

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

LUCIANA BISCHOFF

**A OCORRÊNCIA DE FLUORETO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS
MUNICÍPIOS DE PORTO ALEGRE, GUAÍBA, ELDORADO DO SUL E ARROIO
DOS RATOS/RS.**

Porto Alegre, 2018

LUCIANA BISCHOFF

**A OCORRÊNCIA DE FLUORETO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS
MUNICÍPIOS DE PORTO ALEGRE, GUAÍBA, ELDORADO DO SUL E ARROIO
DOS RATOS/RS.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof^a. Ms^a Jaqueline Ozorio Chies

Supervisor: Prof. Dr. Ari Roisenberg

Porto Alegre, 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Bischoff, Luciana

A ocorrência de fluoreto nas águas subterrâneas dos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos, RS. / Luciana Bischoff. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

[77 f.]

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientadora: Jaqueline Ozorio Chies

1. Hidrogeologia. 2. Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano 3. Flúor .
I. Título.

CDU 556.3

Catálogo na Publicação
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS
Sônia Teresinha Duarte de Oliveira CRB 10/2310

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil
CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.
Fone: +55 51 3308-6569
E-mail: bibgeo@ufrgs.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **A OCORRÊNCIA DE FLUORETO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS MUNICÍPIOS DE PORTO ALEGRE, GUAÍBA, ELDORADO DO SUL E ARROIO DOS RATOS/RS**, elaborado por Luciana Bischoff, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Ana Claudia Vieiro

Prof. Dr. Marcos Leão

Prof. Msc. Thiago Araújo

AGRADECIMENTOS

Primeiro, gostaria de agradecer a minha mãe por estar sempre presente, ser minha amiga e companheira. Acreditar em mim incondicionalmente e apoiar todas as decisões mais malucas já tomadas, mas claro, nunca sem dar aquele sacode quando necessário para então eu seguir firme e continuar. Minha irmã, Juju, hoje uma mocinha mas desde pequena entendendo os sumiços da mana em cima de estudos e mais estudos.

Não menos importante, agradecer a família Silva do “Saranda”! Dinda, vó, vô, tios e tias... Que alegria sempre contar com vocês!

Ao Jonas, meu muito obrigada por mais essa batalha vencida. Que maratona!

Ao Jeferson, pela companhia ao longo do curso, por cada lamentação e comemoração juntos, e claro, por cada fim de semestre naquela loucura padrão.

Aos colegas de trabalho do CREF e da Câmara, por compreenderem e apoiarem esse último ano tão difícil, conciliando cadeiras obrigatórias, trabalho de conclusão e o trabalho em si, dia após dia. Obrigada por tornarem essa minha rotina muito doida possível.

Aos meus orientadores, Ari e Jaque, obrigada por esses dois últimos anos.

Aos professores e ao Instituto de Geociências, agradeço imensamente pelo excelente ensino provido.

RESUMO

Os municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos possuem centenas de poços tubulares cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) com informações referentes à composição hidrogeoquímica das águas, incluindo medidas de concentração de fluoretos, pH, condutividade elétrica e entrada de água. Em vista das elevadas concentrações de fluoreto nas águas subterrâneas das áreas citadas levantou-se a questão sobre quais seriam os controles geológicos atuantes na região. Sabe-se que um dos controles mais importantes se refere à natureza das rochas granito-gnáissicas que constituem o aquífero fraturado. A maioria dos poços citados estão alocados em litologias granito-gnáissicas que representam o Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano, cujos dados hidrogeoquímicos disponíveis permitem uma análise estatística que possibilita identificar tipos químicos de águas. A afinidade química mais alcalina das rochas favorece o registro de maiores teores de flúor, em razão da presença de minerais como fluorita, flúor-apatita, minerais ferromagnesianos sódicos, entre outros. Assim, pretende-se cruzar os dados obtidos no SIAGAS com os dados já existentes na bibliografia sobre as litologias da área de estudo. Estes dados serão analisados, especialmente a mineralogia, e correlacionados com as concentrações de fluoreto. A bibliografia utilizada permite o reconhecimento dos tipos litológicos presentes na área a partir da mineralogia descrita pelos autores. Assim, pretende-se testar a hipótese de que as elevadas concentrações de fluoreto na área em estudo são decorrentes da interação entre água subterrânea e as litologias granito-gnáissicas que constituem o aquífero fraturado. Os resultados obtidos poderão contribuir para um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, visando principalmente a saúde humana.

Palavras-Chave: Hidrogeologia. Flúor. Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano.

ABSTRACT

The municipalities of Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul and Arroio dos Ratos have indicators of tubular wells registered in the Information System of Underground Waters (SIAGAS) with information on hydrogeochemical water molecules, including fluoride concentration measurements, pH, conductivity, and water inlet. In view of the concentrations of groups of fluids in the groundwater of the mentioned areas, a session on the geological controls in the region was created. It is known that one of the most important controls refers to the nature of granite-gneiss rocks that constitute the fractured aquifer. Most wells are allocated in granite lithologies representing the Pre-Cambrian Fractured Aquifer System, and data is available for a statistical analysis that allows the identification of water chemical substances. The more alkaline chemical affinity of the rocks favors the registration of higher levels of fluoride, due to the presence of minerals such as fluorine, fluorine-apatite, sodium ferromagnesian minerals, among others. The cross images of the SIAGAS type with the data already existent (especially mineralogy and your correlation with fluoride concentrations) in the bibliography on lithologies of the study area is the focus of this work. The bibliography has allowed the recognition of the lithological types present in the area of mineralogy by the authors. Thus, we intend to test the hypothesis that the concentrations of fluorine in the study areas are generated by the interaction between the water and the granitic-chemical lithologies that constitute the fractured aquifer. The results should be directed towards water resources, aiming mainly at human health.

Keywords: Hydrogeology. Fluorine. Pre-Cambrian Fractured Aquifer System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização dos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos.....	12
Figura 2 - Diagrama de Piper com amostragem de água de oito comunidades coletadas em poços abertos e em poços perfurados na porção nordeste de Gana. (Triângulo: poço perfurado; quadrado: poço aberto); (Comunidades mais próximas ou localizadas no Granito Bongo - vermelho: Done, roxo: Nayire, rosa: Tendongo, dourado: Abungo); (Comunidades mais distantes do Granito Bongo – preto: Awake, azul: Abasikomah, verde: Koom, marrom: Akaamo).	18
Figura 3 - Mapa do Batólito de Pelotas. No retângulo em amarelo está a área aproximada de estudo com as litologias correspondentes (Suíte Dom Feliciano, Suíte Viamão e Complexo Arroio dos Ratos).	21
Figura 4 - Mapa geológico de Porto Alegre.....	22
Figura 5 - Mapa geológico da região de Quitéria-Serra do Erval. Em tracejado vermelho a indicação da área de estudo do autor.....	25
Figura 6 - Arquivo exportado para Excel a partir do OutWit Hub, demonstrando o endereço eletrônico e a concentração de fluoreto medida de forma automática.	29
Figura 7 - Mapa de pontos prévio com a delimitação dos municípios de Porto Alegre, Arroio dos Ratos, Eldorado do Sul e Guaíba. Os marcadores indicam o agrupamento realizado inicialmente em função das diferentes concentrações de fluoreto observadas.....	31
Figura 8 – Sistema ICP-MS. A) Solução da amostra; B) Nebulizador; C) Aerossol; D) Câmara de nebulização; E) Tocha; F) Cone de amostragem; G) Cone de separação; H) Lentes iônicas; I) Analisador de massas; J) Sistema de detecção; K e L) Bombas de vácuo turbo-molecular; M) Bomba de vácuo mecânica.....	33
Figura 9 - Imagem de sombreamento RASTER dos municípios em estudo.	39
Figura 10 - Mapa de lineamentos.....	41
Figura 11 - Diagrama de Roseta dos lineamentos traçados.	41
Figura 12 - Mapa de pontos com os poços selecionados para o desenvolvimento do trabalho.	42
Figura 13 - Gráfico demonstrando a divisão dos 75 poços em 6 Grupos distintos conforme a variação da concentração de fluoreto.....	43

