

Artigos

Influência da Tectônica-Rúptil na Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí, RS

Influence of Tectonics on the Hydrogeochemistry of the Serra Geral Aquifer System in the Ijuí River Basin, Rio Grande do Sul State

Leonardo Cassol Tomasi¹; Arí Roisenberg¹ ✉

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS.

✉ leonardo.tomasi@geolac.com.br, ari.roisenberg@ufrgs.br

Palavras-chave:

Sistema Aquífero Serra Geral.
SASG.
Hidrogeologia.
Hidrogeoquímica.
Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí.

Keywords:

Serra Geral Aquifer System.
SGAS.
Hydrogeology.
Hydrogeochemistry.
Ijuí River Basin.

Revisado por pares.

Recebido em: 20/11/2018.

Aprovado em: 04/07/2019.

Resumo

O presente estudo teve como objetivo integrar dados hidrogeológicos, estruturais e hidrogeoquímicos no âmbito do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí, Noroeste do Rio Grande do Sul, a fim de reconhecer características que permitam aprimorar o entendimento sobre os recursos hídricos subterrâneos da região. A metodologia utilizada na caracterização estrutural compreendeu a compilação de dados hidrogeológicos de poços tubulares, mapeamento de lineamentos tectônicos através de imagens de satélite, confecção de mapas temáticos e análises estatísticas. Já para a caracterização hidrogeoquímica, dados laboratoriais foram tratados estatisticamente através de análise fatorial, permitindo o agrupamento de amostras em três fácies: Fácies Na, Fácies CaMg e Fácies Águas Mistas. Os resultados demonstram que as estruturas geológicas de médio porte (2-4 km) são predominantes na área, com direções preferenciais NE-E e N-NE. Há correlação positiva entre os poços com maiores vazões e as zonas de alta densidade de lineamentos. Quanto à hidrogeoquímica, o estudo indica que as águas subterrâneas possuem diferentes proveniências, sendo a Fácies CaMg relacionada à recarga meteórica e a Fácies Na à mistura com águas do Sistema Aquífero Guarani, que ascendem através de falhas e fraturas das rochas vulcânicas. Esse entendimento foi corroborado pela identificação de correlação positiva entre os poços da Fácies Na e as zonas de alta densidade de lineamentos.

Abstract

This study aimed to integrate hydrogeological, tectonic, and hydrogeochemical data from the Serra Geral Aquifer System (SGAS) in the Ijuí River Basin, in the Northwest of Rio Grande do Sul, Brazil, in order to recognize characteristics that permit an improvement in the understanding of the subterranean water resources of the region. The methodology used in the structural characterization included assembling of hydrogeological data from water wells, tectonic lineaments mapping through satellite images, creation of thematic maps and statistical analyses. As for the hydrogeochemical characterization, laboratory data was treated statistically through a factor analysis, allowing the grouping of samples into three facies: Na Facies, CaMg Facies and Mixed Water Facies. The results demonstrate that the medium-sized geological structures (2-4 km) are predominant in the area, with NE-E and N-NE preferential directions. There is a positive correlation between the wells with higher flow rates and the zones with a high density of lineaments. As for the hydro geochemistry, the study indicates that the groundwater has different sources, with the CaMg facies related to the meteoric replenishment and the Na Facies being related to the mixing with waters from the Guarani Aquifer System, which ascend through faults and fractures in the volcanic rocks. This understanding was corroborated by the identification of a positive correlation between the Na facies wells and the zones with a high density of lineaments.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i3.29262>

1. INTRODUÇÃO

A utilização de águas subterrâneas na Região Sul do Brasil vem sendo ampliada ao longo das últimas décadas e, como consequência, estudos a respeito da qualidade e disponibilidade das águas têm sido desenvolvidos com maior frequência no meio acadêmico.

O presente trabalho teve como objetivo combinar dados hidrogeológicos e hidroquímicos de poços tubulares na área da Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí, com a análise estrutural e defini-

ção dos lineamentos tectônicos no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), unidade predominante na região. Todos os dados foram obtidos através do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

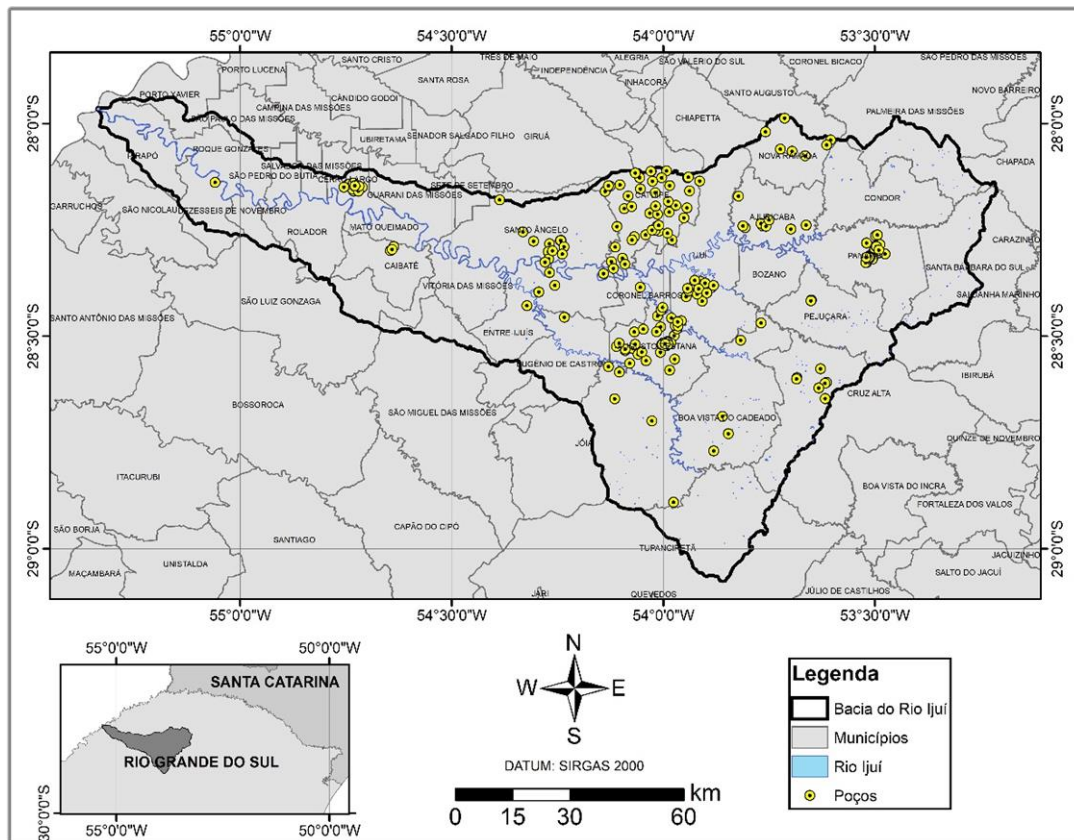
O SASG é classificado como um aquífero fraturado, tendo em vista que o armazenamento e a circulação de suas águas ocorrem por descontinuidades das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, como fraturas de contração e demais lineamentos estruturais.

