica

Para o SASG, os principais parâmetros hidrogeológicos e hidrodinâmicos, que podem ser avaliados, são o nível estático (NE), a transmissividade (T), a capacidade ou vazão específica (q) e a vazão de exploração (Q). Por ser um sistema aquífero heterogêneo, que apresenta elevada anisotropia, cada região ou área de estudo poderá apresentar diferentes valores para cada um dos parâmetros. Parâmetros como condutividade hidráulica (K) e coeficiente de armazenamento (S) são difíceis de serem determinados, pois há dificuldade em se definir a espessura saturada do aquífero fraturado, bem como em promover testes de bombeamento com poços de observação.

Na Tabela 1, são apresentados alguns resultados de parâmetros hidrogeológicos e hidrodinâmicos, obtidos em trabalhos regionais e locais sobre o SASG.

Com base nos dados de profundidade, pode-se avaliar que a mesma é variável (entre 14 m e 512 m), com valores médios entre 110 m e 132m. Os valores médios estão dentro do esperado, visto que, em profundidades superiores a 100 m, o número de entradas de água é bastante reduzido (10% a 20%). Os dados de nível estático são variáveis (entre 0 m e 176 m), mas a maioria dos níveis está situada entre 0 m e 20 m (73% a 83%), com predomínio entre 0 m e 10m (59% a 69%), sendo que, em geral, os níveis

de água estão situados acima das entradas de água. Deve-se salientar que há ocorrência de poços jorrantes no SASG (Freitas *et al.*, 2002).

Os dados de transmissividade (T) indicam a ocorrência de valores entre 0,005 m²/h e 3,61 m²/h, sendo que a maior parte é inferior a 1 m²/h, com médias entre 0,39 m²/h e 0,49 m²/h. Essas variações estão de acordo com o tipo de aquífero, que possui baixa capacidade de transmissão de água e elevada anisotropia. Os dados de capacidade ou vazão específica são mais abundantes e variam entre 0,004 m³/h/m e 37,5 m³/h/m, sendo que a maior parte se encontra abaixo de 1 m³/h/m, com médias entre 0,36 m³/h/m e 1,81 m³/h/m. Os dados também estão condizentes com o tipo de aquífero e indicam que há regiões que possuem maior produtividade do que outras.

As vazões de estabilização, obtidas de ensaios de bombeamento, indicam variações entre 0,6 m³/h e 86 m³/h, sendo que a maior parte dos valores são inferiores a 20 m³/h (entre 80% e 91%, dependendo da região estudada), com médias entre 6,8 m³/h e 17 m³/h. Esses resultados indicam que, dependendo da região, bem como de onde o poço foi locado, há possibilidade de se obter diferentes vazões de exploração. Alguns estudos foram realizados, com o objetivo de se avaliar diferenças hidrogeológicas entre os derrames básicos e ácidos. Alguns dos resultados são apresentados na Tabela 2 e indicam que os aquíferos associados às rochas básicas tendem a apresentar maiores capacidade de produção e vazão.

4 ASPECTOS HIDROGEOQUÍMICOS

A relevância do Sistema Aquífero Serra Geral para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina reside, tanto na ampla distribuição espacial e na disponibilidade hídrica quanto na qualidade e na pota-

Tabela 1 – Principais parâmetros hidrogeológicos e hidrodinâmicos do SASG.

Parâmetros Fonte	Profundidade dos Poços (m)	NE (m)	T (m ² /h)	q ou Q/s (m ³ /h/m)	Q (m ³ /h)
CPRM (2013), CPRM (2002)	24-310 117(média)	5-30		0,5- 4	0-20(90,4%) >20(9,6%)
Sanferari (2019)	14-512 113,46(media)	0,4-175,5 13,97(média)		0,006-8,25 1,09(média)	0-20(88%) >20(12%)
Tomazzi e Roisenberg (2019)		1,76-130,1 28,23(média)		0,03-37,50 1,81(media)	0,88-76,18 16,99(media)
Bortolin et al. (2014)	0-50(3%) 50-150(73%) >150(24%)	0-10(59%) 10-20(14%) >20(26%)	0-0,5(69%) 0,5-1(15%) >1 (15%)	0-0,5(61%) 0,5-1(23%) >1(16%)	0-20(80%) >20(20%)
Reginato (2003)	110(média)	0-10(66,4%) 10-20(16,4%) >20(17,2%)	0,13-1,46 0,49(media)	0,11-1,17 0,39(media)	0-20 (90,7%) >20 (9,3%)
Freitas et al (2012)	21,5 a 470 131,46(média)			0,0041- 6,6 1,14(média)	0-78,26 15,31(média)
Frenzel & Reginato (2018)	14-270 125,35(media)	0,2-125 19,9(média)		0,006-8,72 0,92(média)	0,6-85,71 13,96(media)
Bortolin (2018)	94(média)	0-10 (69%) 10-20(14%) >20(17%)	0,005-3,61 0,39(média)	1,67(média)	0-20(85%) >20 - 15%
Pacheco (2019)	0-100(60%) 100-150(24%) >150(16%)	1-70,3 0-20(75%) 18,5(média)		0,03-1,06 0,36(média)	1-27,8 6,8 (média)

Tabela 2 – Dados hidrogeológicos e hidrodinâmicos para os aquíferos fraturados, associados a unidades vulcânicas básicas e ácidas.