Figura 14 - Mapa de bolhas mostrando os intervalos das concentrações de fluoreto na região de estudo.....	44
Figura 15 - Gráfico demonstrando a ocorrência de poços em função do nível estático.	47
Figura 16 - Gráfico demonstrando a quantidade de entradas d'água por poço.....	48
Figura 17 – Relação entre a profundidade das entradas d'água e a quantidade de poços estudados.	49
Figura 18 - Relação entre o intervalo de pH e a quantidade de poços estudados. ...	49
Figura 19 - Fórmula do cálculo do erro prático (Ep%) efetuado pelo Qualigraf levando em consideração o valor de condutividade elétrica da amostra.	50
Figura 20 - Fórmula do cálculo do erro prático (Ep%) efetuado pelo Qualigraf levando em consideração o somatório dos valores dos íons da amostra.....	50
Figura 21 - Diagrama de Piper demonstrando a classificação das águas.....	51
Figura 22 - Desenho de três poços da pesquisa com os diagramas de Stiff caracterizando a água.....	52
Figura 23 - Mapa geológico da área com os diagramas radiais de cada um dos 16 poços. O Poço 13 é o mais representativo e está em destaque ao centro. O diagrama radial deste poço mostra a nomenclatura de cada quadrante, ficando assim subentendido que se deve aplicar a mesma aos outros diagrama radiais mostrados.	53
Figura 24 - Gráfico de dispersão dos índices de saturação de fluorita por calcita. ...	55
Figura 25 - Gráfico de dispersão dos índices de saturação de dolomita por gipso. ...	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Situação operacional dos poços na área de estudo.	45
Tabela 2 - Uso da água captada pelos poços.	45
Tabela 3 - Relação da entrada d'água com a litologia.....	46
Tabela 4 - Distribuição estatística dos dados observados.	47
Tabela 5 - Valor máximo permitido (VMP) e dados estatísticos dos valores de Ferro, Manganês, Fluoreto e Nitrato nos poços observados.	54
Tabela 6 - Valores médios referente aos parâmetros principais estudados.....	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 LOCALIZAÇÃO	11
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA / HIPÓTESE	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
1.4 OBJETIVOS E METAS.....	14
2. ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 FLÚOR	15
2.2 OCORRÊNCIAS CONHECIDAS DE FLUORETOS	15
2.3 INFLUÊNCIA DOS LINEAMENTOS	19
2.4 ESTATÍSTICA DOS POÇOS NA REGIÃO	20
2.5 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	20
2.5.1 CONDICIONANTES GEOLÓGICOS DE AQUÍFEROS FRATURADOS	26
2.6 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	26
2.7 CONTEXTO HIDROGEOQUÍMICO	27
3. METODOLOGIA	28
3.1 ETAPA I.....	28
3.1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1.2 LEVANTAMENTO DE POÇOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	29
3.1.3 SELEÇÃO DE POÇOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	30
3.1.4 MAPA DE PONTOS PRÉVIO.....	30
3.2 ETAPA II.....	30
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....	31
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA	37
3.2.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA	38
3.2.4 IDENTIFICAÇÃO DE LINEAMENTOS	38
3.3 ETAPA III.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 GEOLOGIA DA ÁREA E RELAÇÃO COM OS POÇOS	39
4.2 LINEAMENTOS	40
4.3 POÇOS SELECIONADOS	42
4.4 HIDROQUÍMICA, HIDROGEOQUÍMICA, HIDRODINÂMICA E ESTATÍSTICA	46
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

A utilização de água subterrânea nos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos é ampla, apesar de existir abastecimento municipal pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) - órgão responsável pela captação, tratamento e distribuição de água, bem como pela coleta e tratamento do esgoto sanitário em Porto Alegre - e pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) em Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos.

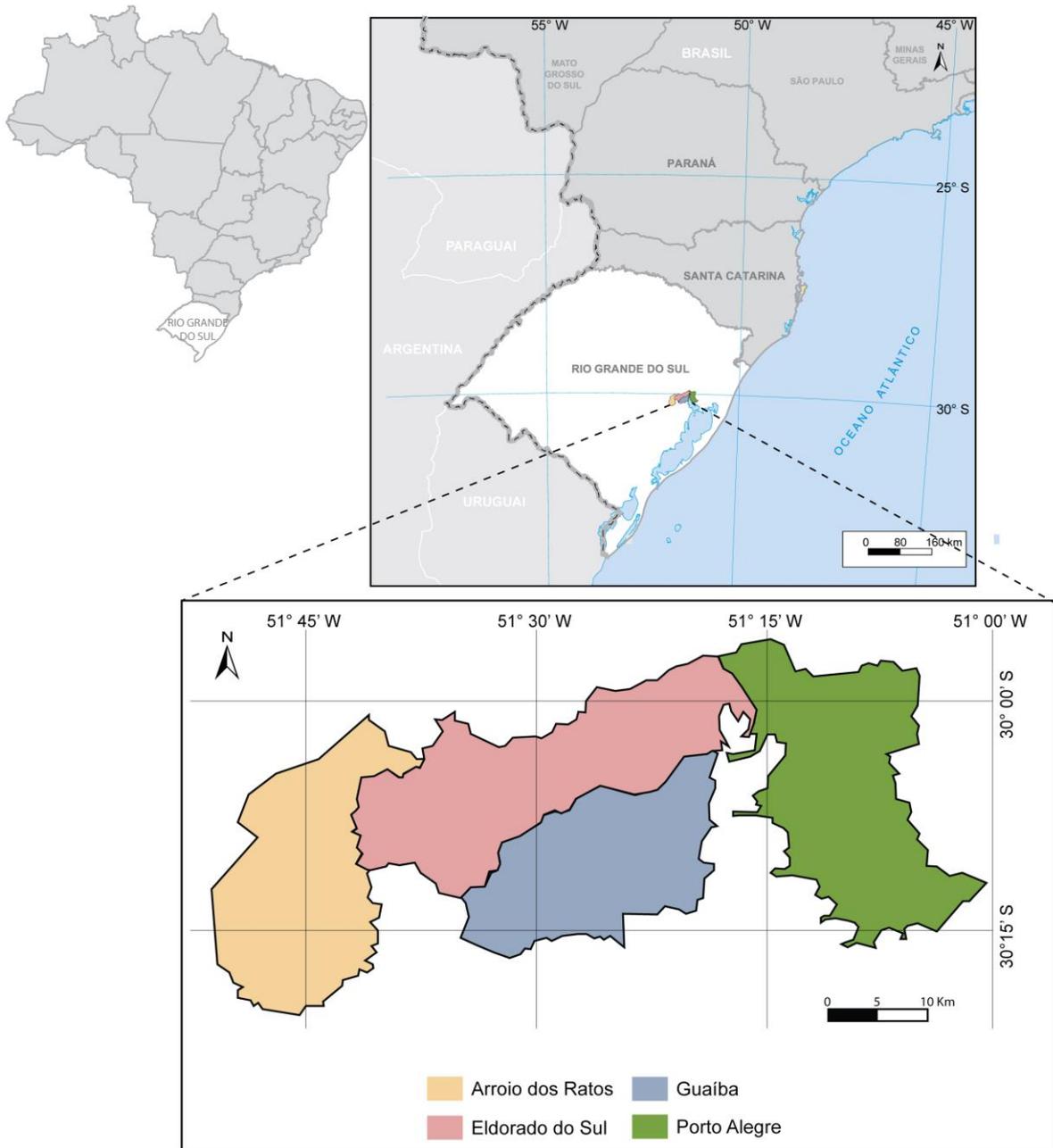
A captação de água subterrânea nesta região é feita no Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC) e no Sistema Aquífero Granular Cenozoico (SAGC). Estes aquíferos são influenciados pela litologia, tectônica e relevo que refletem a composição química da água e a produção dos poços.