A área da Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí (Fig. 1) envolve um território que totaliza 10.703,78 km² e abrange 36 municípios. A bacia está localizada a norte-noroeste do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°00' a 29°05' de latitude Sul e 53°11' a 55°21' de longitude Oeste, e seus prin-

cipais cursos de água são os rios Ijuí, Ijuizinho, Conceição, Caxambu e Potiribu.

A localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí e dos poços utilizados neste estudo é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Localização da Bacia do Rio Ijuí e dos poços avaliados



2. GEOLOGIA, HIDROGEOLOGIA E HIDROQUÍMICA

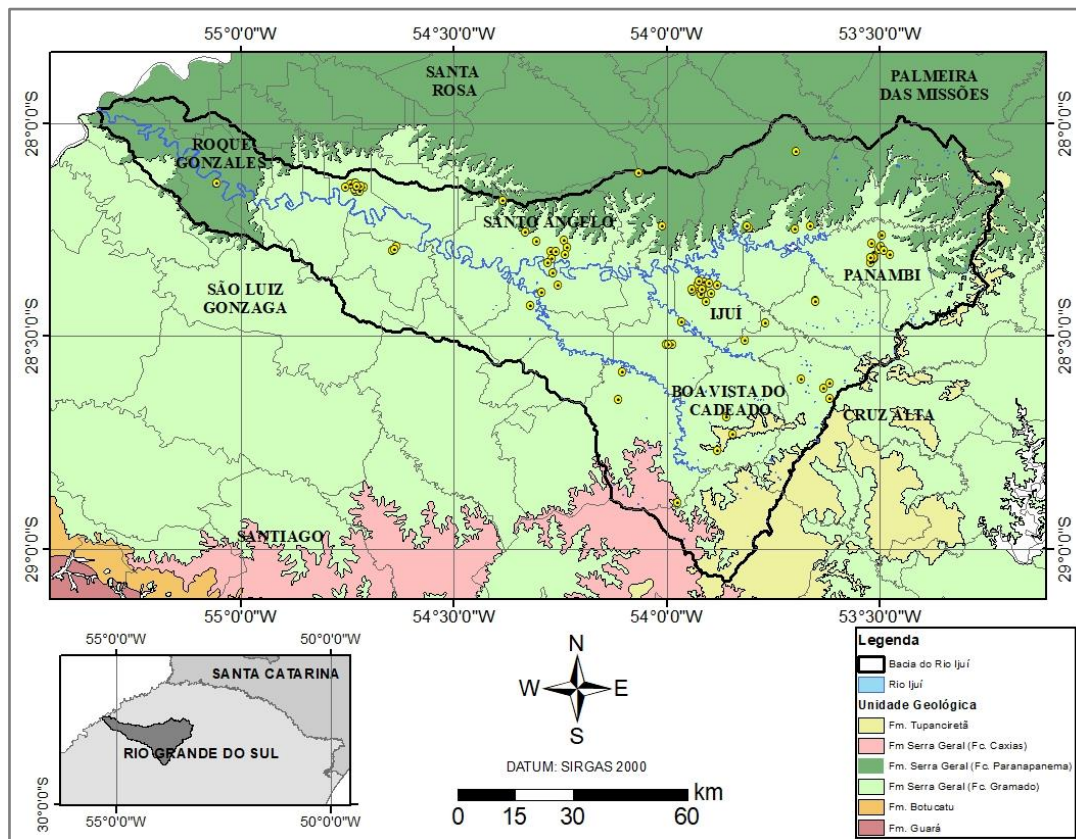
As unidades geológicas que constituem os aquíferos da área em estudo pertencem ao Grupo São Bento, compreendendo a Formação Botucatu (Jurássico), composta por arenitos eólicos, e a Formação Serra Geral (Cretáceo), representada por um espesso empilhamento de unidades vulcânicas. De forma restrita, ao Sul da área em foco e constituindo uma cobertura descontínua e delgada sobre a Formação Serra Geral, ocorrem rochas sedimentares (arenitos, arenitos conglomeráticos, conglomerados e siltitos) da Formação Tupanciretã (MENE-GOTTO, 1980), fracamente consolidadas, de idade Cenozóica e provável origem fluvial.

O arranjo estrutural regional da Bacia do Paraná é descrito por Zalán *et al.* (1990) no contexto de sua evolução geológica, destacando a presença de um pronunciado padrão de feições lineares que se cruzam, segmentadas em três grupos de acordo com suas orientações: (i) NO-SE; (ii) NE-SO; e (i) E-O. As direções mais importantes são NO-SE e NE-SO, podendo representar linhas tectônicas (lineamentos) sem movimentos, falhas simples ou zonas de falhas com centenas de quilômetros de comprimento e poucas dezenas de quilômetros de lar-

gura. Os movimentos ao longo de falhas possuem componentes horizontais e verticais, i. e., os blocos deslocam-se para cima e para baixo, num estilo estrutural típico de falhas verticais. Os rejeitos verticais são relativamente pequenos, atingindo, dezenas de metros ou, no máximo, poucas centenas de metros.

