



Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre localizado no manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul

<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.903>

**Pedro Antonio Roehé Reginato¹; Siclério Ahlert²;
Karoline Chiaradia Gilioli³; Gisele Cemin⁴**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Porto Alegre,

^{2,3,4} Universidade de Caxias do Sul (UCS) - Caxias do Sul

e-mails: pedro.reginato@ufrgs.br, siclerio@yahoo.com.br,

e-mails: karolgilioli@hotmail.com, gcemin3@ucs.br

RESUMO

Este artigo apresenta a caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre localizado no manto de alteração das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Esse aquífero é condicionado pelo solo, topografia, litologia e clima, sendo caracterizado por uma espessura saturada menor que 1,7 m, níveis estáticos entre 0 e 1 m e vazões baixas ($<0,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Essas águas são do tipo bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, apresentam baixa alcalinidade e condutividade elétrica, menores concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio e cloretos e, maior concentração de ferro e manganês. Adicionalmente, essas águas têm maior concentração de nitratos (média acima de 10 mg/L) e presença de coliformes totais. Essas características evidenciam a existência de uma rápida circulação entre as zonas de recarga e descarga, neste aquífero.

Palavras-chave: aquífero livre, hidrogeologia, hidroquímica.

Hydrogeological and hydrochemical characterization of unconfined aquifer located in the alteration mantle of the Serra Geral Formation, in the Taquari-Antas river basin, northeast of Rio Grande do Sul State

ABSTRACT

This paper presents the hydrogeological and hydrochemical characterization of the unconfined aquifer located in the alteration mantle in the volcanic rocks from Serra Geral Formation, in the northeast region of Rio Grande do Sul State. This aquifer is conditioned by the soil, topography, lithology and climate, being characterized by a saturated layer thinner than 1,7 m, static levels between 0 and 1 m and low flow ($<0,5 \text{ m}^3/\text{h}$). These waters are of calcium or magnesium bicarbonate type, and low alkalinity and electrical conductivity, low calcium, magnesium, sodium, potassium and chloride concentrations, and high iron and manganese concentrations. Additionally, these waters have high concentration of nitrates (mean above 10 mg/L) and the presence of total coliforms. These characteristics evidence a quick circulation between the recharging and discharge zones in the aquifer.

Keywords: unconfined aquifer, hydrogeology, hydrochemical.

1. INTRODUÇÃO

Na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul há ocorrência de dois aquíferos principais: o livre ou freático e o fraturado (Reginato, 2003). O primeiro aquífero tem menor capacidade de produção (volumes reduzidos de água), sendo mais utilizado pela população rural, que capta suas águas através de poços escavados (tipo cacimba) ou nascentes naturais. O segundo aquífero possui maior capacidade de produção e água de melhor qualidade, sendo captado por meio de poços tubulares profundos. É utilizado para abastecimento da população urbana, bem como das comunidades rurais (poços comunitários), na maioria dos municípios.

O aquífero livre ou freático está localizado no manto de alteração existente sobre as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e possui como principais condicionantes os seguintes fatores: solo (tipo e espessura), topografia, litologia (tipo, composição e estruturação da rocha) e clima (Reginato e Strieder, 2005). Em função dos diferentes tipos de condicionantes, o aquífero livre, embora poroso, tem um comportamento heterogêneo, dimensões e continuidade lateral reduzidas (poucos metros) e circulação localizada.

O aquífero fraturado está localizado nas rochas vulcânicas, sendo seu principal condicionante as estruturas tectônicas. Os condicionantes secundários consistem nas estruturas de resfriamento das rochas vulcânicas (zonas de brechas vulcânicas, vesiculares a amigdalóides, disjunções e fraturas), o relevo e o solo desenvolvido sobre as rochas vulcânicas (tipo e espessura). Esse aquífero é caracterizado por uma forte anisotropia responsável por vazões (em média, inferiores 10 m³/h) e capacidades específicas (entre 0,106 e 1,166 m³/h/m) variáveis (Reginato, 2003).

As águas subterrâneas que circulam por esses aquíferos apresentam características hidroquímicas e qualidades variadas (Reginato et al., 2010). Essa diferenciação depende do tipo de aquífero, da recarga, da vulnerabilidade natural à contaminação, do grau de confinamento e do uso e ocupação do solo (na área de recarga e junto ao ponto de captação). Em geral, as águas subterrâneas que circulam no aquífero livre apresentam padrões hidroquímicos que as diferenciam das águas subterrâneas que circulam no aquífero fraturado, sendo caracterizadas, por exemplo, por uma menor concentração de elementos químicos e uma mais baixa condutividade elétrica.

No mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul (Machado e Freitas, 2005) é representado somente o aquífero fraturado, denominado de Sistema Aquífero Serra Geral II. Esse sistema está associado aos derrames de rochas vulcânicas da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral e apresenta as seguintes características: capacidade específica inferior a 0,5 m³/h/m (podendo chegar a 2 m³/h/m em áreas com maior grau de fraturamento ou com arenitos da Formação Botucatu, na base) e baixa concentração de sólidos totais dissolvidos (inferiores a 250 mg/L). Nas regiões onde há menor espessura de rochas vulcânicas as águas subterrâneas podem apresentar maiores valores de pH, condutividade elétrica e sódio.

Neste trabalho é apresentada a caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre que está localizado no manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. O estudo desse aquífero é justificado, pois as águas subterrâneas que circulam nesse aquífero, possuem características hidroquímicas diferenciadas e problemas de qualidade (origem natural e antrópica), que afetam os padrões de potabilidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo o setor médio e superior da bacia hidrográfica Taquari-Antas (Figura 1).

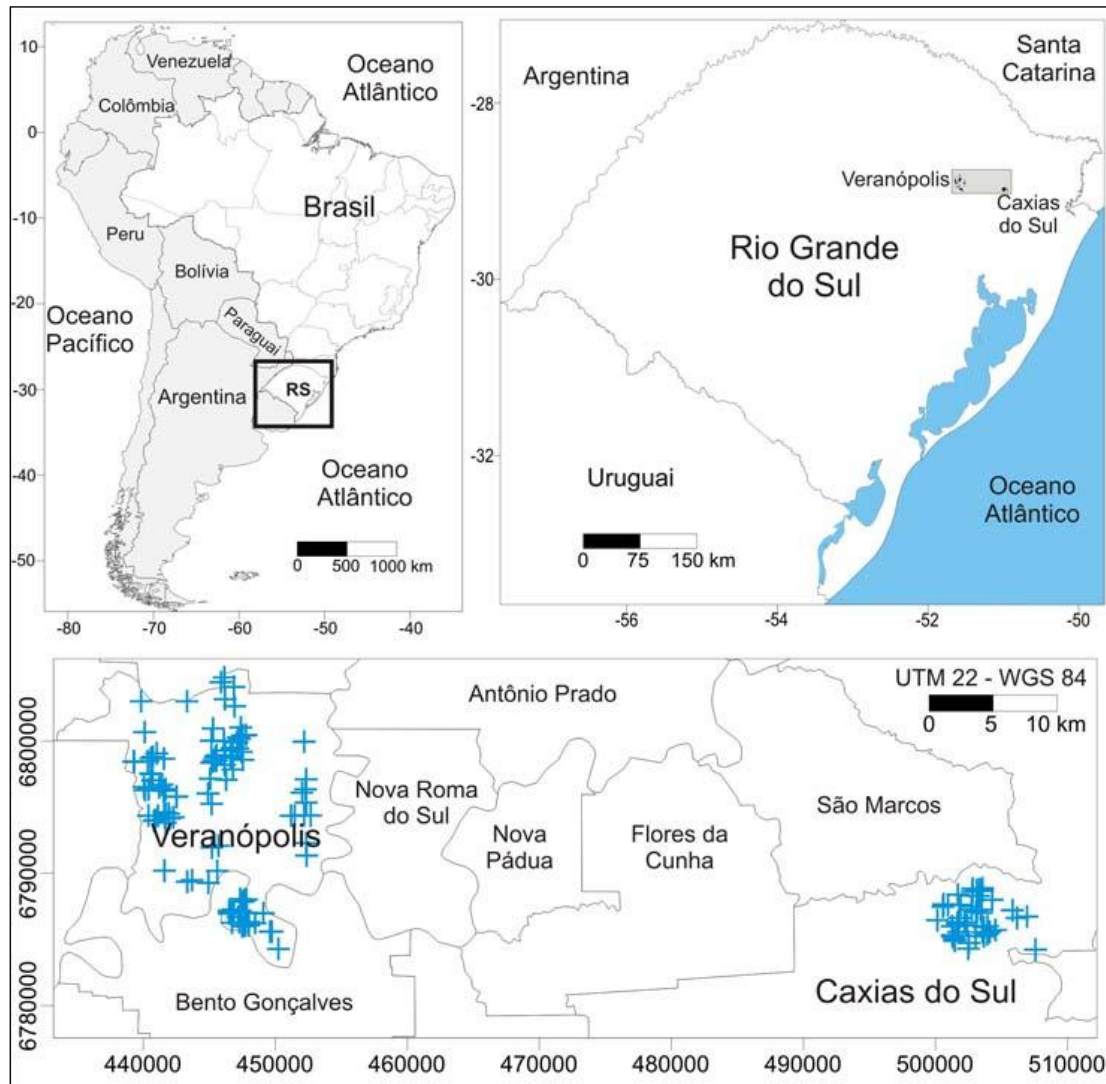


Figura 1. Localização da área de estudo.

A caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre foi realizada por meio do desenvolvimento das seguintes etapas: inventário e cadastramento de pontos de captação de água subterrânea; levantamento e interpretação de dados geológicos e hidrogeológicos; coleta, análise e interpretação de amostras de água subterrânea.

Essa caracterização foi detalhada em duas regiões (Figura 1), sendo uma no município de Veranópolis e outra, em Caxias do Sul. Essas regiões apresentam diferentes tipos de rochas vulcânicas (ácidas e básicas), variações do relevo (grau de dissecação) e diferentes tipos de solos.

A etapa de inventário e cadastramento de pontos de captação foi realizada, por meio de levantamento de informações disponíveis junto ao SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), às Companhias de Abastecimento e às prefeituras municipais (secretarias de agricultura e da saúde). Com isso, foi possível identificar as regiões que eram abastecidas por poços tubulares profundos (captam água dos aquíferos fraturados) e as que eram abastecidas por poços escavados (tipo cacimba) ou nascentes naturais (captam água do aquífero livre).

As etapas de levantamento e interpretação de dados geológicos e hidrogeológicos foram realizadas por meio da obtenção de informações disponíveis sobre a região, como mapas geológicos e pedológicos, cartas topográficas e relatórios.

Foram realizados trabalhos de campo para identificação, localização e caracterização dos diferentes pontos de captação de água subterrânea, na área de estudo. Sempre que possível, foram obtidas, informações sobre o nível estático, espessura da zona saturada e vazão dos poços. Ao todo foram cadastrados 78 pontos que captam água do aquífero livre e 88 pontos que captam água do aquífero fraturado. Para a caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre foram selecionados e analisados 30 pontos (Tabela 1 e Figuras 2 e 3).

Foram realizados levantamentos geológicos (litologias, estruturas e estratigrafia dos litotipos presentes na área de estudo) e pedológicos (tipos, espessura e características dos solos). Todos os dados foram interpretados com o objetivo de caracterizar o aquífero livre e avaliar a forma de circulação da água subterrânea.

A etapa de coleta, análise e interpretação de amostras de água subterrânea foi feita em alguns pontos de captação distribuídos ao longo das regiões de Veranópolis e Caxias do Sul. No município de Veranópolis foram realizadas análises de pH, condutividade elétrica, ferro, manganês, nitrato, fluoretos e coliformes totais em 22 pontos (Tabela 1 e Figura 2). Em 4 pontos foi realizada a análise de parâmetros como alcalinidade, cloreto, sulfato, cálcio, magnésio, sódio e potássio. Na região de Caxias do Sul foram analisados, os parâmetros pH e condutividade elétrica em 18 pontos de captação. Em 8 pontos (Tabela 1 e Figura 3) foram feitas análises dos seguintes parâmetros: ferro, manganês, nitrato, fluoretos, coliformes totais, alcalinidade, cloreto, sulfato, cálcio, magnésio, sódio e potássio.

A coleta das amostras de água subterrânea foi feita de duas formas principais. Quando o ponto de captação não possuía equipamento de bombeamento a coleta foi feita com o emprego de Bailer. Já, quando o ponto de captação possuía sistema de bombeamento, a bomba era acionada e mantida ligada, por pelo menos 10 minutos. Após esse tempo, foi feita a coleta das amostras de água, na saída da tubulação ligada a bomba. Para cada ponto foram coletadas três amostras. Duas, foram acondicionadas em frascos plásticos (um contendo HNO₃) e enviadas para análise dos parâmetros ferro, manganês, nitrato, fluoretos, alcalinidade, cloreto, sulfato, cálcio, magnésio, sódio e potássio. Uma amostra foi acondicionada em frasco do tipo borossilicato esterelizado e foi utilizada na avaliação dos coliformes totais. Todas as amostras foram acondicionadas em caixas de isopor, mantidas refrigeradas e transportadas, no mesmo dia da coleta, para os laboratórios onde foram feitas as análises.

As análises químicas e bacteriológicas foram realizadas na Central Analítica e Laboratório de Saneamento (LASAN) da Universidade de Caxias do Sul (Tabela 2). As análises de pH e condutividade foram realizadas, diretamente no campo, por meio do emprego de um medidor multiparâmetros HQ40D com sonda para CE (robusta, eletrodo de grafite e cabo de 5 m) e sonda para pH (robusta, membrana de vidro e cabo de 5 m).

A interpretação dos dados das análises de água subterrânea do aquífero livre, foi realizada por meio da utilização do programa Qualigraf (Mobus, 2002), sendo gerados diferentes diagramas (Piper e Stiff), para classificação e separação dos diferentes tipos de água subterrânea que circulam no aquífero livre.

Foi realizada uma comparação das características químicas das águas do aquífero livre com as águas do aquífero fraturado, visando com isso identificar diferenças ou semelhanças no padrão hidroquímico dessas águas. Para isso, foram utilizados relatórios disponíveis de análises físico-químicas e bacteriológicas de águas subterrâneas, provenientes de poços tubulares profundos que captam água dos aquíferos fraturados.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C.; CEMIN, G. 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. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 143-162, 2012. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.903>)

Tabela 1. Pontos selecionados e analisados para a caracterização hidrogeológica.

Código	Latitude	Longitude	Captação	Aquífero	Região
PALV6	-28,977579	-51,604423	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV23	-29,062436	-51,516313	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV60	-29,023515	-51,565472	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV2	-28,978688	-51,59243	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV18	-28,960023	-51,614419	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV22	-28,940706	-51,62276	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV40	-29,044026	-51,547548	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV31	-29,041909	-51,5465	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV54	-29,0688	-51,511219	Poço Escavado	Livre	Veranópolis
PALV3	-28,979406	-51,59539	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV4	-28,976199	-51,596121	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV13	-28,956292	-51,6012	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV26	-28,935028	-51,60513	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV24	-28,940277	-51,612055	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV29	-28,938239	-51,609601	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV38	-29,043443	-51,546631	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV45	-29,050676	-51,5414	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV39	-29,044047	-51,535573	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV56	-29,035681	-51,537717	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV49	-29,057006	-51,517704	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV53	-29,044476	-51,522859	Nascente	Livre	Veranópolis
PALV59	-29,01541	-51,558597	Nascente	Livre	Veranópolis
PAFV13	-28,899408	-51,581361	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV14	-28,899222	-51,617083	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV15	-28,920344	-51,614408	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV16	-28,927353	-51,490556	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV17	-28,977906	-51,498142	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV19	-28,925256	-51,540664	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV34	-28,926939	-51,553097	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV47	-29,005069	-51,489014	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PAFV49	-28,999286	-51,562578	Poço Tubular	Faturado	Veranópolis
PE1 AL	-29,039329	-50,993786	Nascente	Livre	Caxias do Sul
PE2 AL	-29,051423	-50,982692	Poço Escavado	Livre	Caxias do Sul
PE3 AL	-29,032785	-50,982633	Nascente	Livre	Caxias do Sul
PE4 AL	-29,044705	-50,968385	Nascente	Livre	Caxias do Sul
PE5 AL	-29,059848	-50,95971	Nascente	Livre	Caxias do Sul
PE6 AL	-29,058456	-50,96345	Nascente	Livre	Caxias do Sul
PE7 AL	-29,06097	-50,968842	Nascente	Livre	Caxias do Sul
PE8 AL	-29,060477	-50,986902	Poço Escavado	Livre	Caxias do Sul
PT1 AF	-29,063175	-50,985022	Poço Tubular	Faturado	Caxias do Sul
PT2 AF	-29,05275	-50,98303	Poço Tubular	Faturado	Caxias do Sul
PT3 AF	-29,033639	-50,966344	Poço Tubular	Faturado	Caxias do Sul
PT4 AF	-29,039743	-50,980496	Poço Tubular	Faturado	Caxias do Sul
PT6 AF	-29,045192	-50,964163	Poço Tubular	Faturado	Caxias do Sul
PT7 AF	-29,058196	-50,957789	Poço Tubular	Faturado	Caxias do Sul
PT8 AF	-29,048787	-50,981542	Poço Tubular	Faturado	Caxias do Sul