Há registros de elevadas concentrações de fluoretos nas águas destes municípios, sendo assim necessário o conhecimento dos fatores condicionantes deste aumento.

1.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada aproximadamente entre os paralelos 29° 54' 00" S e 30° 21' 00" S e os meridianos 51° 00' 00" W e 51° 51' 00" W (Figura 1) e compreende o município de Porto Alegre e parte da região metropolitana, especificamente Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos. O estudo abrange uma área total de 1.809 km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2016) com uma população de 1.552.504 pessoas segundo o último censo (2010).

Figura 1 - Localização dos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos.



Fonte - Elaborado pela autora com dados da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) e do IBGE.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA / HIPÓTESE

Nos municípios citados há ocorrência de poços de água subterrânea com concentrações de fluoreto acima de 0,9 mg/L. A Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde define que a concentração máxima de fluoreto em águas de consumo público é de 1,5 mg/L, em consonância com o prescrito pela Organização Mundial de Saúde (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2011). A Portaria 10/99 da Secretaria da Saúde do Estado do Rio Grande do Sul, mais restritiva, define que serão considerados dentro do padrão de potabilidade as águas que apresentarem a concentração de íon fluoreto dentro da faixa de 0,6 a 0,9 mg/L.

O consumo prolongado de água com concentrações de fluoreto acima dos limites de potabilidade estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde acarreta sérios problemas à saúde humana, como a fluorose dentária (concentração acima de 1,5 mg/L) e a fluorose óssea (concentração acima de 10 mg/L) (ELY, 1999; VIERO *et al.*, 2009). A fluorose dentária é uma doença endêmica, comum em várias regiões do Rio Grande do Sul (MARIMON *et al.*, 2013) e caracterizada pela destruição parcial do esmalte dos dentes, especialmente durante a mudança de dentição em jovens. Em casos mais severos ocorrem transformações em nível ósseo, principalmente em mulheres, comprometendo a integridade da coluna vertebral.

Apesar dos municípios de Porto Alegre, Guaíba e Eldorado do Sul serem abastecidos pelas águas do Lago Guaíba e o Município de Arroio dos Ratos por águas da Sanga/Arroio dos Ratos (CORSAN, 2017), há um grande número de poços de água subterrânea utilizados pela população e que estão locados no Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC), como registrado no banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Muitos desses poços registram elevadas concentrações de fluoreto e carecem de atenção principalmente pelas implicações na saúde humana e animal.

Para buscar explicar o problema das elevadas concentrações de fluoreto nas águas subterrâneas da área de estudo é necessário investigar quais os controles geológicos que atuam nessa região. Sabe-se que um dos controles mais importantes se refere à natureza das rochas granito-gnáissicas que constituem o aquífero fraturado. Neste caso, a afinidade química mais alcalina favorece o registro de

maiores teores de flúor, em razão da presença de minerais como fluorita, flúor-apatita, minerais ferromagnesianos sódicos, entre outros.

A hipótese que o presente estudo sugere é de que as elevadas concentrações de fluoreto na área em estudo são decorrentes da interação entre água subterrânea e as litologias granito-gnáissicas que constituem o aquífero fraturado.

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo se justifica pelas implicações diretas que possui no manejo das águas subterrâneas da região, tratando-se de tema relevante voltado à preservação da saúde humana que pode ser profundamente afetada pelo consumo de águas com altas concentrações de fluoreto.

Pretende-se que os resultados obtidos contribuam para aprimorar a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, otimizando os estudos de locação de poços tubulares, através de parâmetros que estabeleçam áreas e condições com menores concentrações de fluoreto nas águas.

1.4 OBJETIVOS E METAS

O objetivo geral do estudo é identificar a origem e os controles geológicos responsáveis pelas altas concentrações de fluoreto na porção nordeste do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano, correspondente aos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Estabelecer a distribuição das concentrações de fluoreto em poços de água subterrânea na região nordeste do Escudo Sul-Riograndense, correspondente aos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos.
- Reconhecer os tipos litológicos presentes na área a partir dos trabalhos selecionados com o objetivo de correlacionar com a composição hidrogeoquímica das águas subterrâneas.
- Demarcar os lineamentos nos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos/RS.

2. ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FLÚOR

O flúor é o mais eletronegativo dos elementos (PAULING, 1960) e também o mais reativo, podendo se ligar a maior parte dos elementos e formar fluoretos por ligações covalentes ou iônicas. Ocorre naturalmente apenas como um isótopo com número de massa 18,998 e configuração eletrônica $1s^2 2s^2 2p^5$, é um elemento gasoso e o mais leve do grupo dos halogênios, porém possui alguns comportamentos químicos distintos em relação ao grupo. Em solução, forma o íon fluoreto, sendo este o único estado de oxidação conhecido, salvo algumas variedades em condições de baixo pH, como é o caso do ácido fluorídrico (HF) e também menos comumente complexado na forma de ácido silícico.

O flúor (F_2) em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) é um gás de coloração amarelo-claro. É corrosivo, o que permite reagir com uma grande quantidade de substâncias orgânicas e inorgânicas. Possui odor pungente detectável em concentrações muito baixas (a partir de 0,02 ppm), abaixo do limite de exposição prejudicial à saúde. O ponto de ebulição do flúor é -188°C e o de fusão -223°C , a densidade relativa do líquido é 1,5 a -188°C e quanto à solubilidade na água é reativo (CETESB, 2017).

A dissolução de fluoreto é possível apenas em condições físico-químicas favoráveis e com tempo de residência longo o suficiente (KULLENBERG; GUPTA, 1973; HANDA, 1975). Geralmente o flúor, devido à sua alta reatividade, aparece na forma de fluoreto nas águas naturais (LEUNG; HRUDEY, 1985).

2.2 OCORRÊNCIAS CONHECIDAS DE FLUORETOS

Na Índia, o fluoreto dissolvido nas águas subterrâneas possui predominantemente origens relacionadas à litologia (granitos, gnaises, basaltos, diabásio, quartzitos, pegmatitos, sienitos) e aos minerais constituintes (hornblenda, biotita, muscovita, flúor-micas, flúor-apatita, criolita, villuamita, fluorita, etc) (SAXENA; AHMED, 2002). A interação rocha-água é o principal processo em que os minerais ricos em fluoreto são decompostos ou dissociados da rocha fonte e o fluoreto é então dissolvido na água subterrânea por dissolução (WENZEL; BLUM, 1992; BARDBEN; BJORVATN; SELVIG, 1996). A dissolução dos minerais contendo flúor para explicar

a concentração de fluoretos nas águas subterrâneas é mais importante que a quantidade de minerais ricos em flúor presentes na rocha. Esta dissolução é favorecida por um pH mais alcalino (SAXENA; AHMED, 2002). A concentração de fluoreto depende também do tempo de residência da reação química.

Segundo WEDEPOHL (1978) e GACIRI e DAVIES (1993), nos anfibólitos das rochas metamórficas estudadas, a presença de flúor varia de 30 a 21000 ppm. Estes estudos no Quênia indicam que o intemperismo nas rochas alcalinas, particularmente nas constituídas por anfibólitos sódicos, pode constituir uma fonte de fluoreto (GACIRI; DAVIES, 1993).