Neste estudo foram considerados somente os poços tubulares instalados em terrenos onde predominam as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, que é caracterizada na área pela ocorrência amplamente dominante de basaltos com baixo teor de TiO₂ (TiO₂ <1,4%), ocasionalmente intercalados com basaltos com alto-TiO₂ (TiO₂ >3,0%), ambos com afinidade toleítica (ROISENBERG & VIERO, 2000; WILDNER *et al.*, 2009). De forma particular à Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí, o pacote vulcânico é formado por duas fácies principais: Parapanema (136±2 Ma) e Gramado (132±1Ma). Na porção sul da Bacia do Rio Ijuí, unidades vulcânicas da Formação Serra Geral com composição ácida (dacitos a riolitos) ocorrem representando a chamada Fácies Caxias (132±0,5 Ma). Entretanto, não foram registrados poços tubulares nesta última unidade. O mapa geológico da região de estudo é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo



Fonte: Adaptado de CPRM (2005)

A Unidade Hidroestratigráfica Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) caracteriza-se pela capacidade de armazenamento e de circulação das águas subterrâneas através de fraturas, capacidade esta ampliada pelas zonas vesicular e brechada de topo dos derrames (FREITAS *et al.*, 2012). Esta unidade representa a condição de aquífero livre, podendo, localmente desenvolver condições de aquífero confinado (HAUSMAN, 1995). A condutividade hidráulica do SASG é muito variável e de complexa avaliação, principalmente em razão do meio ser normalmente heterogêneo e anisotrópico, visto que as condições de armazenamento dependem da densidade de fraturas.

A hidroquímica do SASG no Rio Grande do Sul é complexa e vem merecendo atenção em diversos estudos (NANNI *et al.*, 2009; REGINATO, *et al.*, 2013; CUNHA *et al.*, 2016; FREITAS *et al.*, 2016). Lisbôa (1996) reconheceu três unidades hidrogeológicas distintas no SASG do Rio Grande do Sul: (i) Abóbada Oeste Aplainada; (ii) Fachada Atlântica Dissecada; e (iii) Abóbada Central Densamente Dissecada. Como resultado, foram observadas águas de intemperismo das rochas vulcânicas com características bicarbonatadas cálcicas nos três compartimentos. Na Abóbada Oeste Aplainada, foi registrada uma fácies de intemperismo com águas bicarbonatadas magnesianas, interpretada como decorrente de um tempo de residência maior. Águas sódicas também foram observadas nos três compartimentos, sendo a origem atribuída à mistura de águas de intemperismo das rochas vulcânicas com águas ascendentes da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG), sotoposto ao SASG, aflora somente na zona externa à área de estudo, na forma da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, constituída por arenitos finos a médios. No topo, os arenitos eólicos intercalam-se de forma concordante com as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, dando origem a corpos lenticulares de arenitos interderrames (MACHADO, 2005).

3. MÉTODOS

O levantamento de poços tubulares analisados no presente estudo foi realizado a partir do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2018), considerando-se somente os poços instalados dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí. Este levantamento permitiu compor um banco de dados inicial contendo 565 poços tubulares.

A seleção dos poços utilizados nos tratamentos estatísticos privilegiou a existência de informações como localização georreferenciada, perfil geológico, dados hidrodinâmicos de ensaio de bombeamento e análises hidroquímicas. A partir destes critérios, foi possível organizar um novo conjunto de dados abrangendo 116 poços com dados hidrogeológicos completos e 71 poços com informações hidrogeoquímicas, que formam a malha amostral utilizada neste trabalho.

O tratamento dos dados foi inicialmente realizado por meio de

uma análise tectônica da área com base nos métodos utilizados nos trabalhos de Bettiolo (2006) e Nanni *et al.* (2009), com base em imagens de relevo sombreado produzidas pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), do *United States Geologic Survey* (USGS, 2018). A extração de estruturas geológicas, o tratamento e a interpretação geoestatística dos dados, foram desenvolvidos através dos softwares *ArcGIS*® 10.3 e *Rockworks*® 14, que permitiram a produção de mapas temáticos de densidade de lineamentos, diagramas de rosetas, bem como filtragens por azimute e comprimento. Os lineamentos foram classificados, de acordo com seu comprimento, em pequeno porte (< 2 km), médio porte (2-4 km) e grande porte (> 4 km), considerando-se que a média estatística de comprimento ficou em 3,8 km.

Já o tratamento estatístico dos dados hidrogeoquímicos obtidos junto ao SIAGAS (CPRM, 2018) foi realizado por meio do software *SPSS*®. A avaliação dos dados consistiu na aplicação de duas técnicas de tratamento estatístico de análise multivariada: (i) Análise Fatorial de Componentes Principais; e (ii) Análise de Agrupamentos.

A Análise Fatorial de Componentes Principais (AFCP) foi utilizada para separar as fácies hidrogeoquímicas do SASG, o que possibilitou transformar linearmente um conjunto de variáveis originais em um novo conjunto, de menor tamanho, contendo variáveis não correlacionadas, facilitando o manuseio e a compreensão do fenômeno, sem perda significativa de informação.

Por sua vez, a Análise de Agrupamentos foi aplicada para caracterizar várias técnicas numéricas, com o objetivo de classificar valores de uma matriz de dados em grupos discretos. Para este trabalho, foi selecionado o método de análise por agrupamentos hierárquicos, técnica mais adequada a estudos geológicos. O método consiste em obter uma matriz simétrica de similaridade a partir da matriz original, gerada pela AFCP. Tal análise procura detectar pares de casos com mais alta similaridade ou mais baixa distância (LANDIM, 2010).

Para auxiliar na interpretação dos dados foi elaborado um dendrograma, a forma mais usual de representação dos resultados, que permite a compartimentação da série de dados em agrupamentos e, conseqüentemente, a separação dos distintos grupos hidrogeoquímicos.

4. HIDROGEOQUÍMICA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A interpretação dos resultados de tratamento estatístico de dados hidrogeoquímicos foi realizada através de correlações em diagramas binários e o cruzamento com informações relativas aos lineamentos tectônicos presentes na área de estudo, sobrepondo-se os poços das diferentes fácies hidrogeoquímicas aos mapas de densidade de estruturas. Os resultados da AFCP permitiram o reconhecimento de três fatores distintos, conforme apresentado na Tabela 1.