Fonte	Básicas	Ácidas
Machado e Freitas (2000)	Profundidade Poços: 104,1m (media) Entrada de Água: 1 a 6 (profundidade da última entrada entre 10 e 151m) Vazão: 0,5 e 50m ³ /h. Média: 8,8m ³ /h NE: 0 a 130m q média: 0,92m ³ /h.m	Profundidade Poços: 110,53m (média) Entrada de Água: 1 a 5 (profundidade da última entrada entre 12 e 174m). Vazão: 0 a 55m ³ /h: Média: 8,5m ³ /h NE: 0 a 84,4m q média: 0,66m ³ /h.m
Kirchheim et al., (2013)	Profundidade Média dos Poços: 53,55 a 120,53m Vazões médias: 9,67 e 12,90 m ³ /h Capacidades específicas médias: 0,98 e 1,48 m ³ /h.m	Profundidade Média dos Poços: 131,65 a 132,67m Vazões médias: 7,01 a 8,71 m ³ /h Capacidades específicas médias: 0,64 a 0,66 m ³ /h.m
Trevisan e Reginato 2019	Profundidades: 39,8 a 265m NE: 1,54 a 96,70m. Média: 24,2m Entrada de Água: 1 a 8 (<50m - 54%) Vazão: entre 2,6 e 90 m ³ /h (28,23m ³ /h (média)	Profundidade: 40 a 261m NE: 0 a 103,63m. Média: 11,81m Entrada de Água: 1 a 11 (<50m - 58%) Vazão: 2 a 85,7 m ³ /h. Média: 18,34

bilidade das águas. Estudos hidroquímicos, realizados em toda a área de abrangência do sistema aquífero, revelam que suas águas têm composição bicarbonatada dominante, com amplo predomínio do tipo bicarbonatada cálcica e, com menor incidência, bicarbonatada magnésiana. Os estudos registram, ainda, a ocorrência menos frequente de águas bicarbonatadas sódicas, sulfatadas sódicas e sulfatadas ou cloretadas sódicas (Lisboa, 1996; Machado, 2005; Nanni *et al.*, 2009; Freitas *et al.*, 2012; Reginato *et al.*, 2013; Freitas *et al.*, 2016; Freitas, 2016; Ma-

tos, 2020). A salinidade das águas é baixa, em especial, nos tipos bicarbonatada cálcica e magnésiana, com valores médios de sólidos totais dissolvidos (STD) da ordem de 200 mg/L (SASG I) e de 250 mg/L (SASG II) no Rio Grande do Sul (CPRM, 2005). Em Santa Catarina, a assinatura hidroquímica não é diferente, em termos gerais, registrando concentrações de STD, geralmente, inferiores a 250 mg/L na porção leste do sistema aquífero, próxima à escarpa da Serra Geral, e menores do que 500 mg/L nas regiões central e oeste, onde a recarga as-

cedente é mais intensa (CPRM, 2002; CPRM, 2013).

Embora predominem amplamente as águas com baixo conteúdo iônico, a composição hidroquímica do SASG registra, em quantidade pouco expressiva de amostras, elevadas concentrações de todos os principais íons dissolvidos (flúor, sódio, cloreto, sulfato, ferro e STD), chegando a comprometer a potabilidade em pequeno número de poços (Tab. 3). Águas não potáveis, em razão do arsênio, do selênio e do vanádio, também são inventariadas em alguns poços do SASG, no noroeste do RS (Silveira, 2019). Para o uso na indústria, as águas desse sistema aquífero não apresentam restrições, exceto em casos localizados, com excesso de carbonato, que podem inviabilizar a utilização em caldeiras. Na agricultura, por outro lado, as águas se prestam para a irrigação das mais variadas culturas.

Elevada condutividade elétrica, com valores que chegam a 4.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estão presentes em águas termais, captadas em fontes e em poços tubulares jorrantes, na região do Alto Uruguai, no RS, e em SC (Freitas *et al.*, 2016). Nestas águas, os autores registram, ainda, concentrações altas de fluoreto, com média da ordem de 1,52 mg/L.

A ampla variabilidade composicional das águas do SASG deriva da grande complexidade dos mecanismos de recarga, que consistem na infiltração direta da precipitação pluviométrica e na ascensão de águas, provenientes das inúmeras unidades hidroestratigráficas sedimentares subjacentes da Bacia do Paraná (Kern *et al.*, 2008; Reginato *et al.*, 2013; Freitas *et al.*, 2016; Freitas, 2016; Matos, 2020).