Ao sul da Bacia de Zhungeer, a presença de rochas de composições graníticas é bem distribuída ao longo das áreas com altas concentrações de fluoreto em águas subterrâneas (LIU e ZHU, 1989), e a litologia é composta principalmente por granitos potássicos, hornblenda granitos, granodioritos e hornblenda-biotita-granito (LIU e ZHU, 1991). A concentração do íon fluoreto é diretamente proporcional ao valor de pH e a quantidade de Na e inversamente proporcional à quantidade de Ca, logo em geral uma água básica hidrocarbonatada sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$) com alto pH favorece a concentração de fluoretos (LIU e ZHU, 1991). Altas concentrações de Na aumentarão a solubilidade da fluorita nas águas subterrâneas (APAMBIRE *et al.*, 1997)

KIM e JEONG (2005) demonstram que nos granitos alcalinos finos a médios e no biotita granito do Cretáceo Superior/Terciário Inferior estudados na área de Pohang-Gyeongju/Coreia, os poços de água subterrânea mais profundos que 500 m contêm, geralmente, concentrações muito altas (média de 9,43 mg/L) de fluoreto, indicando que a concentração é maior em ambientes mais profundos.

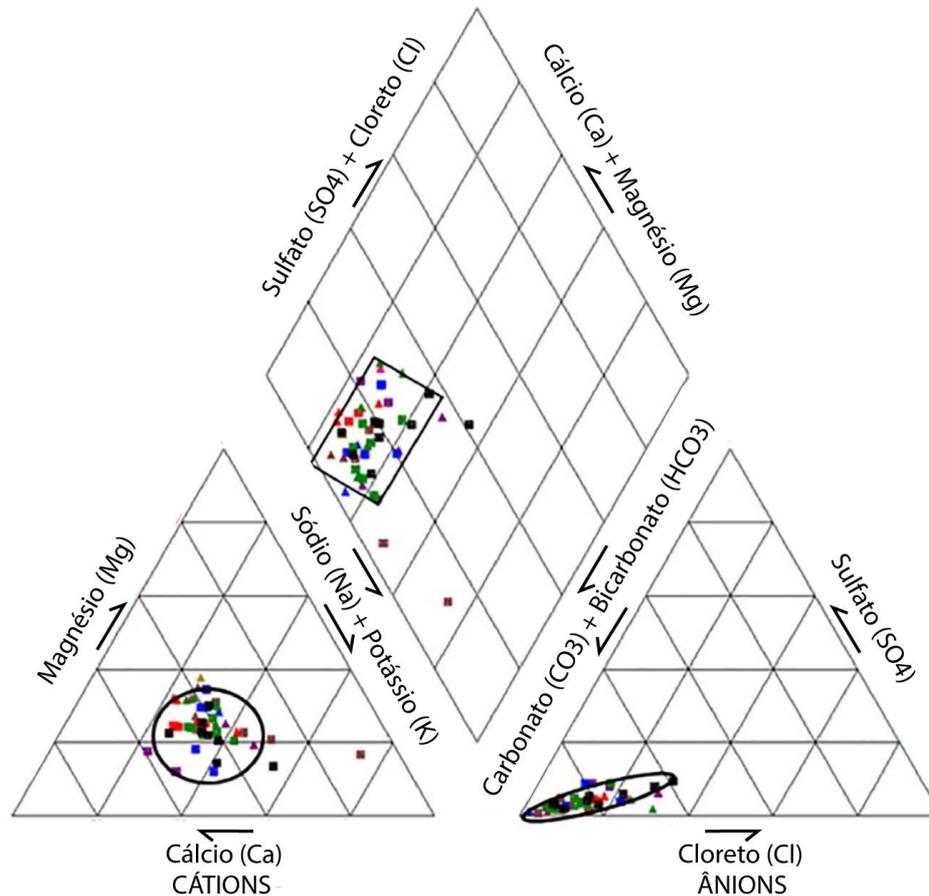
Dados de APAMBIRE *et al.* (1997) na porção norte de Gana, demonstraram que entre as litologias estudadas as concentrações mais altas de fluoreto (média de 2,29 mg/L, com mínimo de 0,61 mg/L e máximo de 4,60 mg/L) na água subterrânea aconteceram na Suíte Granítica Bongo. O Granito Bongo é um granito grosso rosa com fenocristais de microclínio bem desenvolvidos, euédricos a subédricos, com até 1 cm de comprimento, cristais euédricos de anfibólio, quartzo granular intersticial, plagioclásio, pouca biotita e fluorita como acessório-traço (MURRAY, 1960). Essas rochas contêm altas proporções de álcalis, o que indica que são uma suíte granítica alcalina (MURRAY, 1960). A fonte principal do F^- é provavelmente a dissolução da

fluorita (CaF_2) porque, ao contrário das outras rochas da área, há uma correlação moderadamente positiva entre Ca e F⁻. Logo, os teores anômalos de fluoreto nas águas subterrâneas associados aos granitoides Bongo são relacionados com a dissolução massiva de fluorita e também da dissolução e troca de ânion dos minerais micáceos, sendo a dissolução da fluorita a fonte principal.

CRAIG *et al.* (2018), ao estudarem a porção nordeste de Gana em busca de novas opções para localizar poços em águas com concentrações mais baixas de fluoreto verificaram que, conforme esperado, as áreas próximas ao Granito Bongo continham altas concentrações de fluoreto (acima de 4,6 mg/L). As áreas mais distantes (aproximadamente 1000 m) do Granito Bongo apresentavam a menor concentração de fluoreto na água (menor que 0,5 mg/L) e um risco menor de fluorose na população. A difração de raios x mostrou que quase todas as amostras eram compostas de principalmente quartzo e feldspatos (plagioclásio e microclínio), com menor quantidade de anfibólio, calcita, biotita e fluorita. A geologia desta área apresenta duas principais rochas no embasamento, o Granito Bongo e um hornblenda-biotita-tonalito, com ocorrências menores de granodiorito e diorito. O Granito Bongo contém biotita e anfibólio, ambos minerais que podem conter flúor (BOYLE, 1976). Há apenas um poço, relativamente raso e com alta taxa de recarga por precipitação, com concentração baixa de fluoreto próximo ao Granito Bongo, com baixo pH e bicarbonato além de contaminantes oriundos da superfície que causam aumento de nitratos, cloreto, sódio e potássio. O poço com elevada concentração de fluoreto é localizado em uma espessa camada de rocha (Granito Bongo presumido). Com o uso do diagrama de Piper e de Stiff, CRAIG *et al.* (2018) verificaram que o ânion predominante é o bicarbonato e os cátions em geral são mais distribuídos, com o cálcio dominando levemente na maioria das amostras (Figura 2).

A fluorita (CaF_2) é a principal fonte de flúor (PEÇANHA, 2001) e pode ser encontrada em granitos, gnaisses-graníticos e pegmatitos (DESHMUKH; WADASKAR; MALPE, 1995; RAMA RAO, 1982).

Figura 2 - Diagrama de Piper com amostragem de água de oito comunidades coletadas em poços abertos e em poços perfurados na porção nordeste de Gana. (Triângulo: poço perfurado; quadrado: poço aberto); (Comunidades mais próximas ou localizadas no Granito Bongo - vermelho: Done, roxo: Nayire, rosa: Tendongo, dourado: Abungo); (Comunidades mais distantes do Granito Bongo – preto: Awake, azul: Abasikomah, verde: Koom, marrom: Akaamo).



Fonte - Extraído de CRAIG *et al.* (2018) e traduzido pela autora.

De um modo geral, é necessário um expressivo tempo de residência das águas interagindo com a rocha, para que o enriquecimento em fluoreto seja significativo, além de condições favoráveis, tendo em vista que as concentrações de alguns íons complexos como Fe, Al, B, Si, Mg e H, além de Ca, Na e do íon OH^- têm influência direta nos valores de dissolução. Quando a concentração de Ca presente é acima do limite para a solubilidade da fluorita pode haver diminuição e até inibição desta dissolução, pois Ca e F possuem uma correlação negativa bastante expressiva em águas que contêm altos valores de Ca (BOYLE, 1976, 1992; EDMONDS, 1971; VOROSHELOV, 1966).