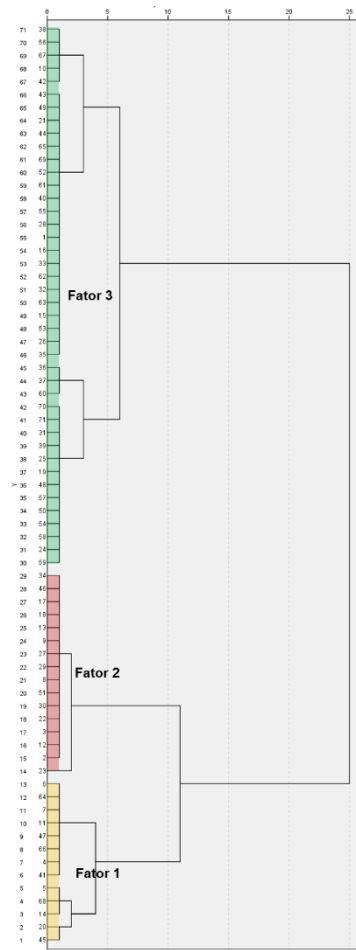
Tabela 1 - Parâmetros analisados na AFCP e fatores reconhecidos.

Parâmetros	Fatores		
	1	2	3
Alcalinidade	0,937	0,179	-,198
Na	0,829	-,288	
pH	0,799	-,203	-,189
CO ₃	0,719	-,425	
F	0,665	-,109	,171
Ca	-,230	0,796	
Cl		0,671	
Mg	-0,352	0,665	
HCO ₃	0,553	0,640	-,233
SO ₄	,154	,110	0,907
K	-,212		0,893

O Fator 1 agrupou alcalinidade, Na⁺, pH, CO₃²⁻ e F⁻, típicos de águas bicarbonatadas sódicas, demonstrando que a proveniência do flúor pode estar relacionada ao aquífero no qual estas águas estão armazenadas. Já o Fator 2 envolveu os parâmetros Ca⁺², Cl⁻, Mg⁺² e HCO₃⁻, característicos de águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas. Por fim, o Fator 3 incluiu somente SO₄²⁻ e K⁺, correspondendo a águas predominantemente cálcio-magnesianas.

A fim de facilitar o entendimento dos resultados da análise fatorial, foi elaborada uma análise de agrupamento, cuja representação ocorre através do dendrograma (Figura 3), permitindo o reconhecimento de três grupos hidrogeoquímicos distintos. Esta segmentação propiciou melhor interpretação às características químicas e conseqüente separação de fácies das águas subterrâneas da Bacia do Rio Ijuí.

Figura 3 - Dendrograma representando os distintos grupos hidrogeoquímicos



O Fator 1 resultou no agrupamento de 13 amostras e corresponde à base do dendrograma. Por sua vez, o Fator 2 contemplou 16 poços e agrupou a porção central, enquanto que o Fator 3 reuniu 42 amostras e está relacionado à parte superior do gráfico.

O Fator 1 está correlacionado de forma positiva ao grupo de águas sódicas, sendo ele portanto denominado “Fácies Na”. O Fator 2 está relacionado positivamente ao agrupamento de águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas e, sendo assim, foi renomeado como “Fácies CaMg”. Por fim, o Fator 3 passou a ser reconhecido como “Fácies Águas Mistas”, haja vista sua relação direta com águas cujas assinaturas hidrogeoquímicas

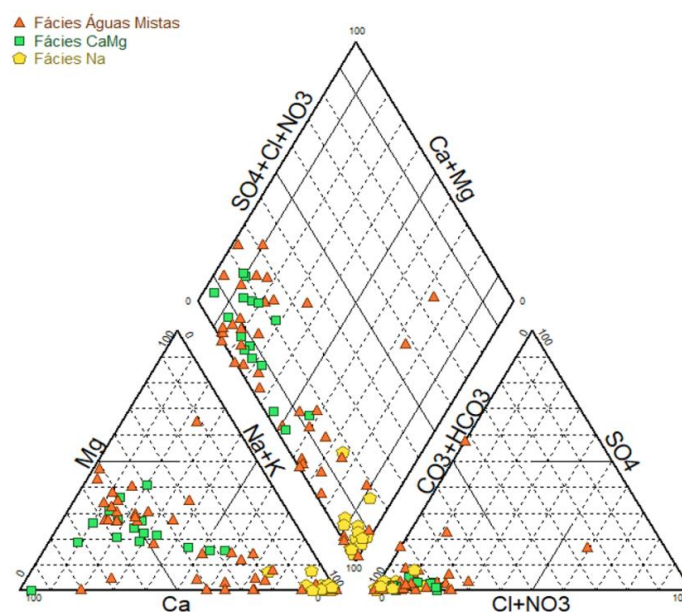
variam entre bicarbonatas sódicas e cálcico-magnesianas.

Posteriormente à separação dos grupos, as amostras foram plotadas no Diagrama de Piper (Fig. 4), demonstrando que as águas da Fácies Águas Mistas distribuem-se em 57% dos poços como bicarbonatadas cálcico-magnesianas, 38% como águas bicarbonatadas sódicas e apenas 5% como águas sulfatadas. Já a Fácies CaMg possui 87,5% de suas águas classificadas como bicarbonatadas cálcico-magnesianas, enquanto que somente 12,5% são classificadas como bicarbonatadas sódicas. Por sua vez, a Fácies Na apresenta 100% de seus poços classificados como águas bicarbonatadas sódicas.