Estudos de Teixeira (2020) mostram que, no Rio Grande do Sul, as águas subterrâneas de recarga direta e de circulação restrita ao SASG, sem contribuição dos aquíferos sedimentares, são essencialmente bicarbonatadas cálcicas e exibem uma boa correlação entre o

cálcio e a alcalinidade total. A análise dos dados hidroquímicos, publicados por CPRM (2005), revela um comportamento similar em Santa Catarina, indicando a atuação dos mesmos mecanismos de recarga e dos mesmos processos de interação água/rocha nos dois estados e, provavelmente, em toda a extensão do sistema aquífero. A recarga ascendente é vinculada a grandes falhas e a fraturas e ocorre em toda a extensão do SASG no RS e em SC, o que promove o aumento da concentração de vários íons na água, em particular, a condutividade elétrica, alterando as correlações interelementares, em resposta à grande variabilidade composicional e à hidrodinâmica das unidades hidroestratigráficas subjacentes, além da maior intensidade e da diversidade dos processos de interação água/rocha. O sódio, o sulfato, o fluoreto, o cloreto e o STD, além da condutividade elétrica, são os parâmetros químicos maiores, que têm, nas altas concentrações, indicadores típicos de recarga ascendente, em razão da ausência dos mesmos nos minerais solúveis e disponíveis a reações com a água do SASG. Elevados teores de cálcio, de magnésio e de alcalinidade total ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) também derivam da contaminação com águas de prolongada residência nos aquíferos sedimentares sotopostos, portadores de calcita e/ou de dolomita. As águas de circulação restrita no SASG, mesmo que tipicamente bicarbonatadas cálcicas, apresentam conteúdos relativamente baixos de cálcio e de bicarbonato (Teixeira, 2020) e ainda menores dos demais íons.

Nas rochas vulcânicas básicas e ácidas do SASG, a hidrólise e a dissolução dos minerais formadores do aquífero é limitada ou, mesmo, inoperante, até, devido à fraca interação água/rocha e à baixa solubilidade de silicatos, quando comparadas com as dos sais (Chou & Wollast, 1985; Delany *et al.*, 1986). A natureza fraturada do aquífero

Tabela 3 – Dados químicos dos principais íons das águas subterrâneas do SASG (legenda: nq - não quantificado; sn - sem normatização).

	CE μS/cm	Alc. Total mg/L CaCO ₃	SO ₄ mg/L	Cl mg/L	Ca mg/L	Na mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	F mg/L
Média	236	98,2	16,4	11,5	17,9	28,7	5,5	0,28	0,4
Mediana	188	87,0	3,3	5,0	15,0	13,9	4,0	0,08	0,3
Modo	220	60,0	1,0	2,0	12,0	10,0	2,0	0,00	0,2
Desvio padrão	235	64,8	59,9	44,4	15,6	45,9	6,3	0,82	0,7
Mínimo	14	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq
Máximo	5.450	642,4	992,0	1.885,9	182,0	832,0	90,4	10,00	12,4
1º Quartil	127	56,0	1,3	2,1	7,2	7,0	2,0	nq	nq
2º Quartil	188	87,0	3,3	5,0	15,0	13,9	4,0	0,08	0,3
3º Quartil	280	125,0	7,8	10,1	24,0	31,0	7,0	0,20	0,4
Número Amostras	4.392	4.205	2.896	4.065	3.892	3.599	3.582	3.463	3.397
Acima do limite de potabilidade	sn	sn	1,3%	0,3%	sn	1,1%	sn	14,8%	4,0%

restringe fortemente a interação água/rocha, por conta da pequena área de contato das fases sólidas com a líquida. A superfície específica do aquífero é fator determinante da cinética de reação (dn/dt), conforme a Equação 1.

$$-\frac{dn}{dt} = ksa_H^n \left(1 - \frac{Q}{Keq}\right) \quad (1)$$

em que k é a constante de dissolução ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), s é a superfície específica do sólido ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$), a_H é a atividade de hidrogênio, n é um fator de ajuste e Q/Keq representa o índice de saturação do mineral. A superfície específica de um aquífero fraturado, considerando fraturas espaçadas em um metro, é da ordem de 4.000 a 2.000 vezes menor do que a de um arenito fino e do que a de um arenito médio, respectivamente. Quanto maior é o espaçamento das fraturas, menor é a superfície específica do aquífero.

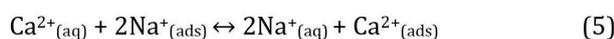
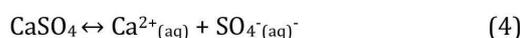
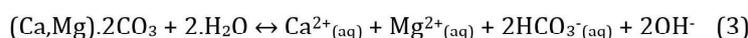
Por conta da interação tênue da água com as rochas vulcânicas nos setores do SASG em que a recarga pluviométrica é única ou amplamente dominante, a assinatura hidrogeoquímica, tipicamente bicarbonatada

cálcica, está intimamente associada à hidrólise de calcita, largamente distribuída em amígdalas e em fraturas, mantendo a boa correlação positiva entre cálcio e alcalinidade total (Eq. 2). Contribuem, de forma subordinada, ainda, a dissolução de CO_2 atmosférico e alguma lixiviação de metais, especialmente, Mg, Fe e Na, adsorvidos em argilominerais, presentes em solos atuais jovens, em paleossolos pouco lixiviados e em rochas alteradas, localizadas no topo de derrames básicos e de unidades piroclásticas ácidas.