É comum relacionar o enriquecimento em fluoreto das águas subterrâneas com a relação prolongada entre água e rocha (BANKS *et al.*, 1995; CARRILLO-RIVERA; CARDONA; EDMUNDS, 2002; FRENGSTAD *et al.*, 2001; GIZAW, 1996;

NORDSTROM *et al.*, 1989), portanto a composição litológica é um fator importante para a concentração do íon em águas subterrâneas. Estudos mostram que geralmente aquíferos em granitos alcalinos e em rochas metamórficas são enriquecidos em fluoreto (BANKS *et al.*, 1998; BOTHA; VAN ROOY, 2001; DOWGIALLO, 2000; SHANKER *et al.*, 2003).

A concentração de fluoretos nas águas subterrâneas depende de fatores como temperatura, pH, presença ou não de íons complexos e coloides, solubilidade dos minerais com flúor, capacidade de troca dos ânions (OH^- por F^-), o tamanho e tipo das formações geológicas cortadas pela água e o tempo que a água ficou em contato com determinada litologia (APAMBIRE *et al.*, 1997).

A ocorrência do íon fluoreto no Aquífero Cristalino na região de Salto/SP pode estar associada à hidrólise de biotitas ou anfibólios de rochas graníticas (EZAKI, 2009). Nesta área, nas rochas graníticas, há a presença de minerais ferromagnesianos ricos em flúor (GALEMBECK, 1997).

2.3 INFLUÊNCIA DOS LINEAMENTOS

Sobre os lineamentos tectono-estruturais, alguns estudos prévios mostram que estes possuem ação direta no condicionamento de fluxo e transporte das águas subterrâneas e na própria produtividade dos poços.

CUNHA *et al.* (2016) mostraram que uma maior densidade de lineamentos (709 lineamentos), bem distribuídos por toda a Folha Chapecó, na direção N-Ne, constituem o padrão de direção mais expressivo. Todas as fácies hidroquímicas encontradas na região do estudo possuem uma forte correlação positiva com áreas de alta densidade de lineamentos. As águas da fácies CaMg são exclusivamente bicarbonatadas em termos de ânions, entretanto, considerando apenas os cátions, predominam as águas cálcicas ou magnesianas e em menor quantidade sódicas, representando 86% e 14% respectivamente. CUNHA (2010), indicou que o fluxo regional das águas subterrâneas se faz na direção do Rio Uruguai, de sudeste para noroeste. Comparando os trabalhos, é visto que a fácies CaMg se distribui predominantemente em áreas de recarga do Sistema Aquífero Serra Geral. Os dados hidrogeoquímicos sugerem que estas águas possuem baixo tempo de residência e se relacionam com a recarga pluviométrica, demonstrada pelos valores mais baixos de

pH e Sólidos Totais Dissolvidos (STD). A integração dos dados e a comparação entre a distribuição das fácies hidrogeoquímicas e os elementos estruturais mostrou correlações evidentes entre a densidade de lineamentos e os grupos químicos (CUNHA *et al.*, 2016).

2.4 ESTATÍSTICA DOS POÇOS NA REGIÃO

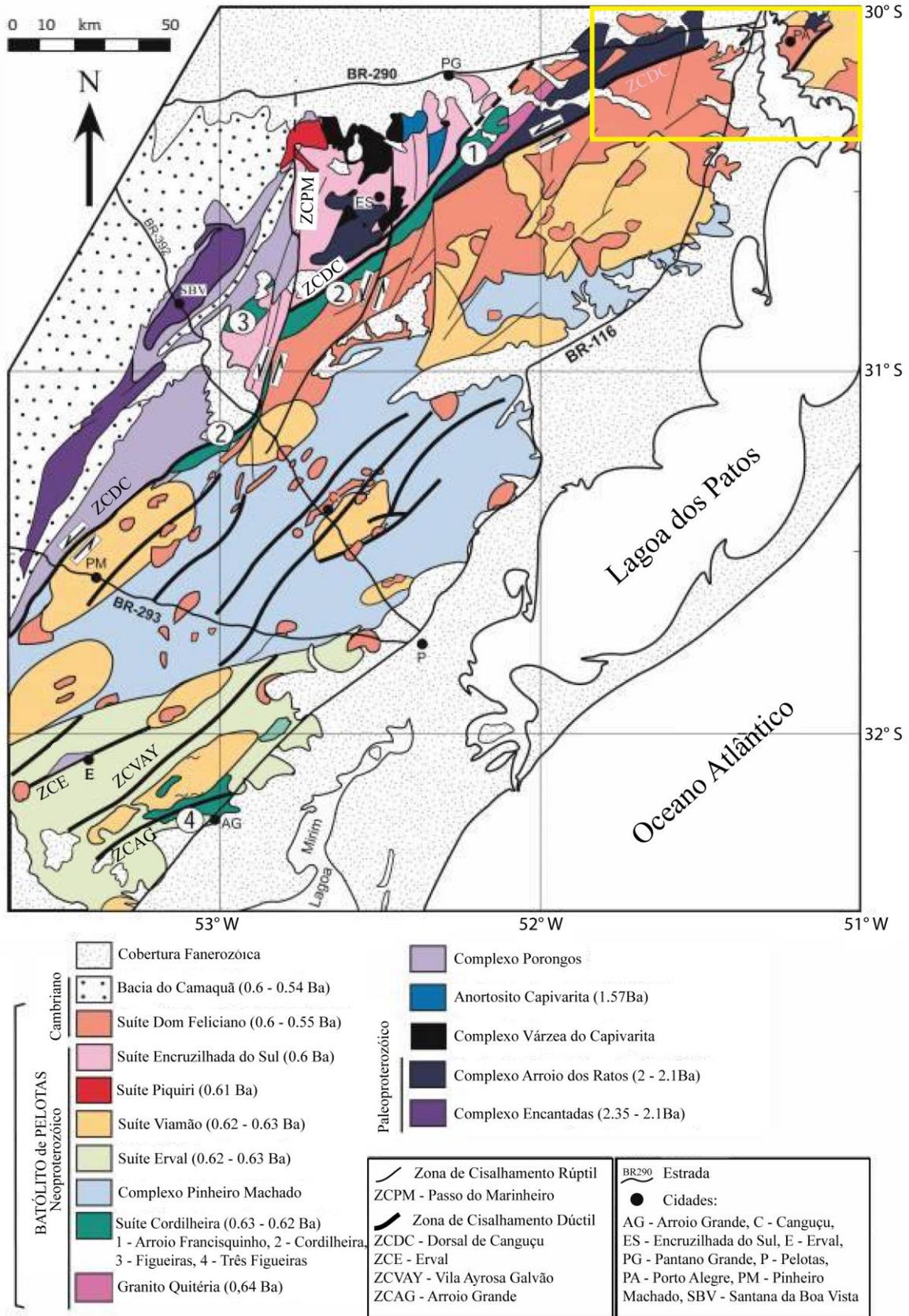
Na região leste do Escudo Sul-Riograndense estão cadastrados cerca de 1.200 poços no banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), e destes, 283 apresentam dados hidrogeoquímicos referentes à concentração de fluoreto. Dos 283 poços, 122 possuem concentração de fluoreto maior que 0,9 mg/L. Tendo em vista esta condição, a área abrangida no presente estudo foi selecionada por conter 75 poços com elevadas concentrações de fluoreto. Estes poços serão estudados em detalhe, com foco na identificação dos controles geológicos na distribuição do íon fluoreto em água subterrânea.