Tabela 2 - Classificação das águas de acordo com o Diagrama de Piper

Classificação no Diagrama de Piper	Fácies Na		Fácies CaMg		Fácies Águas Mistas	
	Poços	%	Poços	%	Poços	%
Bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas	0	0%	14	87,5%	24	57,1%
Cloretadas e/ou sulfatadas sódicas	0	0%	0	0%	2	4,8%
Bicarbonatadas sódicas	13	100%	2	12,5%	16	38,1%

Figura 4 - Classificação das amostras avaliadas no Diagrama de Piper



A integração entre a análise estatística e a classificação hidrogeoquímica demonstra que nas águas agrupadas como Fácies Na e classificadas como bicarbonatadas sódicas, os íons predominantes são o sódio e o bicarbonato. Correspondem às águas alcalinas, de maior salinidade, com concentrações baixas de cálcio e magnésio. Os teores de flúor e sulfato são mais altos comparados às águas das demais fácies, assim como o total de sólidos dissolvidos (STD).

Por sua vez, as amostras relativas à Fácies CaMg apresentam as mais altas concentrações de cálcio e magnésio, bem como altos valores de bicarbonatos, sendo por este motivo classificadas como bicarbonatadas cálcico-magnesianas. As concentrações de cloretos são superiores em relação às demais fácies e os dados de pH indicam valores próximos à neutralidade. Já os teores médios de sódio são baixos, assim como as concentrações de sulfato e flúor.

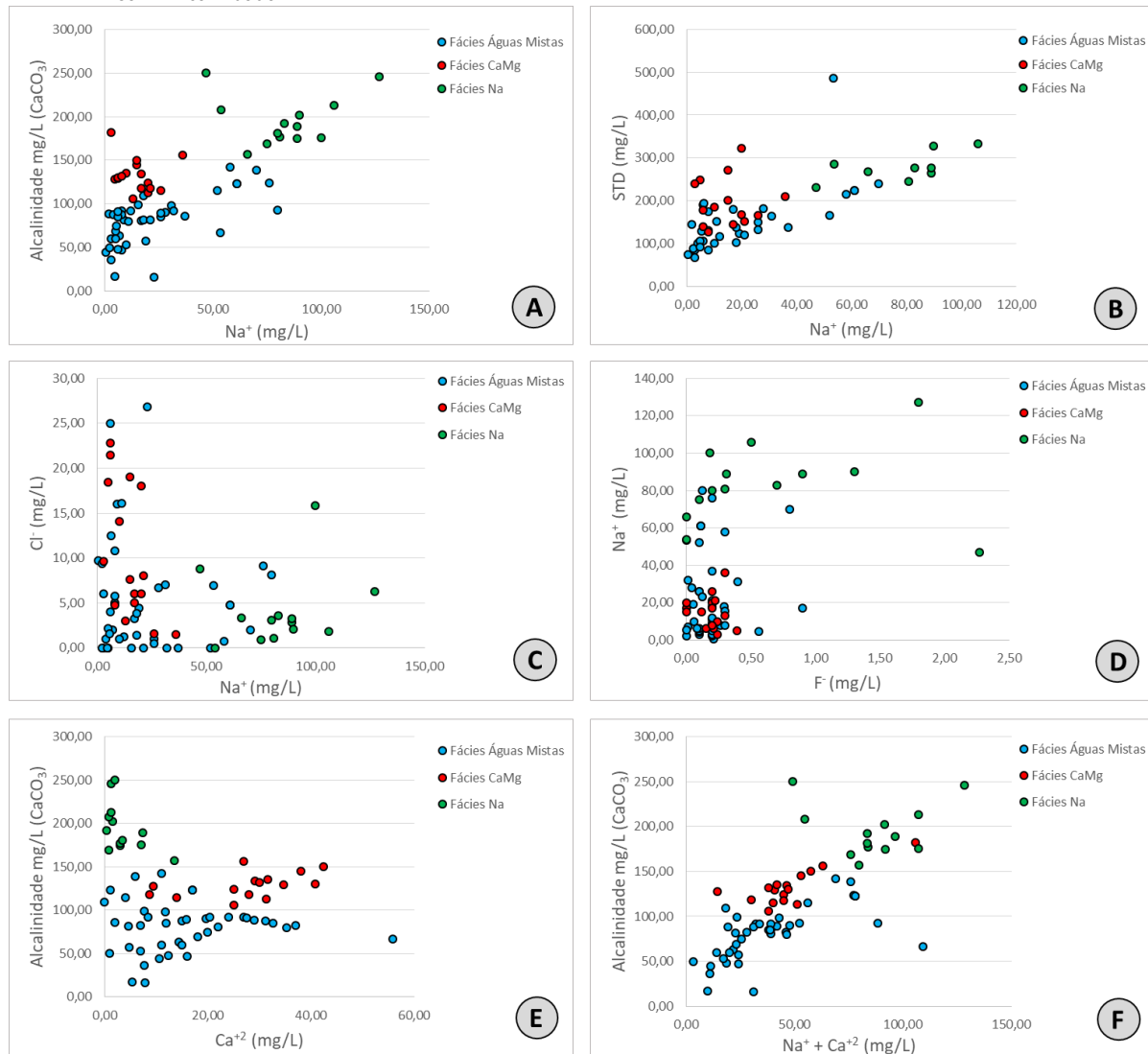
Por fim, a Fácies Águas Mistas agrupa águas com concentrações de sódio, cálcio, magnésio e pH mais próximas à composição da Fácies CaMg. Em comparação às demais fácies, os bicarbonatos e a alcalinidade têm valores médios inferiores, enquanto o potássio apresenta concentrações ligeiramente superiores.

A alta concentração de sódio nas águas do SASG pode ser considerada anômala, já que este elemento não está presente na composição dos minerais solúveis que constituem o preenchimento de fraturas e amígdalas das rochas básicas da Formação Serra Geral. As Figuras 5(A) e 5(B) evidenciam correlações positivas entre alcalinidade e sódio e entre sódio e STD, respectivamente, revelando que a ocorrência de águas sódicas em poços instalados no SASG é resultado da influência direta de aquíferos sotopostos permocarboníferos nos quais estes dois parâmetros (sódio e STD) são salientes e relacionam-se a rochas de ambientes lagunares e marinhos da Bacia do Paraná, como as formações Irati, Estrada Nova e Rio Bonito (TEIXEIRA & VIERO, 2017). Sendo aquíferos confinados profundos, as águas ascendem através de descontinuidades rúpteis, devido às altas pressões hidrostáticas, o que corrobora o estudo de QUAGGIO *et al.* (2018), cujos resultados apontam a relação entre os altos teores de sódio, flúor, STD e alcalinidade com a evolução hidrogeoquímica das águas de recarga e a interação com águas subterrâneas de aquíferos mais profundos. Além disso, alcalinidade e STD elevados também sugerem águas com maior tempo de residência nesta fácies. Por outro lado, a ausência de correlação entre o sódio e o cloro na Fácies Na pode indicar que estes íons não possuem as mesmas fontes (Figura 5C).