A maior parte da carga iônica das águas de recarga ascendente do SASG também é devida à hidrólise de carbonatos (calcita e, em algumas áreas, dolomita), ao que se soma a dissolução de sulfatos e de haletos e a troca catiônica do cálcio e do magnésio pelo sódio. A hidrólise de carbonatos (Equações 2 e 3) é intensa, elevando as concentrações de cálcio, de magnésio e de alcalinidade total a patamares da ordem de 180 mg/L, de 90 mg/L e de 640 mg/L, respectivamente. A calcita é registrada como cimento, como concreções ou como nódulos em várias unidades hidro-

estratigráficas da Bacia do Paraná, dentre as quais merecem destaque o Grupo Itararé e as formações Rio Bonito, Irati, Estrada Nova, Piramboia e Botucatu. Além da calcita, de solubilidade média a alta, a anidrita, muito solúvel e presente nos sedimentitos do Grupo Itararé e das formações Rio Bonito, Irati e Piramboia, contribui para o cálcio dissolvido, configurando, ainda, a fonte das elevadas concentrações de sulfato, que chegam perto de 1.000 mg/L (Eq. 4). Parte do cálcio e do

magnésio é subtraída da solução, pela troca catiônica com o sódio, dentro das unidades sedimentares portadoras de argilo-minerais (Eq. 5), sendo esta a principal fonte deste metal nas águas subterrâneas do SASG. O sódio pode ter origem, ainda, na dissolução da halita, descrita, principalmente, na Formação Irati, e, neste caso, as águas registram, também, enriquecimento em cloreto, o que é observado em número reduzido de poços.



A preponderância da hidrólise da calcita na salinização das águas no SASG e, também, nas unidades aquíferas sedimentares da Bacia do Paraná, em que dolomita, sulfatos e haletos estão ausentes ou presentes, em quantidades subordinadas, fica patente no diagrama de dispersão da alcalinidade total contra o cálcio (Fig. 3A). Nesse diagrama, o conjunto de todas as amostras revela grande dispersão de pontos, com coeficiente de regressão da ordem de 0,1, enquanto aquelas, vinculadas a esses ambientes, configuram uma tendência de boa correlação positiva entre os dois parâmetros, ficando as do SASG no segmento abaixo de 50 mg/L de cálcio e de 200 mg/L de alcalinidade total.

A troca catiônica, expressa na Equação 5, fica evidenciada no diagrama binário da alcalinidade contra o somatório de cálcio e de sódio (Fig. 3B). Aqui, um maior número de amostras é incorporado ao *trend*, que assume melhor definição e aumenta o coeficiente de regressão, agregando aquelas de baixo cálcio e com sódio, provenientes da dessorção das argilas. Os processos de troca de cátions não são ativos no SASG, uma vez que, neste sistema aquífero, os minerais adsorventes são es-

cassos e restritos ao manto de alteração e a raros paleossolos. Ademais, o solo predominante é o latossolo, evoluído, profundo e lixiviado, composto, essencialmente, por caulinita e por óxidos de ferro e de alumínio, que exibem baixa capacidade de troca catiônica.

A hidrólise de carbonatos e a troca de cátions responde satisfatoriamente pela assinatura química de 85% ou mais das águas subterrâneas do SASG, em termos de cátions e de ânions maiores, sejam aquelas de circulação restrita a este sistema aquífero, sejam aquelas com contribuição de recarga ascendente. A parcela restante requer outros processos de interação água/rocha, atuando nos aquíferos, e a dissolução de anidrita/gipsita é o mais relevante, conforme pode ser constatado na Figura 3C. Este diagrama mostra que, adicionando o sulfato à alcalinidade, a quase totalidade das amostras se reúne em um só *trend*, de boa correlação e com coeficiente de regressão da ordem de 0,75. As poucas amostras posicionadas acima do *trend*, que têm excesso de sódio, em relação à alcalinidade, mais sulfato, acusam a dissolução de halita e pratica-

mente todas se acomodam no *trend* com a adição de cloreto ao sulfato e à alcalinidade (Fig. 3D). Neste diagrama, a dispersão é pequena e o coeficiente de regressão sobe para 0,82.

A presença de fluoreto em concentrações significativas nas águas do SASG também reflete recarga ascendente (Nanni *et al.*, 2009) e sua provável origem reside na dissolução de fluorita, que, segundo Kern *et al.* (2008), ocorre, principalmente, nos folhelhos betuminosos das formações Irati e Ponta Grossa, como mineral diagenético, associado a outros sais, como barita, anidrita, calcita, dolomita, pirita e outros. Tal paragênese neoformada, em especial, a dos sulfetos, que também aparecem nos folhelhos carbonosos da Formação Rio Bonito, é a provável fonte do arsênio e do selênio encontrados em poços do noroeste do estado gaúcho.

O comportamento relativo dos principais íons das águas subterrâneas, revelado na geometria dos diagramas de dispersão binários, é indicativo da inexpressiva influência da composição química e da mineralógica dos vulcanitos na assinatura hidroquímica do SASG. A independência da química da água subterrânea, em relação à mineralogia e à geoquímica do aquífero, também é reconhecida no Sistema Aquífero Cristalino III, formado por granitos e por gnaisses, na região metropolitana de Porto Alegre (Viero *et al.*, 2009). Como esperado, a partir dos princípios termodinâmicos, são os minerais de maior solubilidade e os mais expostos a reações com a água que conferem as propriedades químicas das águas subterrâneas do sistema Aquífero Serra Geral, tanto para aquelas mais jovens, de recarga pluviométrica descendente, quanto para aquelas mais antigas, de recarga ascendente.