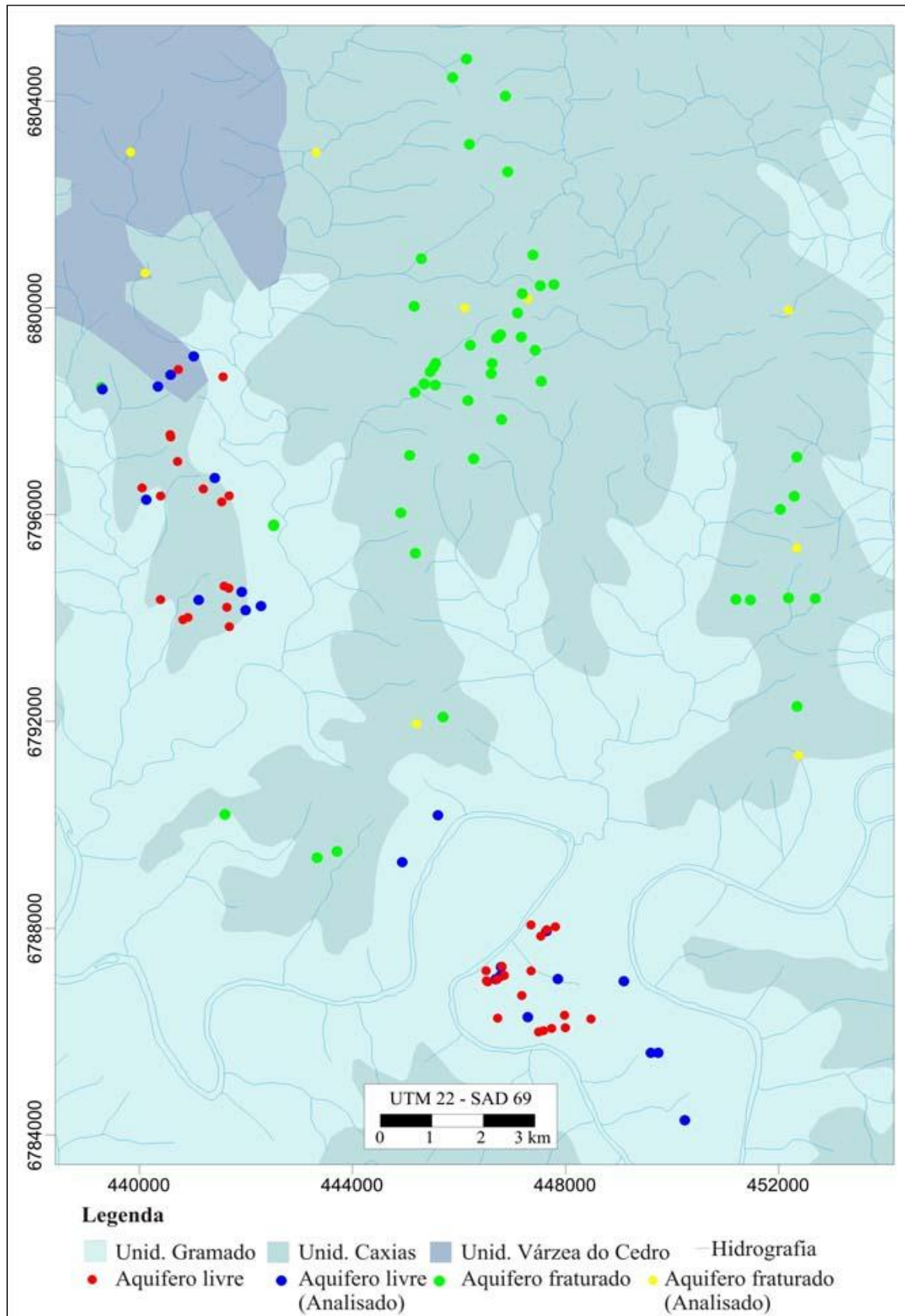


Figura 2. Localização dos pontos de captação dos aquíferos livre (poços escavados do tipo cacimba e nascentes) e fraturado (poços tubulares profundos) na região de Veranópolis.

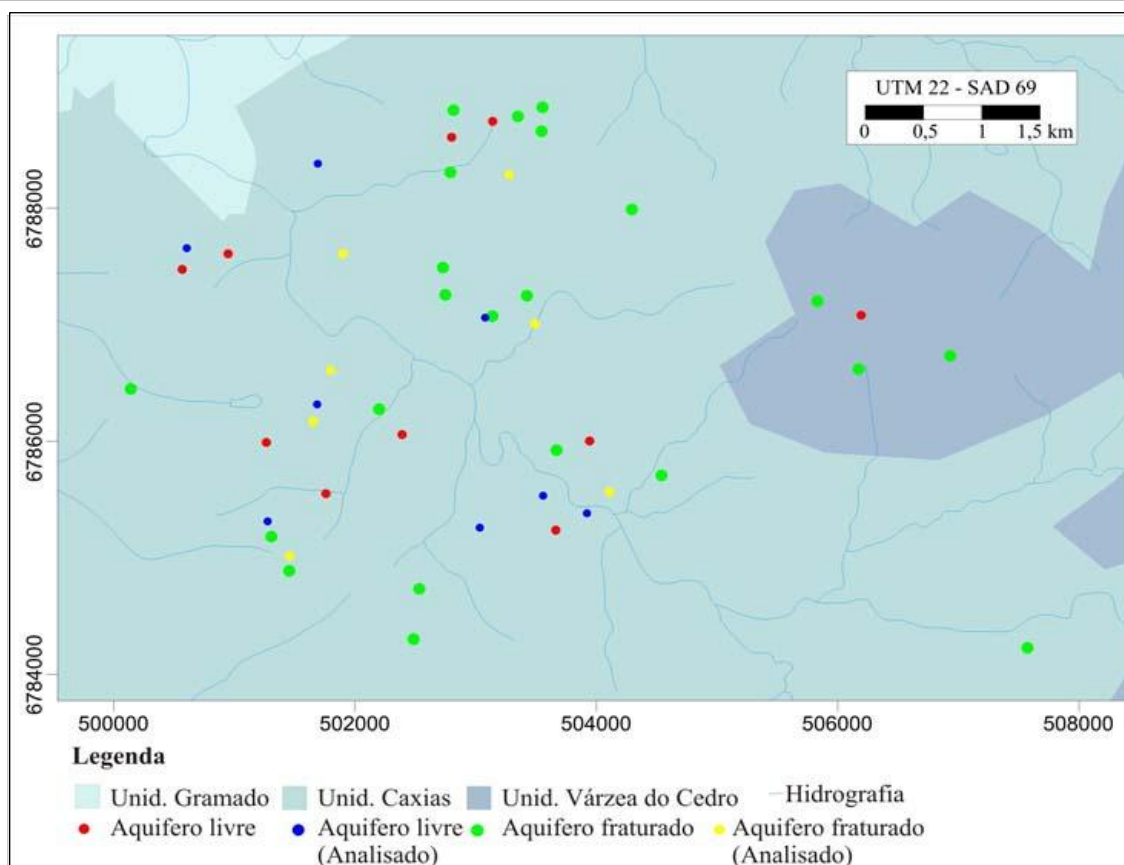


Figura 3. Localização dos pontos de captação dos aquíferos livre (poços escavados do tipo cacimba e nascentes) e fraturado (poços tubulares profundos) na região de Caxias do Sul.

Tabela 2. Parâmetros, limites de detecção e metodologias empregadas nos laboratórios responsáveis pelas análises químicas e bacteriológicas das amostras de água subterrânea do aquífero livre.

Parâmetro	Limite de Detecção	Metodologia Utilizada
Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	0,50	SM – Titulação Potenciométrica
Cloreto (mg/L Cl ⁻)	0,15	SM – Método Argentimétrico
Sulfato (mg/L SO ₄ ⁻²)	1,00	SM – Turbidimetria
Cálcio (mg/L Ca)	0,01	SM - Método 3030 E e 3111 D
Magnésio (mg/L Mg)	0,01	SM - Método 3030 E e 3111 D
Potássio (mg/L K)	0,01	SM - Método 3030 E e 3500 B
Sódio (mg/L Na)	0,01	SM - Método 3030 E e 3500 B
Nitrato (mg/L N-NO ₃)	0,01	Método Ácido Fenoldissulfônico
Ferro (mg/L Fe)	0,04	SM - Método 3030 E e 3111 B
Manganês (mg/L Mn)	0,01	SM - Método 3030 E e 3111 B
Fluoretos (mg/L F ⁻)	0,20	Colorimétrico - SPADNS
Coliformes Totais (UFC/100 mL)	-	Tubos Múltiplos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Hidrogeologia do aquífero livre

Na região de estudo, há ocorrência de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Figura 4), que podem ser agrupadas em três unidades principais, denominadas de Gramado, Palmas/Caxias e Várzea do Cedro (CPRM, 1998). Segundo Reginato e Strieder (2006), as rochas vulcânicas nessa região estão associadas a duas sequências, uma ácida e outra básica, dispostas em nove derrames principais. As rochas básicas são representadas por basaltos e constituem seis derrames de lavas, enquanto que as rochas ácidas (ocorrem sobre as rochas básicas) são caracterizadas pela presença de riodacitos, dacitos, riolitos e vidros vulcânicos e formam três derrames principais. Associadas às rochas vulcânicas ácidas e básicas, ocorrem litologias representadas por brechas (mais comuns na sequência básica) e por níveis de vidro vulcânico (mais comuns na sequência ácida). Essas rochas apresentam estruturas tectônicas (fraturas, zonas de fraturas, veios e diques) e estruturas de resfriamento associados aos diferentes derrames (zonas maciças, de brecha, vesiculares a amigdalóides, disjunção ou diáclases horizontais e verticais).