O flúor possui concentrações médias mais elevadas na Fácies Na, com detecção máxima de 2,27 mg/L. A correlação positiva entre o flúor e o sódio somente ocorre nesta Fácies, conforme ilustra a Figura 5 (D), o que é um indicativo de que o flúor está relacionado com aquíferos sotopostos mais profundos como da Formação Irati (KERN *et al.*, 2008) ou mesmo com o Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano, que constitui o Embasamento Cristalino (ROISENBERG *et al.*, 2003).

As águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas são provavelmente afetadas pela dissolução de carbonatos presentes em fraturas e amígdalas da Formação Serra Geral, o que é confirmado pela correlação positiva entre cálcio e a alcalinidade nas Fácies CaMg e de Águas Mistas e não se observa na Fácies Na (Figura 5E). Entretanto, a elevada correlação entre a alcalinidade e o somatório dos íons cálcio e sódio sugere que o cálcio também pode provir da dissolução de carbonatos de aquíferos sotopostos ao SASG, tal como ocorre com o sódio Figura 5 (F).

Figura 5 - Correlações bidimensionais. (A) Na⁺ x Alcalinidade; (B) Na⁺ x STD; (C) Na⁺ x Cl⁻; (D) F x Na⁺; (E) Ca²⁺ x Alcalinidade; (F) Na⁺ + Ca²⁺ x Alcalinidade



5. RELAÇÕES ENTRE A HIDROGEOQUÍMICA E CONTEXTO ESTRUTURAL

O tratamento estatístico dos lineamentos tectônicos (densidade de fraturas e direção) e os tipos hidrogeoquímicos de águas subterrâneas na Bacia do Rio Ijuí, permitiram extrair números que sugerem relações de controle entre os parâmetros.

Fica evidente que as águas da Fácies Na estão associadas a zonas com densidade total elevada de lineamentos, que de-

vem se comportar como fraturas mais profundas que atingem aquíferos permocarboníferos, ou mesmo aquíferos granito-gnáissicos do embasamento cristalino. Por outro lado, a Fácies CaMg é preponderantemente associada com a densidade de fraturamentos média, além do fato de que tais fraturas também possam atingir os aquíferos permocarboníferos. Por fim, a Fácies Águas Mistas reflete misturas de águas de diferentes aquíferos com as águas do SASG. Na Tabela 4 é possível estabelecer relações entre densidade de lineamentos nas diferentes direções e fácies hidrogeoquímicas identificadas.

Tabela 3 - Relação entre a densidade de lineamentos e as fácies hidrogeoquímicas.

Densidade Total de Lineamentos				
Fácies	Poços	Baixa	Média	Alta
Águas Mistas	n°	1	18	23
	%	2,4	42,9	54,8
CaMg	n°	0	10	6
	%	0,0	62,5	37,5
Na	n°	0	2	11
	%	0,0	15,4	84,6

Figura 6 - Distribuição espacial dos poços das diferentes fácies hidrogeoquímicas em relação à densidade total de lineamentos