5 POTENCIAL HÍDRICO E RELEVÂNCIA SOCIOECONÔMICA

5.1 Os usos atuais da água nos abastecimentos público e privado

A crescente demanda por recursos hídricos, decorrente do crescimento econômico e das frequentes estiagens, verificadas nos últimos anos, tem incrementado a exploração das águas subterrâneas. Estas são uma alternativa bastante atraente para abastecimento, em virtude da sua abundância, da sua qualidade e do seu relativo baixo custo de captação, principalmente, considerando-se a degradação da qualidade das águas superficiais, associada ao elevado custo do tratamento dessas águas, para os diversos usos. Assim, as águas subterrâneas vêm se tornando estratégicas nos desenvolvimentos econômico e social do país.

Neste contexto, enquadra-se o Sistema Aquífero Serra Geral, que, dos sistemas aquíferos existentes no sul do Brasil, é o que possui maior abrangência e maior utilização, fato que decorre de sua boa explorabilidade e da excelente qualidade físico-química de suas águas. Explotado, através de poços tubulares e de captações de fontes, tem suas águas utilizadas para consumo humano, industrial, pastoril e, também, para balneabilidade. Uma breve consulta ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), do Serviço Geológico do Brasil, revela a magnitude e a importância deste sistema aquífero no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. O SIAGAS exhibe um panorama parcial do número de poços perfurados neste sistema aquífero, registrando, atualmente, cerca de 17.000 poços tubulares, dos quais 77% se encontra em funcionamento, para os abastecimentos público e industrial e para a dessedentação de animais. Considerando a vazão média dos poços em utilização, que é de 13,7 m³/h, e um período de bombeamento de 12 horas diárias, estima-se, nesses poços, uma retirada anual de água aproximada de 1,02 x 10⁹ m³.

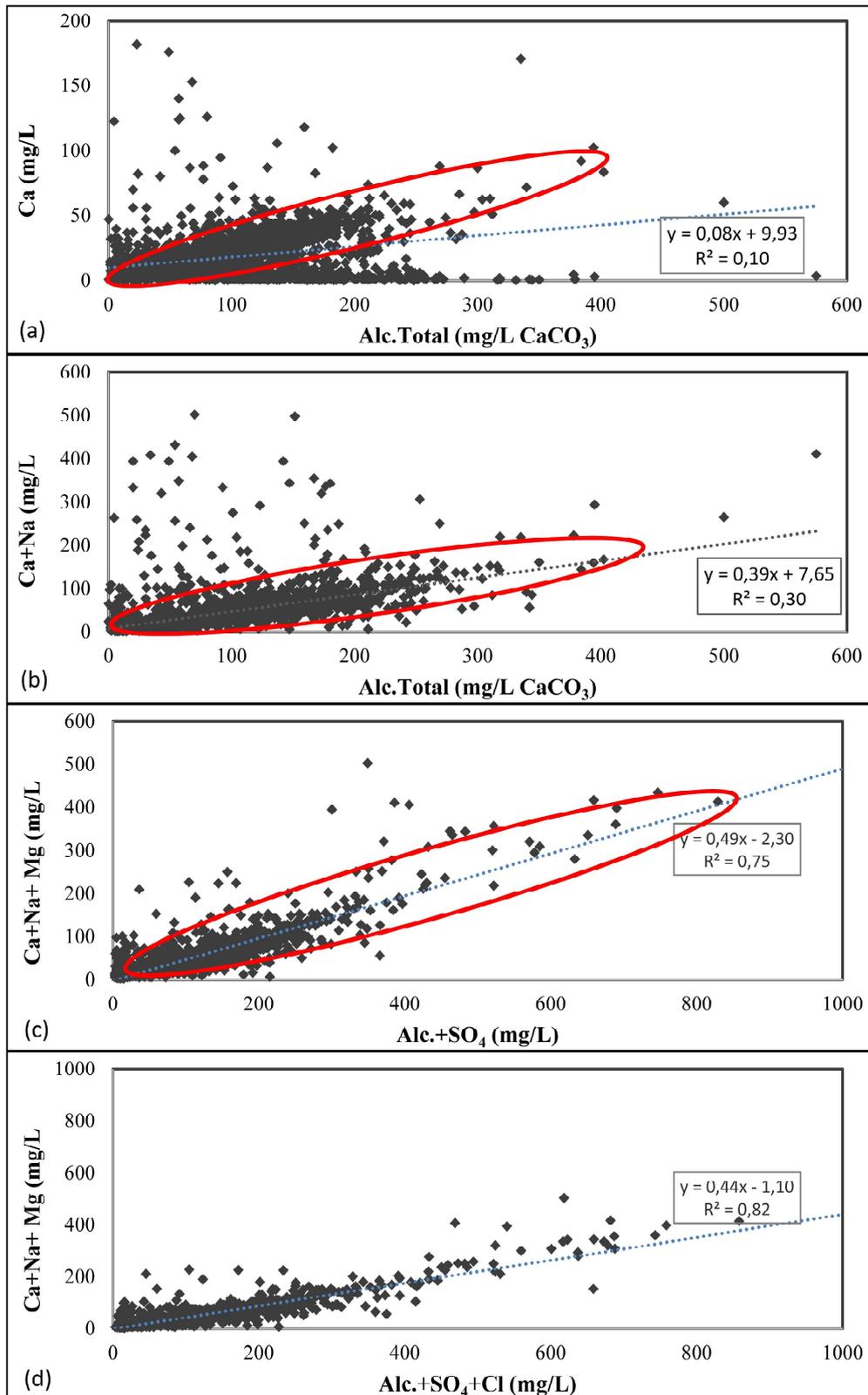


Figura 3 – Diagramas de dispersão, mostrando correlações entre os principais íons do SASG e a influência da recarga ascendente: A) *trend*, decorrente da hidrólise da calcita, marcado pela elipse vermelha; B) *trend*, decorrente da hidrólise da calcita, mais troca de cátions, marcado pela elipse vermelha; C) *trend*, decorrente da hidrólise da calcita e da anidrita, mais troca de cátions, marcado pela elipse vermelha; d) *trend*, decorrente da hidrólise da calcita, da anidrita e da halita, mais troca de cátions.