2.5 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudos (Figura 3) está situada na porção norte do Batólito de Pelotas, representada pela Suíte Dom Feliciano, Suíte Viamão e Complexo Arroio dos Ratos (PHILLIP; PIMENTEL; CHEMALE, 2016) e o Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC) é formado por estas litologias.

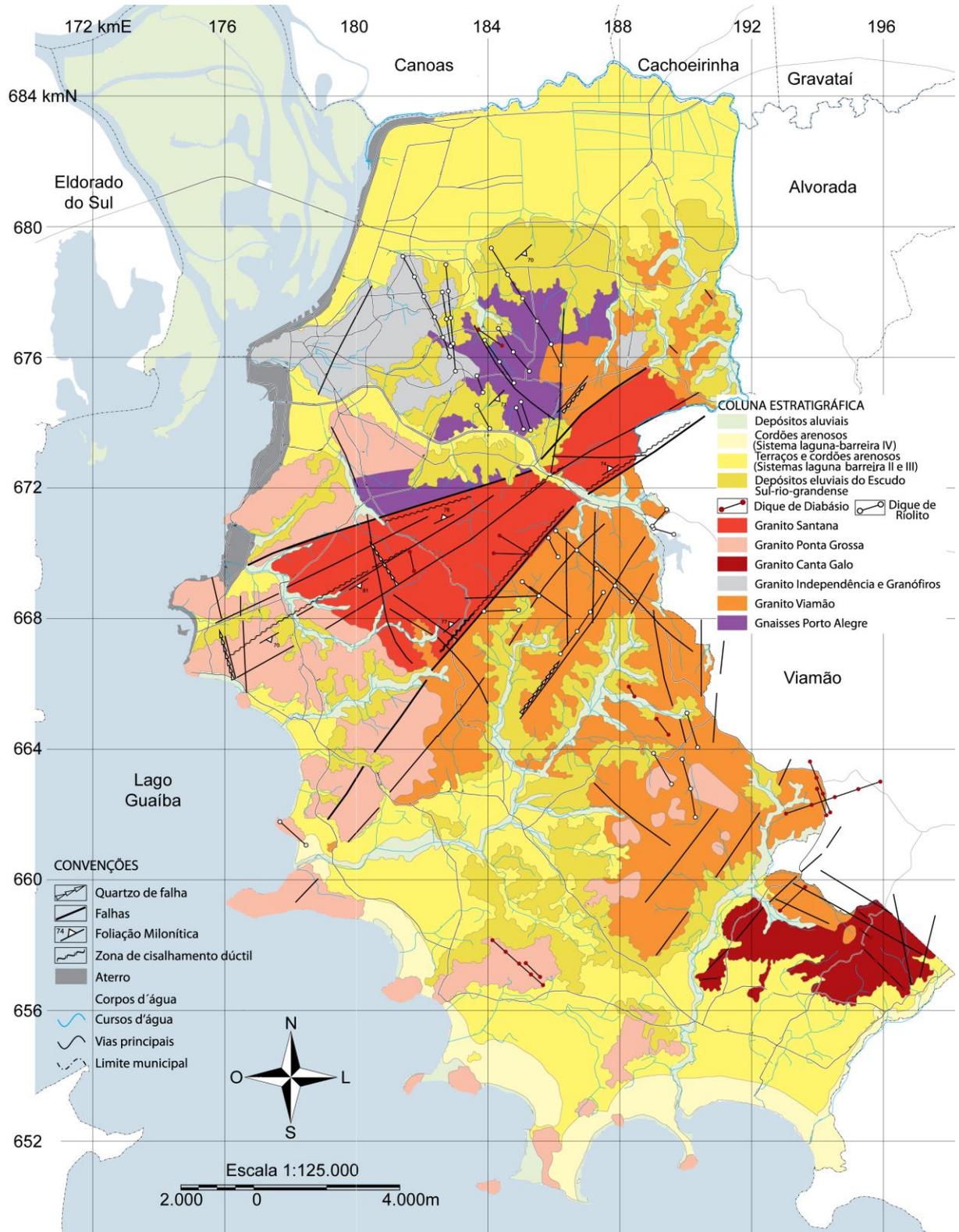
O Município de Porto Alegre (Figura 4) apresenta diferentes litologias ígneas e metamórficas que são do interesse do presente estudo por possuírem possível correlação com as concentrações de fluoreto observadas. São divididas em gnaisses e granitos – Gnaisses Porto Alegre, Granito Viamão, Granito Independência, Granito Canta Galo, Granito Ponta Grossa e Granito Santana – e alguns diques riolíticos, dacíticos e de diabásio, formando um embasamento pré-cambriano (SCHNEIDER *et al.*, 1974; PHILIPP; RÉGO; SIVIERO, 1994; PHILIPP, 1995; PHILIPP, 1998; PHILIPP; NARDI; MACHADO, 1998). Além destas, Porto Alegre também apresenta rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados, como os depósitos eluviais do Escudo Pré-Cambriano, terraços e cordões arenosos (Sistemas Laguna-Barreira II, III e IV) e como os depósitos aluviais formadores da cobertura sedimentar quaternária (DELANEY, 1965; SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974; VILLWOCK; TOMAZELLI., 1995).

Figura 3 - Mapa do Batólito de Pelotas. No retângulo em amarelo está a área aproximada de estudo com as litologias correspondentes (Suíte Dom Feliciano, Suíte Viamão e Complexo Arroio dos Ratos).



Fonte - Extraído de PHILLIP *et al.* (2016) e traduzido pela autora.

Figura 4 - Mapa geológico de Porto Alegre.



Fonte - Extraído de HASENACK *et al.* (2008) e modificado pela autora.

Os Gnaisses Porto Alegre (PHILIPP, 1998; PHILLIP e CAMPOS, 2004), descritos originalmente como migmatitos heterogêneos por SCHNEIDER *et al.* (1974), posteriormente foram caracterizados como ortognaisses – gnaisses tonalíticos e granodioríticos, com ocorrência localizada de gnaisses dioríticos (PHILIPP; RÊGO; SIVIERO, 1994; PHILIPP, 1998). Trabalhos em sequência o designaram como Gnaisses Chácara das Pedras (MENEGAT *et al.*, 1998; OLIVEIRA; KOESTER; SOLIANI JR., 2001). Apresentam bandamento fino pouco contínuo a contínuo, regulares, marcado pela alternância de níveis félsicos sub-horizontais, estirado, exibindo dobras isoclinais intrafoliais e níveis de minerais máficos. A mineralogia principal é constituída por plagioclásio, quartzo e biotita, com poucas proporções de anfibólio. Afloramentos possíveis de identificar os Gnaisses Porto Alegre podem ser encontrados nos bairros Chácara das Pedras, Três Figueiras e Petrópolis (HASENACK, 2008).

O Granito Viamão (PHILIPP, 1998) compõe litologias definidas inicialmente como migmatitos homogêneos (SCHNEIDER *et al.*, 1974). Composicionalmente são monzogranitos com granodioritos associados. É composto por K-feldspato (ortoclásio-microclínio), plagioclásio e quartzo, com biotita como máfico principal. Os minerais acessórios são zircão, apatita, alanita, titanita e opacos (HASENACK, 2008). A matriz é equigranular grossa a média. A principal estrutura que apresenta é uma foliação de fluxo magmático definida pelo K-feldspato, biotita e enclaves máficos. Possui também xenólitos pertencentes aos Gnaisses Porto Alegre.