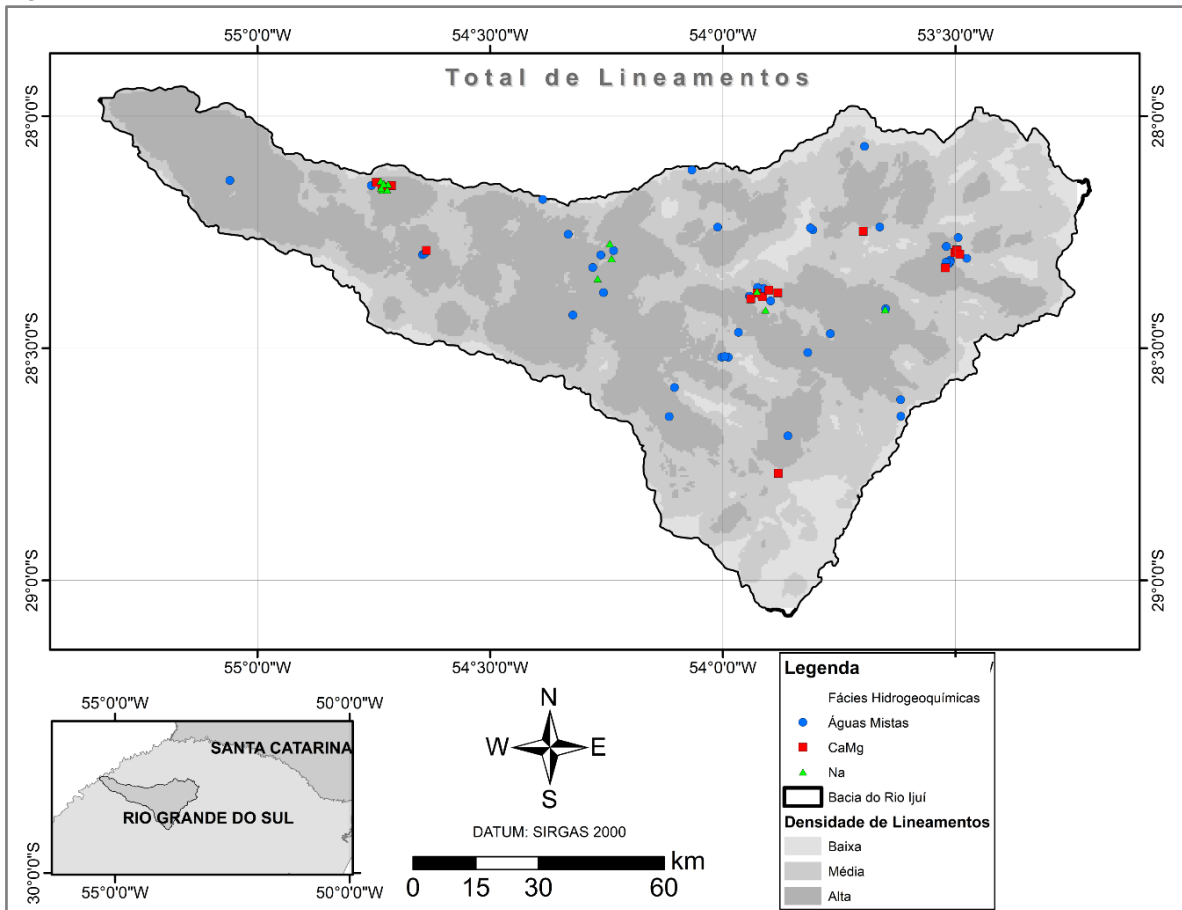


Tabela 4 - Relação entre a densidade de lineamentos nas direções preferenciais e as fácies hidrogeoquímicas identificadas

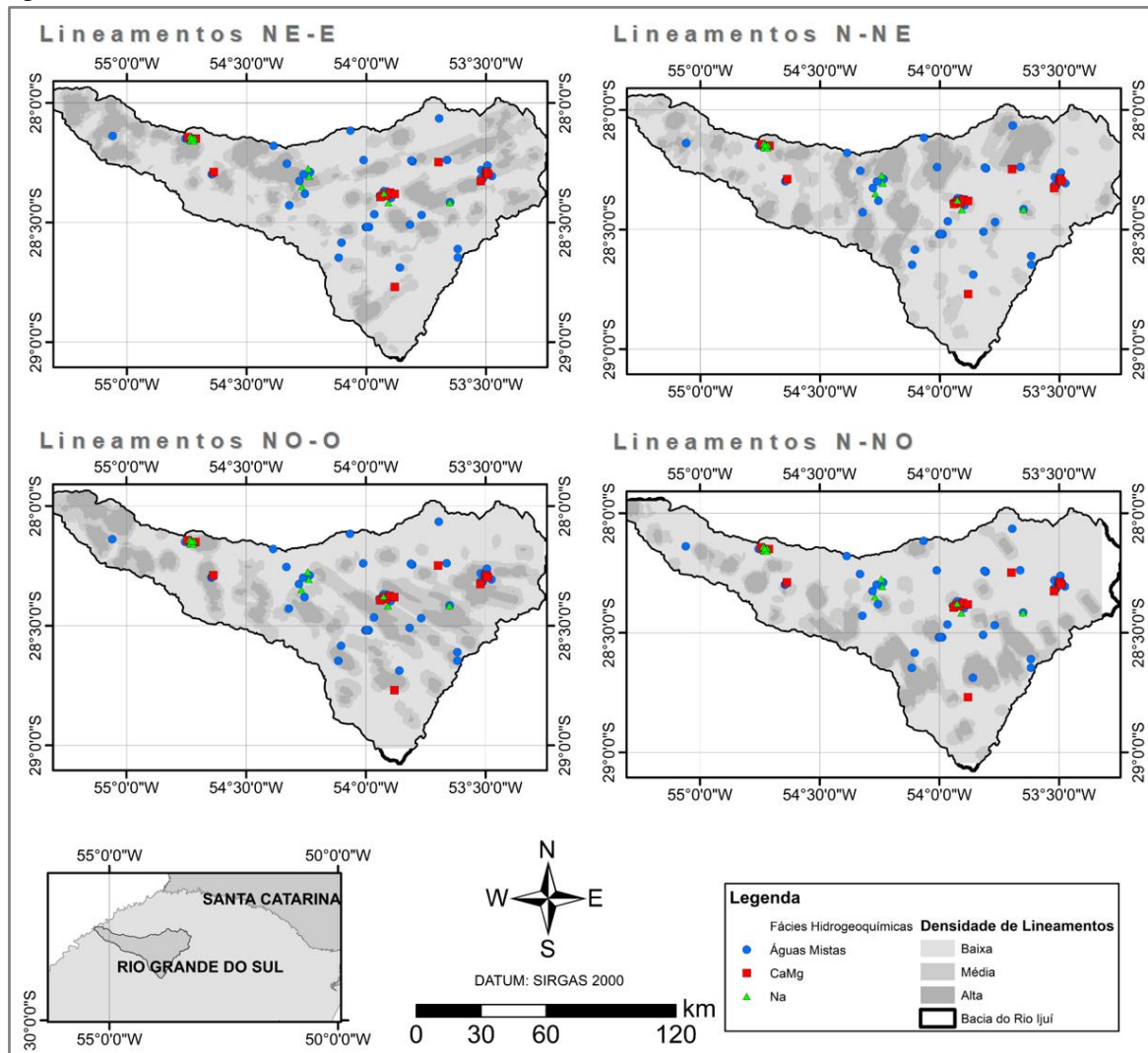
Direção	Densidade	Fácies Águas Mistas		Fácies CaMg		Fácies Na	
		Nº Poços	%	Nº Poços	%	Nº Poços	%
NE-E	Baixa	10	23,8	4	25,0	3	23,1
	Média	15	35,7	3	18,8	1	7,7
	Alta	17	40,5	9	56,2	9	69,2
N-NE	Baixa	14	33,3	5	31,2	2	15,4
	Média	9	21,5	6	37,6	6	46,1
	Alta	19	45,2	5	31,2	5	38,5
NO-O	Baixa	13	30,9	3	18,8	3	23,1
	Média	7	16,7	2	12,5	1	7,7
	Alta	22	52,4	11	68,7	9	69,2
N-NO	Baixa	25	59,5	11	68,7	11	84,6
	Média	9	21,5	4	25,0	1	7,7
	Alta	8	19,0	1	6,3	1	7,7

A Figura 7 ilustra a distribuição das fácies hidrogeoquímicas em relação às direções preferenciais dos lineamentos estruturais.