Segundo dados da ANA (2010), no Rio Grande do Sul, 59% das sedes municipais são abastecidas exclusivamente por águas subterrâneas e, em 13% destas, o abastecimento é realizado de forma mista (por mananciais superficiais e subterrâneos). A Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) opera, no SASG, 456 poços tubulares, em 103 municípios, totalizando uma exploração mensal de $14,24 \times 10^6 \text{ m}^3$. Em Santa Catarina, os municípios localizados na porção oeste têm, como principal fonte de abastecimento de água, os mananciais subterrâneos, sendo que 23% dos municípios são abastecidos exclusivamente por mananciais subterrâneos e 20%, de forma mista (ANA, 2010). A Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) e os serviços municipais de água e de esgoto abastecem 87 municípios com água subterrânea extraída do SASG.

5.2 Potencialidade de abastecimento nos diversos setores socioeconômicos

O SASG é um dos aquíferos mais explorados do país, no qual inúmeras empresas, sobretudo, indústrias e estabelecimentos comerciais, utilizam poços, para suprir, total ou parcialmente, as suas demandas. Apesar de sua vazão moderada, quando comparada à dos grandes aquíferos porosos, como, por exemplo, o sistema aquífero Guarani, o SASG leva vantagem pela sua acessibilidade e pelo baixo custo de construção de poços. Para exemplificar, um poço construído no SASG custa, em média, um terço do valor de um poço construído no aquífero Guarani. A principal diferença é de que os poços perfurados no SASG possuem menor diâmetro (6 polegadas) e são parcialmente revestidos, não necessitando de filtros e de pré-filtros. Geralmente, desde que bem localizados, estes poços não superam a profundidade de 100 metros, obtendo vazões satis-

fatórias, como observado nos capítulos anteriores.

Outro importante fator é de que suas águas, na grande maioria das vezes, caracterizam-se por apresentar baixas concentrações de sais dissolvidos, possibilitam o uso nas mais variadas atividades econômicas, especialmente, na indústria. Outro nobre uso das águas do SASG consiste no abastecimento de comunidades rurais, para as quais, geralmente, o poder público municipal constrói os poços e os cede a associações ou a condomínios de água administrados pelos próprios moradores. Também há muitos poços particulares em granjas integradas com os grandes frigoríficos de aves e de suínos, nos quais predominam o abastecimento animal e o uso geral das águas do SASG.

5.3 Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do aquífero

A vulnerabilidade natural à contaminação é uma propriedade intrínseca do meio aquífero e tem intensa relação com suas características hidrogeológicas. No SASG, como observado por Freitas *et al.* (2012), deve-se considerar, basicamente, os seguintes aspectos, fundamentais para a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação: nível da água no aquífero, espessura do regolito, grau de fraturamento da rocha e topografia do terreno.

O nível da água subterrânea é um importante fator, quando se trata da vulnerabilidade do aquífero, principalmente, em aquíferos porosos. No sistema aquífero Serra Geral, de caráter fraturado, o nível da água nem sempre representa o nível freático, pois resulta do somatório das pressões de cada descontinuidade no corpo rochoso (fraturas, juntas e contatos interderrames). Porém, no horizonte regolítico, é possível o desenvolvimento de um aquífero livre suspenso ou interligado ao aquífero fraturado. Neste caso, a

distância até o nível da água é um importante fator no controle da vulnerabilidade do aquífero.

O regolito, formado por solo ou por saprolito, desempenha crucial papel na proteção do aquífero fraturado subjacente, sobretudo, se possuir composição predominantemente argilosa. Em terrenos em que a rocha fraturada estiver exposta, a vulnerabilidade do aquífero é maior, caso muito frequente nas regiões em que predomina a ocorrência de rochas ácidas. Por outro lado, se o regolito for espesso e argiloso, a vulnerabilidade é bem menor, por vezes, insignificante, especialmente, quando não há nível freático presente no horizonte.

Como visto nos itens anteriores, as zonas aquíferas desenvolvidas nas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral estão intimamente ligadas à presença de fraturamentos de natureza tectônica ou por resfriamento da lava ou, mesmo, por alívio de pressão. É natural afirmar que, quanto mais fraturada uma rocha, melhor aquífero ela será e, também, mais vulnerável à contaminação a mesma ficará.

A topografia do terreno, entre outros fatores, controla o escoamento superficial das águas originárias da chuva. Um terreno com alta declividade propicia um forte escoamento das águas. Por outro lado, em um terreno plano ou com baixa declividade, as águas tendem a ficar estagnadas por mais tempo na superfície e a infiltrarem no aquífero, deixando a área mais vulnerável à contaminação.