O Granito Independência (PHILIPP, 1998) possui composição sienogranítica a, subordinadamente, monzogranítica. A textura predominante é equigranular média grossa – com termos secundários de textura fina – com a ocorrência localizada de textura inequigranular definida por cristais de K-feldspato. Mineralogicamente é composto por K-feldspato (ortoclásio, com pouco microclínio), plagioclásio e quartzo, com alguma biotita. A mineralogia acessória é de titanita, zircão, apatita, alanita, opacos e turmalina. A estrutura do granito é maciça, porém, na proximidade do contato com o Granito Santana, ocorrem faixas centimétricas de protomilonitos, mostrando forte orientação de biotita, estiramento de quartzo e orientação irregular de K-feldspato. Nos afloramentos da Av. Protásio Alves é frequente a presença de corpos cortando as litologias dos Gnaisses Porto Alegre. Além disso é comum a presença de xenólitos dos Gnaisses Porto Alegre (HASENACK, 2008).

O Granito Canta Galo (PHILIPP, 1998) apresenta textura equigranular grossa a inequigranular definida por cristais de K-feldspato. A mineralogia é de K-feldspato, plagioclásio, quartzo e biotita. A estrutura é predominantemente maciça, exibindo localmente foliação de fluxo magmático pela orientação de cristais de microclínio, biotita e quartzo.

O Granito Ponta Grossa (PHILIPP, 1998) é um leucogranito de cor rosada a avermelhada. A composição é sienogranítica e a textura dominante é equigranular média a grossa, ocorrendo também a existência de feições deformacionais frágeis pela cataclase do quartzo e do K-feldspato, em zonas milimétricas a centimétricas de cisalhamento. A mineralogia é composta por K-feldspato, quartzo, pouco plagioclásio e, em pequena quantidade, biotita intersticial parcialmente cloritizada e mostrando substituição por epidoto, muscovita e titanita. Titanita, zircão, alanita, magnetita, apatita e, raramente, fluorita de cor violeta, são os acessórios presentes.

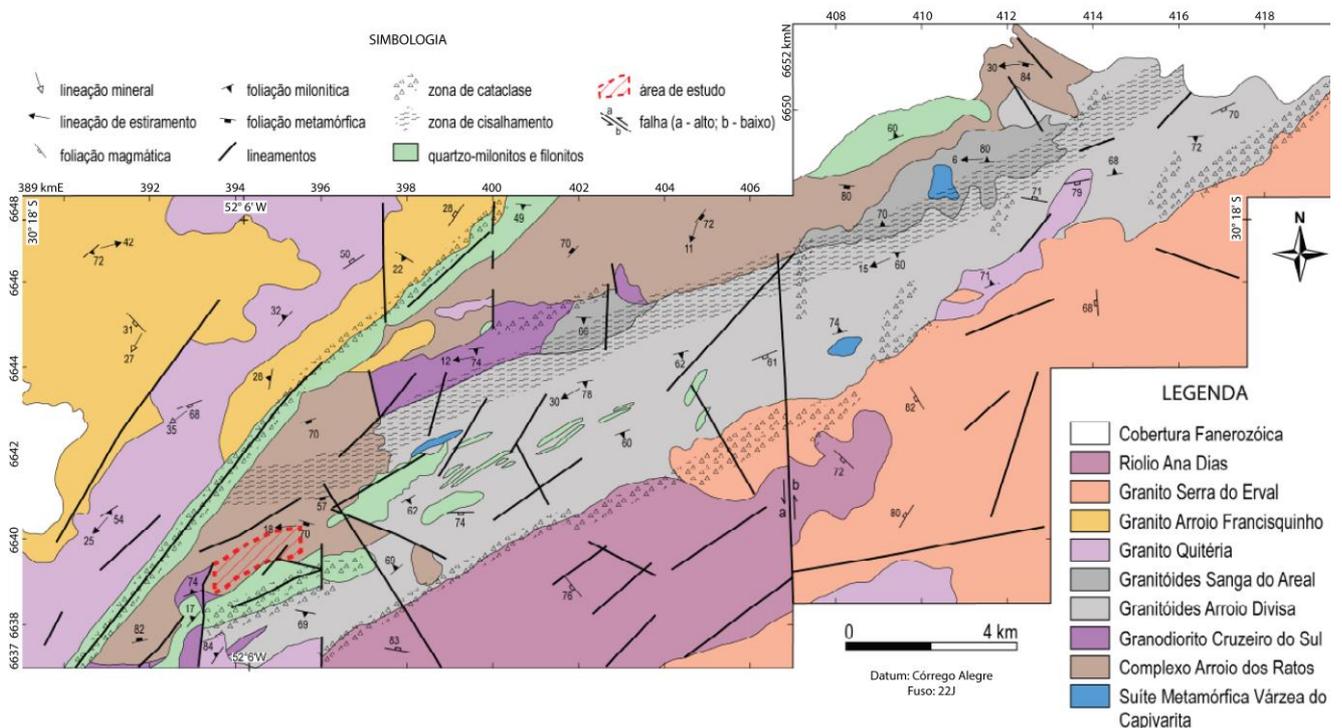
O Granito Santana (PHILIPP, 1998) é composicionalmente constituído por ortoclásio-microclínio granito e apresenta textura equigranular média a grossa. A estrutura do granito é bem marcada por uma foliação definida pela orientação do K-feldspato e biotita. Em porções mais deformadas a rocha adquire uma textura protomilonítica com a recristalização do K-feldspato e do quartzo para pequenos cristais. A constituição mineralógica é dominada por K-feldspato e quartzo, com muito pouco plagioclásio e rara biotita como mineral máfico principal. A mineralogia acessória é composta por titanita, zircão, apatita, alanita e opacos. Há a ocorrência de paragênese metamórfica de epidoto, clorita, opacos anédricos, mica branca, titanita e carbonato, relacionada a zonas de cisalhamento dúcteis.

Os depósitos pleistocênicos e holocênicos representam o Quaternário (VILLWOCK, 1972; VILLWOCK, 1984; VILLWOCK *et al.*, 1986; TOMAZELLI; VILLWOCK; LOSS, 1987; VILLWOCK; TOMAZELLI, 1995). Os leques aluviais, alimentados pelo Escudo Pré-Cambriano, foram formados no Pleistoceno e têm como área fonte as rochas metamórficas e ígneas do Escudo Sul-Riograndense. As texturas e mineralogias imaturas são resultado da área granítica e da distância reduzida de transporte, sendo representadas por diamictitos, conglomerados, arenitos e lamitos. Eventos transgressivos geraram a Barreira II há 325 mil anos (terraços arenosos), a Barreira III há 120 mil anos (cordões arenosos) e a Barreira IV há 5 mil anos (cordões

arenosos). Também ocorrem depósitos deltaicos, terraços e planícies fluviais com gênese nos eventos transgressivos de 120 mil anos e 5 mil anos, tendo a presença de sedimentos aluviais ao longo dos arroios.

O Complexo Arroio dos Ratos (GREGORY, 2010) (Figura 5) faz parte do embasamento do Batólito de Pelotas. Possui um conjunto de rochas tonalíticas (granada-biotita metatonalitos de textura média a grossa) a dioríticas (metadioritos de textura fina, com granada restrita aos termos mais diferenciados) foliadas intrudidas discordantemente por rochas de composição similar. O embasamento destas litologias são gnaisses calcissilicáticos, gnaisses tonalíticos e rochas metavulcano-sedimentares. O metamorfismo é de fácies anfibolito superior a granulito, atribuído à recristalização da textura granoblástica. Os metatonalitos e metadioritos são meta a peraluminosos e pertencem à série cálcio-alcalina médio a alto potássio.

Figura 5 - Mapa geológico da região de Quitéria-Serra do Erval. Em tracejado vermelho a indicação da área de estudo do autor.



Fonte - Extraído de GREGORY (2010).