Quanto à distribuição das fácies hidrogeoquímicas em relação às direções preferenciais dos lineamentos geológicos, observou-se que todas as fácies possuem correlação positiva com zonas de alta densidade de estruturas nas direções NE-E e NO-O. Neste aspecto, salienta-se que estas direções estão associadas com os poços mais produtivos na Região do Alto Uruguai, conforme Cunha *et al.* (2016).

A direção N-NE demonstrou influência limitada na distribuição das fácies hidrogeoquímicas, haja vista que as correlações ocorrem predominantemente com áreas de densidade de lineamentos média. Por sua vez, é possível inferir que as estruturas na direção N-NO não apresentam relações efetivas com a distribuição das fácies hidrogeoquímicas na região de estudo, uma vez que os poços de ambas as fácies predominam em zonas de baixa densidade de lineamentos nesta direção.

Figura 7 - Distribuição espacial dos poços das diferentes fácies hidrogeoquímicas em relação às direções preferenciais dos lineamentos



6. CONCLUSÕES

A caracterização hidrogeoquímica do SASG na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí permitiu reconhecer três fácies distintas, cujas assinaturas hidroquímicas podem ser relacionadas à origem e à mistura de águas de diferentes aquíferos, sendo elas: Fácies Águas Mistas (bicarbonatas sódicas e cálcio-magnesianas), Fácies CaMg (bicarbonatas cálcio-magnesianas) e Fácies Na (bicarbonatas sódicas). Por sua vez, a avaliação hidrogeológica da área indica a predominância de estruturas nas direções NE-E, N-NE, NO-O e N-NO, em ordem decrescente de frequência.

Os resultados da integração destas informações demonstram correlações positivas entre os poços da Fácies Na e regiões com alta densidade de lineamentos geológicos, sugerindo que a hidroquímica destas águas é influenciada diretamente pelos aquíferos permocarboníferos ou granito-gnáissicos do embasamento cristalino, cujas litologias são interceptadas por fraturas profundas que as interconectam com as rochas do SASG. Esta característica tem menor influência na assinatura química das águas da Fácies CaMg, predominantemente relacionadas à recarga meteórica, enquanto que a composição da Fácies Águas Mistas evidencia uma mistura das águas de outros aquíferos com as águas do SASG.

Por fim, a avaliação do controle da tectônica rúptil na hidroquímica do SASG na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí sugere que as direções NE-E e NO-O são predominantes na influência das zonas de alta densidade de estruturas, conferindo às demais direções, papel pouco significativo.

REFERÊNCIAS

BETIOLLO, L. M. *Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidrogeoquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil*. 117 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Escala 1:750.000. Área: Rio Grande do Sul. Brasil, 2005.

CPRM (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS). *Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, SIAGAS*. Banco de dados dos poços cadastrados. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br>>. Acesso em: 06/02/2018.

CUNHA, G. G.; ROISENBERG, A.; PULGATI, F. H.; FREITAS, M. A. 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)*, v. 43, p. 55-67, 2016. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78192>

- FREITAS, M. A.; BINOTTO, R. B.; NANNI, A. S.; BORTOLI, C. R. Avaliação do potencial hidrogeológico, vulnerabilidade intrínseca e hidroquímica do sistema Aquífero Serra Geral no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Associação Brasileira de Recursos Hídricos (A B R H)*, v. 17, p. 31-41, 2012. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n2.p31-41>
- FREITAS, M. A.; ROISENBERG, A.; ANDRIOTTI, J. L. S. Análise exploratória de dados da condutividade elétrica nas águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Águas Subterrâneas*, v. 30, p. 1-17, 2016. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i1.28518>
- HAUSMAN, A. Províncias hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*. Série mapas, mapa nº 2, p. 1-127, 1995.
- KERN, M.L.; VIEIRO, A.P.; MACHADO, G. 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, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1067-1>
- LANDIM, P. M. B. *Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados*. Rio Claro, SP: UNESP, 208p. 2010.
- LISBÔA, N. A. *Fáceis, estratificações hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos, em unidades hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral, na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul*. 136 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.
- MACHADO, J. L. F. *Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul*. 2005. 237 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Geologia, Área de concentração em Geologia Sedimentar, Unisinos, São Leopoldo, RS.
- MENEGOTTO, E. Análise Textural da Formação Tupanciretã. *Ciência e Natureza*, v. 2, p. 91-103, 1980. <https://doi.org/10.5902/2179460X24864>
- NANNI, A. S.; ROISENBERG, A.; MARIMON, M. P. C.; VIERO, A. P. 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*, v. 58, p. 1247-1255, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1624-2>
- QUAGGIO, C.S.; GASTMANS, D.; KIRCHHEIM, R.; BATISTA, L.V. Variações na composição das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral em território brasileiro e sua relação com anomalias hidrogeoquímicas. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 32, p.283-294, 2018. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i3.29085>
- REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; SCHNEIDER, V. E. Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 27, n. 1, p.65-78, 2013. <https://doi.org/10.14295/ras.v27i1.27061>
- ROISENBERG, A.; VIERO, A. P. O vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, RS: CIGO/UFRGS, p. 355-374, 2000. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n4.p137-147>
- ROISENBERG, C.; VIERO, A. P.; ROISENBERG, A.; SCHWARZBACH, M.S.; MORANTE, I. C. Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas subterrâneas de Porto Alegre, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 8, n.4, p. 137-147, 2003.
- TEIXEIRA, G. V.; VIERO, A. P. Hydrogeochemical evolution of mesozoic aquifers in the southern Paraná basin in western Rio Grande do Sul State, Brazil. *Águas Subterrâneas*, v. 31, p. 36-51, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28577>
- USGS (United States Geological Survey). *Shuttle Radar Topography Mission*. Washington, NASA-USGS. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 04/03/2018.
- WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; LOPES, R. C. *Litofaciologia do Vulcanismo Serra Geral e Planície Costeira do Rio Grande do Sul*, 2009. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Material para Treinamento Técnico).
- ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I.S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; SOBRENOME NETO, E. V. S.; CERQUICIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J. (eds.) *Interior cratonic basins*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir 51, p. 681-708, 1990.