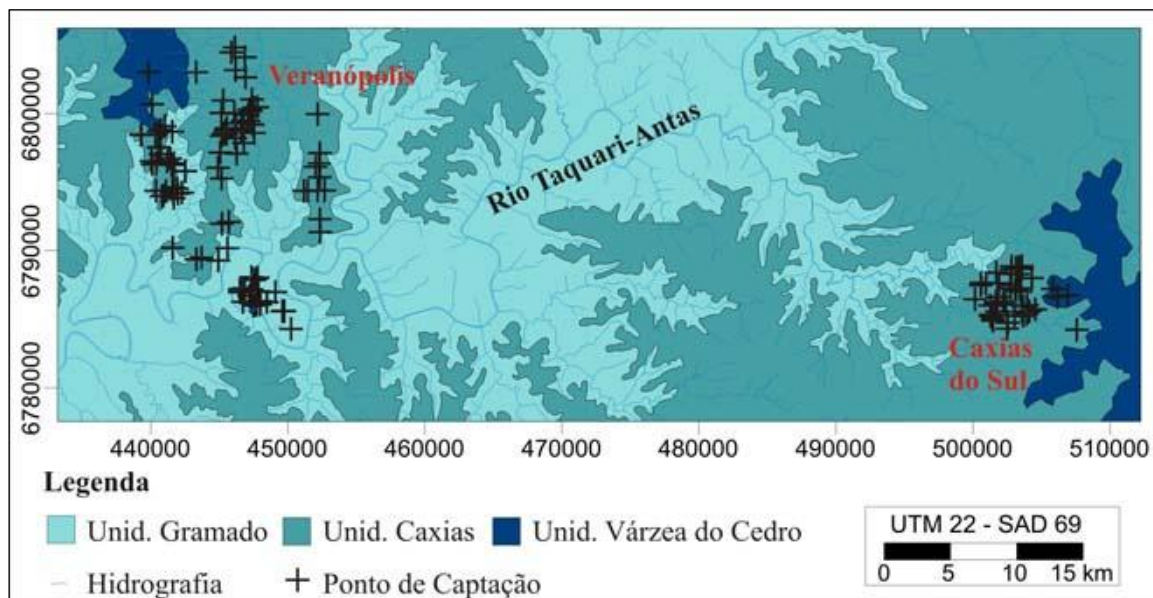


Figura 4. Mapa geológico regional com a localização das principais unidades da Formação Serra Geral e os pontos de captação de águas subterrâneas dos aquíferos livre e fraturado.

Sobre as rochas vulcânicas desenvolveram-se diferentes tipos de solos que apresentam propriedades físicas e espessuras variáveis. As principais classes de solos correspondem a Cambissolos, Neossolos, Chernossolos, Argissolos, Latossolos e Nitossolos (Flores et al., 2007). As duas primeiras classes são as que apresentam as menores espessuras de solos e, a menor chance de ocorrência do aquífero livre.

O aquífero livre ou freático está localizado no manto de alteração existente sobre as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, sendo captado através de poços escavados (tipo cacimba) ou de nascentes (ao longo das áreas de descarga). Os poços escavados têm diâmetros inferiores a 1 m e profundidades variáveis (média de 3,4 m), mas inferiores a 10 m (Figura 5 e Tabela 3). Em geral apresentam revestimento por tijolos, mas em alguns locais foram identificados poços rasos (1 a 2 metros) sem revestimento.

As nascentes possuem caixas de coleta que podem encontrar-se abertas ou fechadas, tendo seu entorno, em geral, capões de mata ou campo. Na maioria, os poços escavados e as captações de nascentes não apresentam boas condições sanitárias ou de proteção às águas subterrâneas (Figura 6).

A formação, ocorrência e circulação de água no aquífero livre são condicionadas por fatores como o tipo e a espessura do solo, a topografia, a litologia e as condições climáticas.



Figura 5. Poços escavados (tipo cacimba) cadastrados na área de estudo.

Tabela 3. Dados hidrogeológicos dos poços escavados cadastrados na área de estudo e utilizados para captação de água subterrânea, utilizada para abastecimento.

Código	Região Estudada	Profundidade (m)	NE (m)	Vazão (m³/h)	Espessura Saturada (m)
PALV6	Veranópolis	3,0	0,5	0,6	2,5
PALV23	Veranópolis	1,5	0,6	1,0	0,9
PALV60	Veranópolis	2,0	0,9	0,5	1,1
PALV2	Veranópolis	6,4	3,7	1,0	2,7
PALV18	Veranópolis	9,1	5,0	1,5	4,1
PALV22	Veranópolis	2,5	0,8	0,5	1,7
PALV40	Veranópolis	3,5	1,2	0,8	2,3
PALV31	Veranópolis	1,2	0,9	0,2	0,3
PALV54	Veranópolis	1,8	0,7	0,6	1,1
PE2 AL	Caxias do Sul	7,1	6,2	0,4	0,9
PE8 AL	Caxias do Sul	2,6	1,1	0,8	1,5



Figura 6. Nascentes cadastradas na área de estudo, utilizadas pelas comunidades como fonte de água para abastecimento.

Os solos que apresentam menores porcentagens de argilas (35 a 71%) e maiores espessuras (maior que 1,5 m) possuem, em princípio, as melhores condições de armazenar e circular a água subterrânea. A topografia tem uma influência direta no processo de circulação da água, pois a mesma acompanha as inclinações naturais da superfície e do substrato rochoso. Assim, em regiões de declividade mais acentuada, onde há quebra de relevo haverá a tendência de formação de nascentes (denominadas de fontes de encosta). Quanto ao substrato rochoso, o principal fator corresponde à estruturação dos derrames de lavas, pois em zonas maciças, a circulação da água ocorrerá entre o contato da zona de alteração e da rocha sã. É o caso das áreas onde há ocorrência de vidro vulcânico, que possui um comportamento impermeável favorecendo assim, esse tipo de circulação.

O clima possui uma relação direta com o volume de água que circula no aquífero livre e também com a posição do nível estático. Dependendo do tamanho da área de recarga (micro-bacia) e da quantidade de precipitação sobre a mesma, haverá a formação e circulação de maiores ou menores quantidades de água subterrânea. Além disso, quando há variações significativas da precipitação, há mudanças na posição do nível estático, que em períodos de chuvas intensas acarreta num aumento da zona saturada que eleva o nível da água subterrânea, enquanto que, em períodos de estiagem há rebaixamento deste nível.

As zonas de recarga desses aquíferos correspondem a altos topográficos com baixa declividade e solos com maior espessura, que se caracterizam por áreas onde haverá uma maior tendência a infiltração da água. Já as áreas de descarga correspondem aos locais mais baixos ou onde há quebra de relevo, dando origem a nascentes e banhados. Essa situação é evidenciada na região de Caxias do Sul, onde há o predomínio de rochas ácidas associadas à ocorrência de camadas de vidros vulcânicos. Essas camadas são impermeáveis e respondem como aquífugos. Dessa forma a água que infiltra no solo, circula preferencialmente no contato entre o solo e as camadas vulcânicas mais impermeáveis e, quando há quebra do relevo, ocorrem nascentes que dão origem a banhados.

A análise dos dados hidrogeológicos obtidos no inventário e cadastramento dos pontos de captação de água subterrânea (Tabela 3) permitiu determinar algumas características do aquífero livre como:

- o nível estático (NE) ocorre em média, abaixo de 1 m de profundidade;
- a espessura da zona saturada, em média, é de 1,7 m, variando entre 0,3 até 4,1 m;
- as vazões são inferiores a 1,5 m³/h, sendo mais comuns valores abaixo de 0,5 m³/h;
- a transmissividade média é igual a 1,14.10⁻³ m²/s, enquanto a condutividade média é da ordem de 2,72.10⁻⁴ m/s.

Segundo Hausman (1966), as vazões associadas ao aquífero existente na zona de alteração das rochas vulcânicas, na maior parte, são inferiores a 1 m³/h, mas podem, em alguns locais, alcançar até 18 m³/h. As vazões sofrem influência do clima, pois, em períodos de estiagem, ocorrem diminuições significativas (na maioria dos casos, essa diminuição chega em média a 50%).

Em função dos diferentes tipos de condicionantes e das características hidrogeológicas, o aquífero livre, embora poroso, tem um comportamento heterogêneo, dimensões reduzidas, pequena continuidade lateral e circulação localizada.

3.2. Caracterização hidroquímica do aquífero livre

Conforme Hausman (1966), as águas subterrâneas do aquífero livre possuem pH variando entre 6 e 9,5, apresentam baixos teores de sólidos totais, alcalinidade não muito elevada e dureza abaixo de 100 mg/L. Outra característica é a presença de ferro, que em boa parte dos casos, se apresenta em níveis acima do permitido (maiores que 0,3 mg/L), conforme Portaria MS nº 2914 de 12/12/2011 (Brasil 2011).

Tedesco e Reginato (2004) realizaram um estudo sobre a contaminação bacteriológica das águas subterrâneas do sistema aquífero livre da região de Veranópolis, onde foram analisadas 50 amostras de água provenientes de poços escavados (tipo cacimba) e nascentes utilizadas pela comunidade rural para abastecimento. Os resultados encontrados evidenciam que o aquífero possui um grau de contaminação bacteriológica elevada, onde mais de 70% dos pontos de captação apresentaram índices de coliformes fecais que variavam entre 3000 a 42000 UFC/mL (o limite permitido é a Ausência em 100 mL), conforme Portaria MS nº 294 de 12/12/2011 (Brasil, 2011). Segundo esses autores, a origem da contaminação das águas subterrâneas do aquífero livre está relacionada com as atividades agrícolas (em função das práticas de cultivo que dispensam resíduos orgânicos em toda a extensão da propriedade) e domésticas (pelo lançamento das águas residuárias sem tratamento prévio).