Em suma, uma determinada área do Sistema Aquífero Serra Geral pode apresentar alta vulnerabilidade, se a rocha estiver muito fraturada e aflorante em um terreno plano ou pouco declivoso, enquanto a vulnerabilidade será baixa em uma área declivosa, com cobertura regolítica e com rochas pouco fraturadas. O risco de contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral ocorre, quando há a

associação entre alta vulnerabilidade natural e uma fonte potencial de contaminação. Nas áreas urbanas, as atividades industriais, os postos de combustíveis, os lixões, os vazamentos nas redes de esgoto, entre outros, configuram essas fontes potenciais de contaminação. Em muitos municípios médios a grandes, situados sobre as rochas intermediárias a ácidas, os efluentes são descartados em fossas sépticas, que, muitas vezes, estão instaladas em solos muito rasos ou em rocha alterada, elevando muito o risco de contaminação do SASG. Na área rural, os riscos estão relacionados às culturas que utilizam fertilizantes e agrotóxicos, bem como à criação intensiva de animais. Rios influentes poluídos podem contaminar o aquífero Serra Geral, sobretudo, nas áreas muito fraturadas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O SASG representa a unidade hidroestratigráfica com a maior abrangência e de maior utilização em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, ocupando cerca de 50% da área territorial de cada estado. É formado pelas rochas vulcânicas básicas e ácidas do Grupo Serra Geral, as quais se estendem por, aproximadamente, 290.000 km² nos dois estados, com espessuras de, até, 1.000 m no RS e de, até, 1.200 m em SC. No estado gaúcho, 103 municípios são abastecidos por poços do SASG, enquanto, no estado catarinense, são 93. A alta densidade de fraturas e de falhas tectônicas, associadas a abundantes juntas de contração, conferem boa porosidade e boa permeabilidade ao sistema aquífero, permitindo o acúmulo de grande volume de água e a captação de elevadas vazões em muitos poços tubulares.

Os poços explotados, em número próximo de 13.000, de acordo com registros do SIAGAS, possuem vazão média da ordem de 14 m³/h e água de excelente qualidade, sem restrição de uso para qualquer fim em

mais de 95% deles. Poços que não atendem aos padrões de potabilidade têm água com excesso de Flúor, de Sulfato, de Sódio, de Cloro e de Ferro, além de Arsênio e de Selênio, em raríssimos casos.

As águas de recarga direta por precipitação pluviométrica e de circulação restrita ao SASG têm assinatura hidroquímica marcada pela predominância do tipo bicarbonatada cálcica, pelas baixas concentrações de sólidos totais dissolvidos e pela ausência de impeditivos de uso para todos os fins. As águas que têm contribuição da recarga ascendente, por outro lado, são mais salinizadas, com concentrações mais elevadas de Sódio, de Sulfato, de Cálcio, de Flúor e, em alguns casos, de Cloro, e vários poços apresentam restrição de potabilidade. A hidrólise de calcita, tanto no SASG quanto nos aquíferos sedimentares sotopostos, a dissolução de anidrita, de fluorita e de halita e a troca de cátions, restrita aos aquíferos sedimentares, constituem os processos de interação água/rocha responsáveis pelo conteúdo de íons dissolvidos nas águas do SASG.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas. 2010. *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado*. Brasília, ANA/Engecorps/Cobrape. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=3>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- Bortolin, T. A., Reginato, P. A. R., Leão, M. I. & Schneider, V. E. 2014. Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). *Rev. Ambiente. Água [online]*, 9(1): 55-67. ISSN 1980-993X. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1270>.
- Bortolin, T. A. 2018. *Estudo da recarga do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia hidrográfica Taquari-Anta*. Porto Alegre, 220p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Chou, L. & Wollast, R. 1985. Steady-state kinetics and dissolution mechanisms of albite. *Am. J. Sci.*, 85: 963-993.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2002. *Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do estado de Santa Catarina*. Porto Alegre, CPRM, 110p.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2005. *Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. 2v., escala 1:750.000.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2002. *Mapa hidrogeológico do estado de Santa Catarina*. Porto Alegre: Porto Alegre, 2v., escala 1:500.000.
- Cunha, G. G., Roisenberg, A., Pulgati, F. H. & Freitas, M. A. 2016. Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Noroeste do Rio Grande do Sul e sua relação espacial com a tectônica rúptil. *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, 43: 55-67. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78192>.
- Delany, J. M., Puigdomenech, I. & Wolery, T. J. 1986. *Precipitation kinetics option for the EQ3/6 geochemical reaction path code*. Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-53642, Livermore, 44p.
- Descovi Filho, L. L. V. 2015. *Geomorfoestruturas e Compartimentação Tectônica do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral no Estado de Santa Catarina, Brasil*. Florianópolis. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geografia, UFSC.
- Freitas, M. A. 2016. *Hidrogeoquímica e Isotopia de Águas com Alta Salinidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região do Alto Rio Uruguai, Brasil*. Porto Alegre, 195p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Freitas, M. A., Binotto, R. B., Nanni, A. S., Rodrigues, A. L. M. & Bortoli, C. R. 2012. Avaliação

- ção do Potencial Hidrogeológico, Vulnerabilidade Intrínseca e Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(2): 31-41.
- Freitas, M. A., Roisenberg, A. & Andriotti, J. L. S. 2016. Análise Exploratória de Dados da Condutividade Elétrica nas Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Revista Águas Subterrâneas*, 30(1): 1-17.
- Frenzel, M. G. & Reginato, P. A. R. 2018. Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na Região de Garibaldi, RS. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 6., 2018. Bento Gonçalves, *Anais*. . . Bento Gonçalves.
- Hausman, A. 1995. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS. *Acta Geológica Leopoldensia*, 2: 1-127. (Série Mapas)
- 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(6): 1219-1233.
- Kirchheim, R. E., Mattiuzi, C. D. P. & Figueira, S. V. 2013. Hidrogeologia e Faciologia dos Derrames Serra Geral em SC: O Siagas como Ferramenta de Análise. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. *Anais*. . . Bento Gonçalves.
- Lima, E. V., Philipp, R. P., Rizzon, G. C., Waiichel, B. L. & Rossetti, L. M. M. 2012. Sucessões vulcânicas, modelo de alimentação e geração de domos de lava ácidos da Formação Serra Geral na região de São Marcos-Antônio Prado (RS). *Revista do Instituto de Geociências - USP*, 12(2): 49-64.
- Lisboa, N. A. 1996. *Fácies, Estratificações Hidrogeoquímicas e seus Controladores Geológicos, em Unidades Hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral, na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 135p.
- Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Lisboa, N. A., Dani, N., Remus, M. V. & Castro, J. 2004. Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., Cuiabá, 2004. *Anais*. . . Cuiabá.
- Machado, J. L. F. 2005. *Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul*. São Leopoldo, 237p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio Dos Sinos.
- Machado, J. L. F. & Freitas, M. A. 2000. Hidroquímica do Aquífero Serra Geral no oeste de Santa Catarina. In: I JOINT WORLD CONGRESSO GROUNDWATER. Fortaleza, 2000. *Anais*. . . Fortaleza.
- Machado, R., Roldan, L. F., Jacques, P. D., Fasbinder, E. & Nummer, A. R. 2012. Tectônica Transcorrente mesozoica-cenozoica no Domo de Lages - Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 42(4): 799-811.
- Matos, A. B. 2020. *Compartimentação Estrutural e Interações Hidrogeológicas entre o Sistema Aquífero Guarani e Serra Geral na Região Nordeste do Estado Do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 191p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade do Federal do Rio Grande do Sul.
- Nanni, A. S., Roisenberg, A., Marimon, M. P. C. & Viero, A. P. 2009. The Hydrochemical Facies and Anomalous Fluoride Content in the Serra Geral Aquifer System, Southern Brazil: A GIS Approach with Tectonic and Principal Component Analysis. *Environmental Geology*, 58(6): 1247-1255.
- Pacheco, A. R. 2019. *Caracterização Hidrogeológica do Município de Nova Petrópolis*. Por-

- to Alegre, 107p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Reginato, P. A. R., Ahlert, S., Schneider, V. E. 2013. Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, 27(1): 65-78.
- Reginato, P. A. R., Ahlert, S., Gilioli, K. C., Cemin, G. 2012. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre do manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. *Revista Ambi-Água*, 7(2): 143-162. DOI: [http://dx. doi.org/10.4136/ambi-agua.903](http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.903).
- Reginato, P. A. R. 2003. *Integração de Dados para Prospecção de Aquíferos Fraturados em Trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS)*. Porto Alegre, 254p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Reginato, P. A. R., Leão, M. I., Bortolin, T. A., Dutra, T. O., Athayde, G. B. & Athayde, C. V. M. 2015. Circulação da Água Subterrânea nas Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15., Bento Gonçalves, 2015. *Anais. . .* Bento Gonçalves.
- Roisenberg, A. & Viero, A. P. 2002. O Vulcanismo Mesozoico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: Holz, M. & De Ros, L. F. (Ed.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Ed. UFRGS, p. 355-374.
- Silveira, L. M. 2019. *Estudo Sobre a Ocorrência de Arsênio nas Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral, no Município De Cerro Largo - RS*. Porto Alegre, 107p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Teixeira, G. V. 2020. *Estudo Hidrogeoquímico das Águas Subterrâneas do Aquífero Serra Geral e sua Relação com Aquíferos Sedimentares no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 272p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Tomasi, L. C. & Roisenberg, A. 2019. Influência da Tectônica-Rúptil na Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí, RS. *Revista Águas Subterrâneas*, 33(3): 292-302.
- Trevisan, C. & Reginato, P. A. R. 2019. Análise e Caracterização Hidrogeológica das Unidades Vulcânicas Gramado e Palmas/Caxias (RS). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, XI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECTONICS E XI SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA. 17., Bento Gonçalves, 2019. *Anais. . .* Bento Gonçalves.
- Viero, A. P., Roisenberg, C., Roisenberg, A. & Vigo, A. 2008. The origin of fluoride in the granitic aquifer of Porto Alegre, Southern Brazil. *Environmental Geology*, 56(8): 1707-1719.
- Zalán, P. V., Wolf, S., Conceição, J. C. L., Astolfi, A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T., Zanotto, O. A. & Marques, A. 1991. Tectonics and Sedimentation of Paraná Basin. In: INTERNATIONAL GONDWANA SYMPOSIUM, 7., 1991. *Proceedings. . .* Tasmania, v. 1, p. 83-117.