A caracterização hidroquímica do aquífero livre foi realizada, com base na interpretação dos resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas (Tabelas 4, 5, 6 e 7) e dos diagramas Piper e Stiff, gerados com o emprego do programa Qualigraf (Mobus, 2002). Os resultados obtidos foram comparados com dados hidroquímicos de águas subterrâneas que circulam pelo aquífero fraturado (captada por poços tubulares profundos), visando avaliar semelhanças ou diferenças entre o padrão hidroquímico das águas dos dois aquíferos.

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados as variações das concentrações de diferentes parâmetros (alcalinidade, cloreto, sulfato, cálcio, magnésio, potássio e sódio) das águas subterrâneas do aquífero livre (Figura 7) e do aquífero fraturado (Figura 8).

Comparando a distribuição da concentração dos diferentes parâmetros, representados nas Figuras 7 e 8 fica evidenciado que as águas do aquífero livre apresentam baixa alcalinidade e menor concentração para elementos como cloretos, cálcio, magnésio, potássio e sódio. Essa baixa concentração, pode estar relacionada com a rápida circulação da água subterrânea, entre a zona de recarga e descarga, resultando num baixo tempo de residência. Outra explicação pode estar relacionada à composição do solo e as interações hidrogeoquímicas que podem ocorrer nesse ambiente. No entanto, é evidente a existência de uma diferenciação hidroquímica entre as águas subterrâneas do aquífero livre e do fraturado.

Tabela 4. Resultados das análises realizadas em pontos de captação do aquífero livre.

Código	Coliformes (UFC/100mL)	N-NO ₃ (mg/L)	Fe Total (mg/L)	Mn (mg/L)	F (mg/L)	pH	CE (uS/cm)
PALV6	Ausência	4,43	0,21	0,02	n.d.	5,85	26,2
PALV23	Ausência	8,86	0,24	n.d.	n.d.	5,64	48,4
PALV60	5000	25,25	0,78	0,01	0,11	6,08	44,9
PALV2	200	55,37	1,22	0,02	n.d.	6,36	97,7
PALV18	10000	38,54	0,10	0,02	n.d.	5,98	129,7
PALV22	100	10,63	0,22	0,02	n.d.	5,93	50,5
PALV40	4000	44,74	1,85	0,02	0,19	7,51	23,5
PALV31	200	29,68	0,19	n.d.	n.d.	6,71	147,4
PALV54	Ausência	7,97	0,06	n.d.	n.d.	5,60	35,1
PALV3	Ausência	12,84	0,29	0,02	n.d.	5,28	47,0
PALV4	Ausência	13,73	0,17	0,02	n.d.	5,65	51,1
PALV13	500	14,17	0,79	0,02	n.d.	6,32	55,0
PALV26	100	9,74	0,30	0,02	n.d.	6,47	30,5
PALV24	50	10,18	0,17	0,01	n.d.	6,30	57,5
PALV29	Ausência	10,18	0,29	0,02	n.d.	5,95	35,8
PALV38	2000	11,96	0,31	n.d.	0,10	7,09	209,0
PALV45	200	36,32	2,39	0,06	n.d.	6,50	27,1
PALV39	200	7,97	0,11	n.d.	0,10	6,66	28,7
PALV56	Ausência	4,43	0,09	n.d.	0,25	7,08	19,7
PALV49	Ausência	6,20	0,10	n.d.	n.d.	5,61	25,6
PALV53	50000	53,16	2,73	0,02	n.d.	5,95	49,1
PALV59	2000	15,06	0,41	0,01	n.d.	6,06	53,2
PE1 AL	4	0,06	0,23	n.d.	n.d.	5,59	18,14
PE2 AL	110	0,07	0,51	0,02	n.d.	5,91	28,5
PE3 AL	Ausência	0,10	0,15	n.d.	n.d.	6,14	34,0
PE4 AL	4	0,12	0,71	n.d.	n.d.	5,67	36,1
PE5 AL	4	n.d.	0,26	0,02	n.d.	5,37	27,8
PE6 AL	11	0,17	0,18	0,01	n.d.	5,43	21,9
PE7 AL	13	0,32	0,16	0,01	n.d.	5,23	35,6
PE8 AL	89	0,25	0,38	0,05	n.d.	5,08	42,5

Tabela 5. Resultados das análises realizadas em pontos de captação do aquífero livre.

Ponto	Alcalinidade mg/L CaCO ₃	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)
PALV6	18,5	0,70	2,00	3,05	0,42	0,50	1,61
PALV23	22,3	1,20	2,00	2,55	0,78	3,33	4,56
PALV60	27,7	0,50	8,00	3,27	1,28	1,01	3,16
PALV3	0,5	2,00	4,00	3,45	0,98	2,00	2,32
PE1 AL	8,0	n.d.	2,56	1,12	1,78	1,21	1,53
PE2 AL	9,0	n.d.	6,16	1,21	1,74	1,58	1,53
PE3 AL	9,5	n.d.	1,11	1,29	1,67	2,12	1,94
PE4 AL	9,8	0,79	2,56	1,25	2,01	1,39	2,36
PE5 AL	8,0	1,31	n.d.	1,23	1,42	1,21	1,94
PE6 AL	5,5	n.d.	1,80	1,14	1,16	1,03	1,11
PE7 AL	4,0	2,10	n.d.	1,24	1,34	1,03	1,73
PE8 AL	2,0	1,31	n.d.	1,33	1,99	0,67	2,36

Tabela 6. Dados de análises disponíveis de poços tubulares profundos que captam água do aquífero fraturado.

Código	Coliformes (UFC/100mL)	N-NO ₃ (mg/L)	Fe Total (mg/L)	Mn (mg/L)	F (mg/L)	pH	CE (uS/cm)
PAFV13	Ausência	0,43	n.d.	n.d.	n.d.	6,24	93,1
PAFV14	Ausência	0,53	n.d.	n.d.	0,26	7,17	185,0
PAFV15	Ausência	0,13	n.d.	n.d.	0,16	6,46	107,0
PAFV16	Ausência	0,15	n.d.	n.d.	0,25	7,14	153,0
PAFV17	Ausência	1,27	n.d.	n.d.	0,11	6,38	77,6
PAFV19	Ausência	2,20	0,1	n.d.	0,24	7,86	253,0
PAFV34	Ausência	0,12	n.d.	n.d.	0,17	6,37	145,0
PAFV47	Ausência	2,51	0,07	0,04	0,34	6,71	121,0
PAFV49	Ausência	0,79	0,60	n.d.	0,20	6,78	158,0
PT1 AF	Ausência	1,16	0,18	n.d.	0,36	7,10	169,8
PT2 AF	Ausência	n.d.	0,29	n.d.	0,30	7,29	148,2
PT3 AF	Ausência	1,97	0,16	0,02	n.d.	6,84	129,2
PT4 AF	Ausência	0,25	0,15	0,02	0,41	6,35	110,8
PT6 AF	Ausência	1,26	0,10	n.d.	0,57	7,77	165,6
PT7 AF	Ausência	0,36	0,18	0,02	0,25	6,72	105,4
PT8 AF	30	0,06	0,17	0,02	n.d.	6,12	93,0

Tabela 7. Dados de análises disponíveis de poços tubulares profundos que captam água do aquífero fraturado.

Ponto	Alcalinidade mg/L CaCO ₃	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)
PAFV13	14,7	4,45	3,00	9,70	1,46	2,51	2,60
PAFV14	78,8	4,45	2,00	21,80	14,10	1,38	6,60
PAFV15	37,8	6,23	n.d.	9,70	2,67	2,15	3,40
PAFV16	67,2	8,01	2,00	17,80	4,86	0,59	8,20
PAFV17	23,1	5,34	2,00	6,46	1,94	2,00	2,60
PAFV19	133,0	2,60	3,00	6,87	4,37	0,98	42,00
PAFV34	48,4	3,50	2,00	15,30	5,35	4,71	5,70
PAFV47	40,7	3,11	4,00	9,29	4,86	1,43	6,10
PAFV49	62,0	11,10	1,00	17,80	4,13	1,20	6,70
PT1 AF	58,5	0,26	n.d.	12,00	9,28	0,67	12,8
PT2 AF	50,9	0,52	n.d.	11,60	9,87	1,03	13,00
PT3 AF	43,0	n.d.	1,49	12,20	13,50	0,48	9,03
PT4 AF	31,5	n.d.	1,30	10,10	12,20	1,58	9,44
PT6 AF	54,5	0,79	1,80	10,90	13,70	0,85	20,9
PT7 AF	53,5	1,31	2,37	10,80	12,30	1,03	9,86
PT8 AF	24,0	4,46	n.d.	1,82	1,53	1,39	8,82

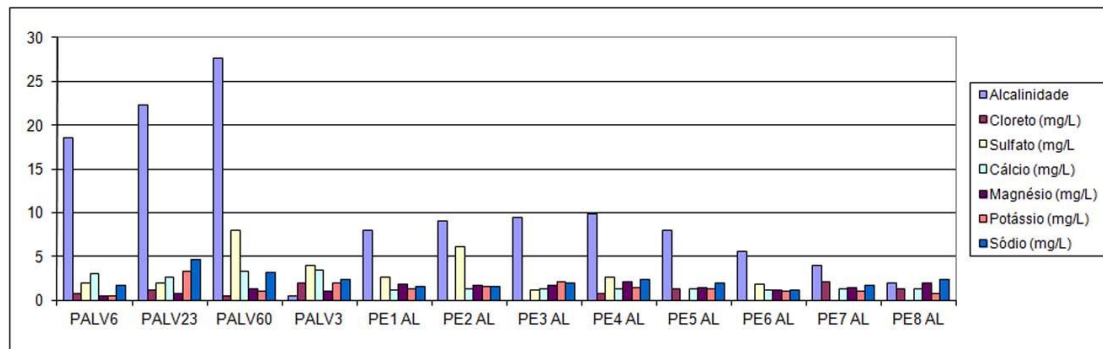


Figura 7. Parâmetros químicos obtidos das águas subterrâneas do aquífero livre.

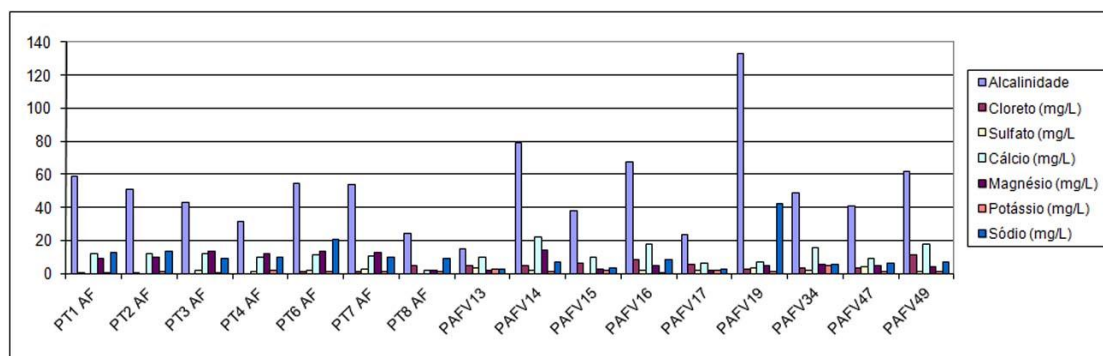


Figura 8. Parâmetros químicos obtidos das águas subterrâneas do aquífero fraturado.

Nas Figuras 9 e 10 é apresentada uma comparação entre os parâmetros condutividade elétrica (CE) e pH para as águas subterrâneas dos aquíferos livre e fraturado.

Analisando-se o parâmetro condutividade elétrica (Figura 9), observa-se que na maior parte dos casos, as águas do aquífero livre apresentam valores abaixo dos 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (a média geral é abaixo dos 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Já as águas do aquífero fraturado apresentam diferentes valores, sendo os mesmos em média, mais elevados (acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esse parâmetro evidencia que há diferenças entre as águas subterrâneas dos aquíferos livre e fraturado, sendo que uma das explicações, pode estar relacionada à circulação e tempo de residência das águas subterrâneas. Em geral, as águas subterrâneas do aquífero livre tendem a apresentar uma circulação mais rápida, entre a zona de recarga e descarga, implicando num menor tempo de residência e numa menor concentração de elementos. No entanto, essa circulação pode ser mais lenta, o que poderia explicar a ocorrência de pontos, onde foram identificados maiores valores de condutividade.

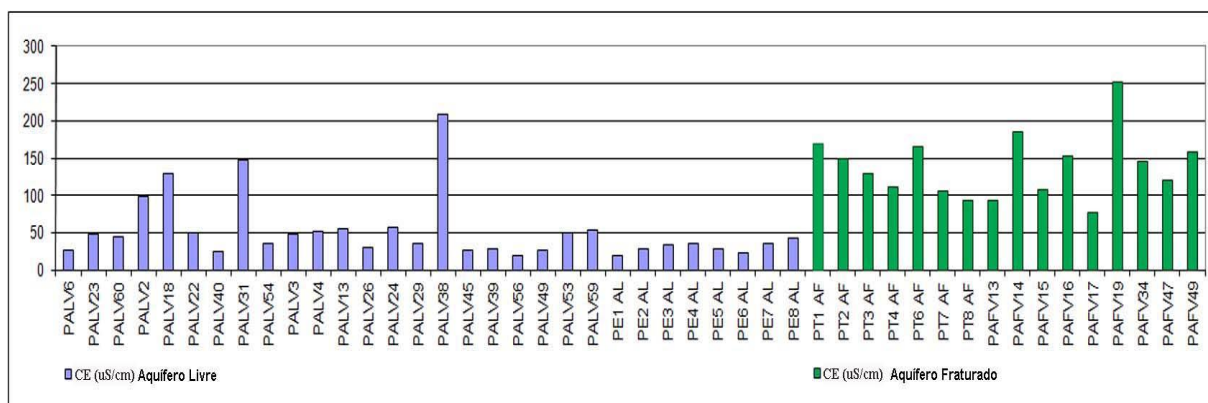


Figura 9. Valores de condutividade elétrica das águas do aquífero livre e fraturado.

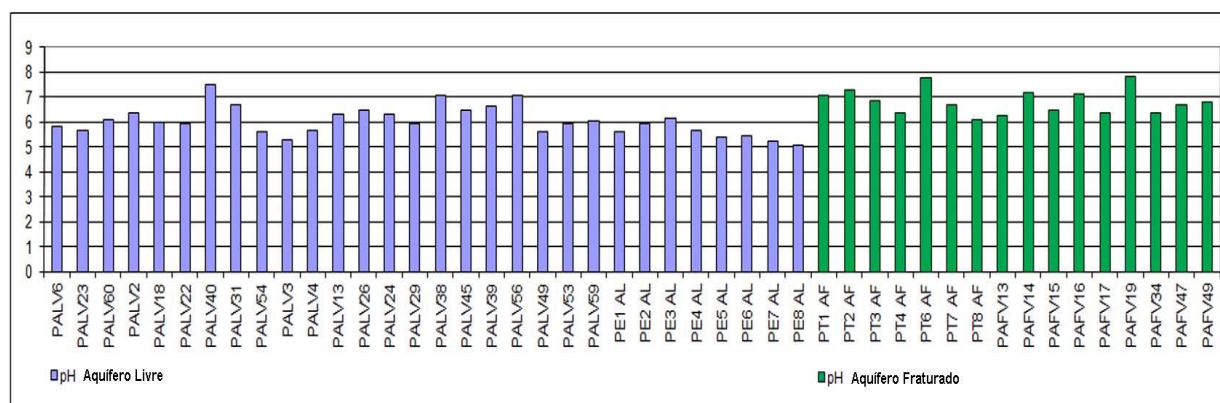


Figura 10. Valores de pH das águas do aquífero livre e fraturado.

O parâmetro pH (Figura 10) tem uma pequena diferenciação, sendo que as águas subterrâneas do aquífero livre tem uma tendência a apresentar um pH entre 5 e 6, enquanto as águas subterrâneas do aquífero fraturado tendem a ter um pH entre 6 e 8. A existência de pH mais baixo para as águas do aquífero livre é explicada, pois o mesmo é mais superficial e está localizado na zona de alteração das rochas vulcânicas, local onde ocorrem processos de decomposição da matéria orgânica, que dão origem a ácidos orgânicos, responsáveis pela diminuição do pH. Outra explicação pode estar relacionada com as características dos solos, que em geral, são ácidos e mais pobres.

Analisando-se outros parâmetros, observa-se que a concentração de ferro total e manganês é maior nas águas subterrâneas que circulam pelo aquífero livre, do que as que circulam pelo aquífero fraturado (Figura 11). As concentrações de ferro total no aquífero livre variam entre 0,04 e 2,73 mg/L. A explicação para essas altas concentrações está relacionada ao fato que, esses elementos são provenientes dos processos de alteração dos minerais ferromagnesianos, presentes nas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, que acabam se concentrando nos solos (Argissolos, Nitossolos, Latossolos e Cambissolos) encontrados na região. A ocorrência de ferro total, encontrado nas águas subterrâneas do aquífero fraturado é explicada por Reginato e Strieder (2007). Esses autores destacam que poços que captam água de aquíferos fraturados, localizados em regiões de ocorrência de solos do tipo Argissolos, Nitossolos e Latossolos, com entradas de água pouco profundas (em geral, localizadas abaixo dos 15 metros), tendem a apresentar concentrações de ferro total elevadas (acima de 0,3 mg/L).

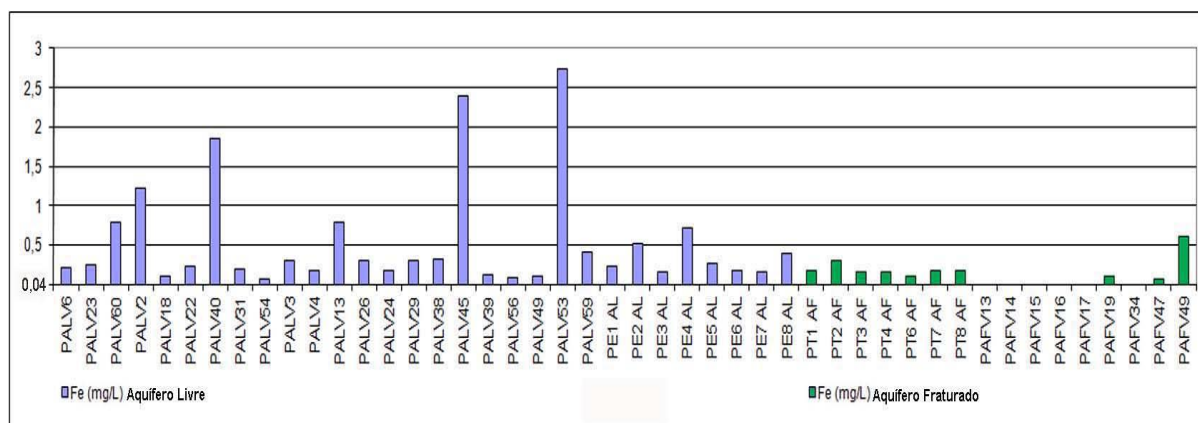


Figura 11. Valores da concentração de Ferro total obtidos em águas subterrâneas dos aquíferos livre e fraturado.

Com relação ao fluoreto (Tabelas 4 e 6), nas águas subterrâneas do aquífero livre não é comum a ocorrência desse elemento. No entanto, quando presente, as concentrações variaram entre 0,1 e 0,25 mg/L. O fluoreto é mais facilmente encontrado nas águas subterrâneas que circulam pelos aquíferos fraturados, sendo sua origem, segundo Nanni et al. (2008), condicionada por estruturas tectônicas que promovem a conexão entre os sistemas aquíferos Serra Geral e Guaraní.

O parâmetro nitrato foi avaliado, pois tem grande importância na identificação de fontes de contaminação orgânica. Na figura 12 é apresentada a variação da concentração desse parâmetro para as águas subterrâneas do aquífero livre. Observa-se que os valores encontrados variaram entre 0,01 e 60 mg/L, sendo comum a ocorrência de valores acima de 10 mg/L. Esses valores já indicam a ocorrência de processos de contaminação por fontes orgânicas. As causas estariam relacionadas com o tipo de aquífero, tipo e proteção do ponto de captação e a ocupação do entorno (Reginato e Gilioli, 2010).

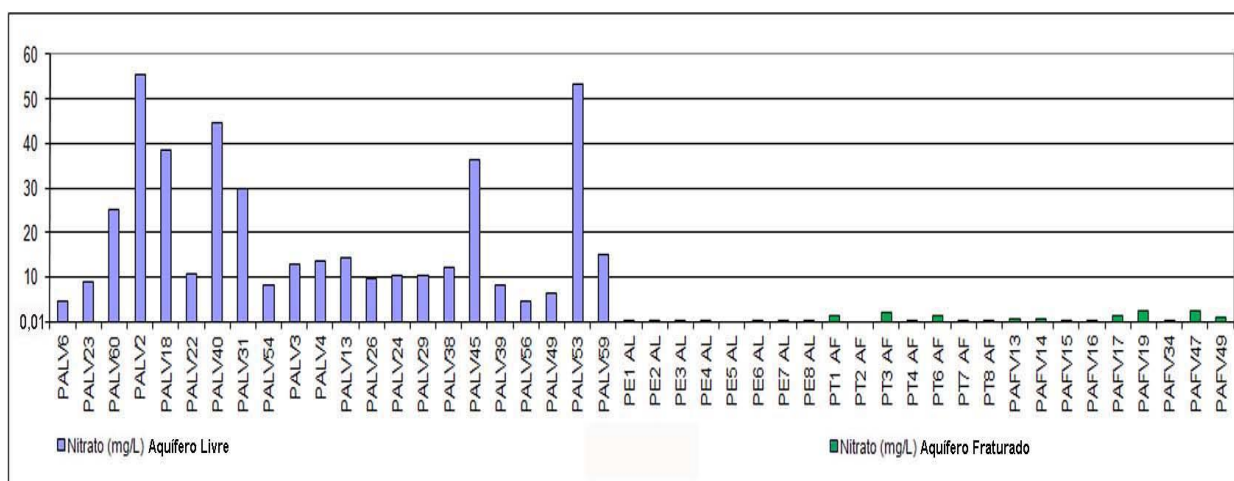


Figura 12. Valores de Nitrato encontrados nas águas do aquífero livre.

A contaminação do aquífero livre é evidenciada também pelas análises bacteriológicas (Tabela 4), sendo que na maior parte dos pontos analisados, foi identificada a presença de coliformes totais.

Ao se analisar a classificação das águas subterrâneas que circulam pelo aquífero livre, apresentada no diagrama Piper (Figura 13), observa-se que as amostras indicam a ocorrência de um único grupo que é o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. Com base nos cátions, observa-se que a maior parte das águas é considerada mista, enquanto poucas são do tipo cálcicas. Essa relação está de acordo com o ambiente de formação, pois o aquífero livre está associado ao manto de alteração das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, com minerais ferromagnesianos e sódicos, local onde é comum a ocorrência dos elementos cálcio, magnésio e sódio. Além disso, essa classificação corresponde ao padrão típico das águas que circulam pelo aquífero fraturado, pois em geral, quando há ausência de conexão com outros sistemas aquíferos ou um menor grau de confinamento, as águas subterrâneas, que circulam pelo aquífero fraturado, tendem a ser do tipo bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (Reginato et al., 2010).

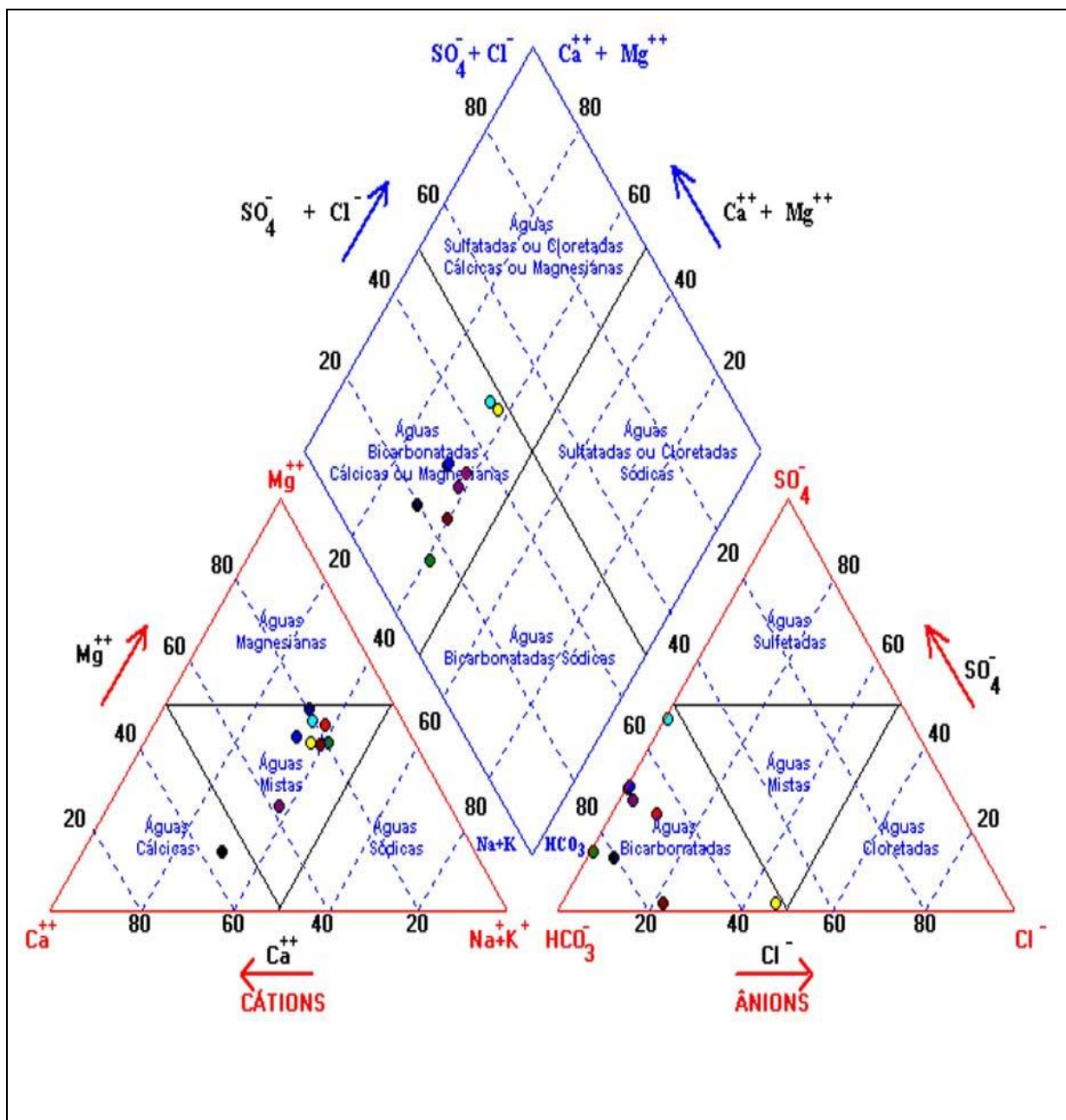


Figura 13. Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas coletadas do aquífero livre, em solos de alteração das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

Com base na análise do diagrama de Stiff (Figura 14), pode-se identificar o padrão típico das águas que circulam pelo aquífero livre. A geometria apresentada no diagrama é típica de águas subterrâneas que apresentam pequenas concentrações de elementos, evidenciando uma rápida circulação e baixo tempo de residência. Além disso, fica claro que essas águas têm a mesma origem e o mesmo padrão químico.

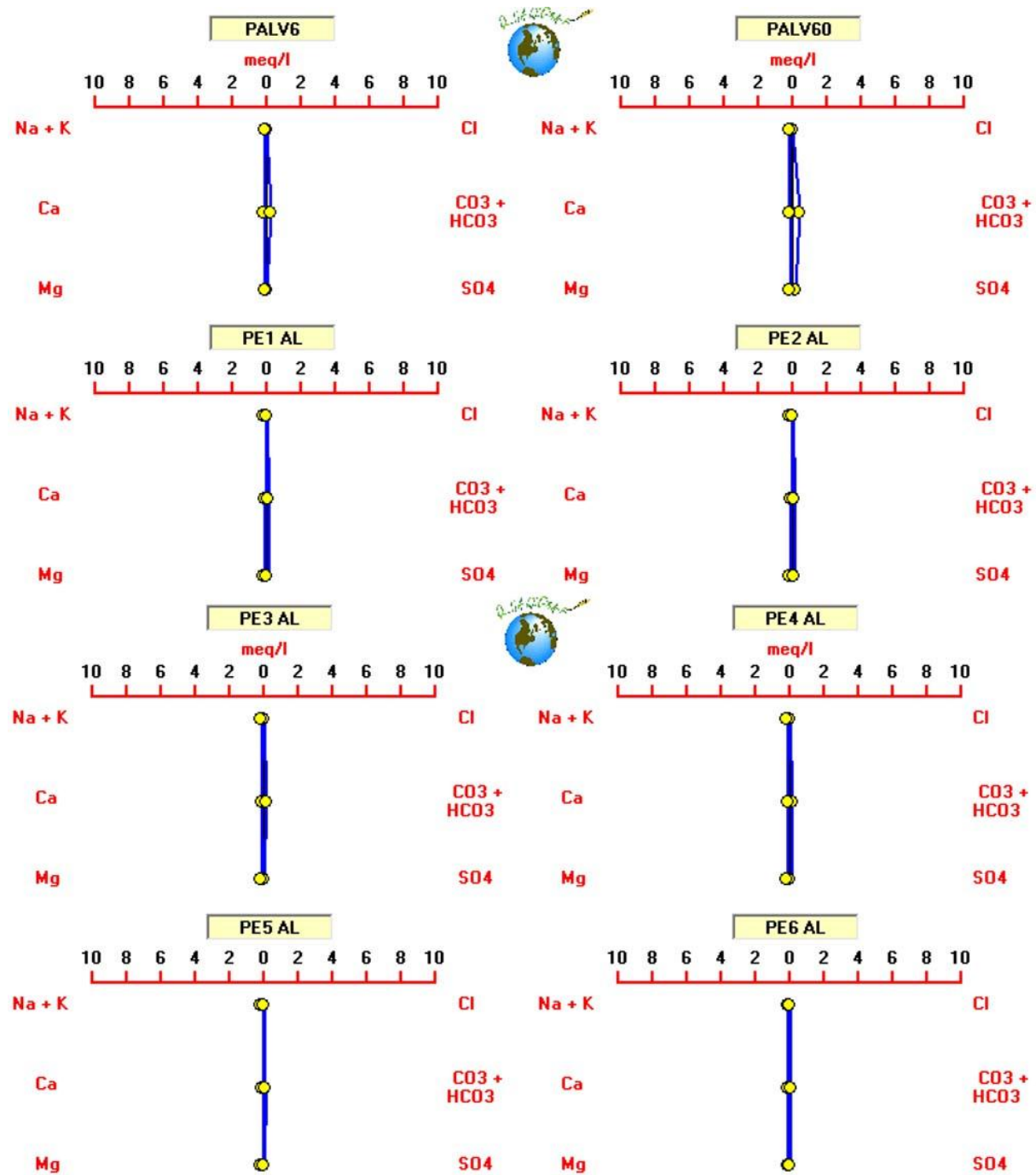


Figura 14. Diagrama de Stiff com as concentrações de águas subterrâneas coletadas no aquífero livre.

4. CONCLUSÃO

O aquífero livre está localizado no manto de alteração das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, sendo condicionado por fatores como o solo, a topografia, a litologia do substrato e o clima. A circulação da água ocorre no manto de alteração, junto ao substrato rochoso, dando origem a zonas saturadas com espessuras médias de 1,7 metros e níveis estáticos entre 0 e 1 metro. As zonas de recarga correspondem aos altos topográficos com baixas declividades e solos com maior espessura. As regiões de descarga são caracterizadas pela ocorrência de nascentes que aparecem na intersecção entre a água subterrânea e a

topografia. As reservas de água subterrânea sofrem influência do clima, sendo que a capacidade de produção dos poços escavados (tipo cacimba) e nascentes, em geral, é inferior a 0,5 m³/h. Em média, a transmissividade é 1,14.10⁻³ m²/s e a condutividade é 2,72.10⁻⁴ m/s.

As águas subterrâneas do aquífero livre são bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (predomínio de águas mistas) com baixa alcalinidade e menor concentração de elementos como cálcio, magnésio, sódio, potássio e cloretos. A condutividade é inferior a 100 μ S/cm e o pH varia entre 5 e 6. Além disso, as águas tendem a apresentar uma maior concentração de ferro total. Essas características são típicas de um aquífero localizado no manto de alteração, desenvolvido sobre rochas vulcânicas e, evidencia, a existência de uma rápida circulação entre as áreas de recarga e descarga.

Como esse aquífero é poroso, desenvolvido em sedimentos e localizado próximo a superfície, possui uma maior chance de ser contaminado e pode apresentar problemas na qualidade (potabilidade) das águas subterrâneas. Isso é evidenciado pelas concentrações obtidas para o parâmetro nitrato, cujos valores médios são superiores a 10 mg/L e pela presença de coliformes totais, indicando a existência de fontes de contaminação orgânica.

5. REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria Nº 2914 de 12.12.2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 11 julho 2012.
- COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS NATURAIS - CPRM. **Mapeamento geológico integrado da bacia hidrográfica do Guaíba**: carta geológica. Folha SH22-V-D-Caxias do Sul. Porto Alegre, 1998. 1 mapa. Escala 1:250.000.
- FLORES, C. A. F.; PÖTTER, R. O.; FASOLO, P. J.; HASENACK, H.; WEBER, E. **Levantamento semidetalhado de solos**: região da serra gaúcha – estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS/Centro de Ecologia, 2007. 1 CD-ROM.
- HAUSMAN, A. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. **Boletim Paranaense de Geografia**, v 18, n. 20, p. 177-215, 1966.
- MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Projeto mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul**: relatório final. Porto Alegre: CPRM, 2005. 65p. il. mapa.
- MOBUS, G. **Qualigraf**: programa para análise da qualidade da água. Fortaleza: FUNCENE, 2002.
- NANNI, A.; ROISENBERG, A.; FACHEL, J. M. G.; MESQUITA, G.; DANIELI, C. Fluoride characterization by principal component analysis in the hydrochemical facies of Serra Geral aquifer system in southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 80, n. 4, p. 693-701, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652008000400010>
- REGINATO, P. A. R. **Integração de dados para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da bacia hidrográfica Taquari-Antas (RS)**. 2003. 254f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C.; CEMIN, G. 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. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 143-162, 2012. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.903>)

REGINATO, P. A. R.; GILIOLI, K. C. Qualidade dos recursos hídricos subterrâneos utilizados para abastecimento pelas comunidades rurais no município de Veranópolis. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2., 2010, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: FIEMA, 2010. 1 CD-ROM.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização hidrogeológica dos recursos hídricos subterrâneos da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1., 2005, Santa Maria. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2005. 1 CD-ROM.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização estrutural dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 1, p. 13-22, 2006.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Condicionantes geológicos da ocorrência de ferro e manganês em aquíferos fraturados da Formação Serra Geral. In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 15., E SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA SUL-SUDESTE, 1., 2007, Gramado. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2007. 1 CD-ROM.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; FINOTTI, A. R.; SCHNEIDER, V. E.; GILIOLI, K. C. Qualidade das águas subterrâneas de diferentes aquíferos associados à Formação Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., E ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2010, São Luis. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2010. 1 CD-ROM.

TEDESCO, M.; REGINATO, P. A. R. A contaminação da água usada para abastecimento por compostos orgânicos e biológicos na zona rural do município de Veranópolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2004. 1 CD-ROM.