ROISENBERG *et al.* (2003) discorrem que o flúor em teores elevados na maioria dos poços do Sistema Aquífero Fraturado não está correlacionado com a composição mineralógica das unidades granítico-gnáissicas, defendendo que estas têm contribuição insignificante nos valores de concentração do ânion nas águas subterrâneas. Discutindo a proposição agora citada e em vista dos estudos realizados

na Coreia, Gana, Índia, Noruega e Salto/SP, os quais demonstraram a forte influência da litologia dos sistemas aquíferos associados, e somado ao estudo preliminar realizado referente à área de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos, levanta-se a hipótese de que as elevadas concentrações de fluoreto na área em estudo são decorrentes da interação entre água subterrânea e as litologias granito-gnáissicas que constituem o aquífero fraturado.

2.5.1 CONDICIONANTES GEOLÓGICOS DE AQUÍFEROS FRATURADOS

Os elementos geológicos comumente associados a fatores condicionantes à circulação de água nos aquíferos fraturados são: a tectônica, os lineamentos, o manto inconsolidado, a litologia, o compartimento topográfico e a profundidade (FERNANDES, 2008).

A tectônica controla as propriedades das fraturas, como abertura, densidade e direção, além disso a densidade, direção, intersecção e proximidade de lineamentos exerce uma grande influência na produção dos poços de uma área porque comandam a conectividade de fraturas. O manto inconsolidado tem uma importante função na recarga do aquífero, pois uma maior permeabilidade permite maior condutividade hidráulica. As diferentes litologias podem apresentar descontinuidades prévias, como bandamento, acamamento e contatos, o que delimita os principais caminhos para o fluxo d'água, além da rocha exercer influência composicional na água que percola. O compartimento topográfico exerce controle sobre a saturação de fraturas superficiais e do manto inconsolidado (como no caso dos vales em que o nível d'água é mais próximo à superfície). A profundidade controla a transmissividade das fraturas verticais (e diminui consideravelmente a partir de 300 m de profundidade) e das horizontais (que diminui a partir de 30 m), pois quanto mais profundo maior a pressão litostática.

2.6 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

A hidrogeologia dos municípios de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos é caracterizada pela ocorrência dos Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC) e Sistema Aquífero Granular Cenozoico (SAGC).

O SAFPC apresenta litologias granito-gnáissicas do embasamento pré-cambriano e é intensamente fraturado, possuindo assim características

hidrodinâmicas e hidrogeoquímicas muito heterogêneas. Os poços tubulares construídos neste aquífero são geralmente profundos, com entrada d'água exclusivamente nas fraturas das rochas granito-gnáissicas ou com entradas de água na cobertura sedimentar e nas fraturas. Segundo ROISENBERG *et al.* (2003), no município de Porto Alegre, o pH varia de 6,5 a 7, a profundidade média dos poços é de 93 metros (com variação de 30 e 202 metros), o nível estático varia de 0,1 a 29,9 metros de profundidade (com uma média de 7,2 metros), enquanto o nível dinâmico tem uma variação de 5 a 180 metros (com valor médio de 54,7 metros). A vazão média é de 3,8 m³/h (variando de 0,1 a 35,3 m³/h) com uma capacidade específica máxima de 2,27 m³/h e valor máximo de 0,26 m³/h.

O SAGC é constituído de depósitos de leques aluviais, lagunares, flúvio-lacustres e aluvionares atuais. Forma aquíferos intergranulares extensos e livres ou semiconfinados com espessura média de 30 metros. Conforme ROISENBERG *et al.* (2003), os poços construídos em Porto Alegre sobre os depósitos de leques aluviais possuem profundidade média de 38 metros, com vazões médias de 5 m³/h, apresentando nível estático médio de 4,9 metros (variando de 0,8 a 6,3 metros) e nível estático dinâmico médio de 12,4 metros (variando de 7,4 a 19,8 metros). O pH é entre 6,5 e 7 e as águas subterrâneas são salobras a salgadas onde os depósitos de leque ocorrem junto aos depósitos lagunares e flúvio-lacustres (relacionado às ingressões marinhas). Já os depósitos semiconsolidados de areia, argila e areia-silte, relacionados aos depósitos lagunares e flúvio-lacustres, segundo ROISENBERG *et al.* (2003), possuem um nível freático geralmente raso (menor que 1 metro) e as águas subterrâneas são salobras a salgadas, com cloreto superior a 1000 mg/L. A maioria dos poços construídos nos depósitos lagunares e flúvio-lacustres apresenta água com teores de ferro maiores que 0,3 mg/L (assim como manganês). As vazões médias são de 3 m³/h, com variação de 1 m³/h a 30 m³/h, em areias com grande permeabilidade. O nível estático médio é de 1,5 metros e o nível dinâmico médio não é superior a 10 metros.

2.7 CONTEXTO HIDROGEOQUÍMICO

O Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC) possui águas bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas, além de baixa a moderada mineralização, com resíduos totais entre 200 e 400 mg/L (ROISENBERG, 2003). As

variações compreendem tipos intermediários de composição cloretada-bicarbonatada-cálcico-sódica, com cloreto, sulfato, sódio, cálcio e magnésio enriquecidos, além de aumento nos resíduos totais.

No Sistema Aquífero Granular Cenozoico (SAGC), conforme RAMAGE (2005), as águas são sódico-cloretadas e variam até cálcico-sódico-bicarbonatadas, composição que indica mistura com o SAFPC pelo aumento de fluoreto. Possuem elevados valores de condutividade elétrica (até 6540 $\mu\text{S}/\text{cm}$), dureza (até 846,0 mg/L de CaCO_3), resíduos totais (até 2038 mg/L), bicarbonato (até 510,90 mg/L), cálcio (até 125,8 mg/L), cloreto (até 909,7 mg/L), sódio (740,3 mg/L) e sulfato (até 400,0 mg/L). Há um aumento nas concentrações dos principais íons onde há maior distância do SAFPC e maior espessura de sedimentos.

3. METODOLOGIA

Os métodos aplicados para realizar os objetivos e testar a hipótese do trabalho foram inicialmente divididos em três etapas sequenciais: pré-campo, campo e pós-campo. Porém, em vista das dificuldades técnicas apresentadas nos laboratórios, de uma melhor gestão de recursos financeiros e de tempo hábil disponível, além das sugestões de professores, a divisão do trabalho foi modificada. A etapa de campo foi suprimida devido ao fato de que Porto Alegre e região metropolitana possuem um grande volume de dados de geoquímica e petrografia referente às litologias do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano de interesse deste trabalho, estando assim bem mapeadas e caracterizadas.

3.1 ETAPA I

A etapa I (originalmente etapa pré-campo) compreendeu a revisão bibliográfica, o levantamento de poços de água subterrânea, a seleção de poços de água subterrânea e o mapa de pontos prévio.

3.1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica sobre a geologia da área e sobre a geoquímica do flúor foi realizada a partir da leitura e revisão de artigos, monografias, teses, dissertações, relatórios técnicos e legislação. Estas informações foram indispensáveis para estabelecer a base científica a ser utilizada no presente estudo, guiando a elaboração

do estado da arte e permitindo adotar as melhores práticas para o desenvolvimento do trabalho.

3.1.2 LEVANTAMENTO DE POÇOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

O levantamento foi realizado na área de estudo a partir de pesquisa dos registros do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), visando a aquisição de informações de poços tubulares em Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos para posterior organização de banco de dados para a pesquisa.

O objetivo do levantamento foi mapear os pontos com concentrações de fluoreto. Para isso, foi gerado um banco de dados contendo o endereço eletrônico da página (*source url*) e a concentração de F⁻ (Figura 6) a partir dos registros do SIAGAS. As informações citadas foram coletadas com o auxílio do *software* OutWit Hub e exportadas para uma planilha passível de ser aberta com o *software* Excel. O *software* OutWit Hub em sua versão gratuita busca 100 informações por vez, sendo assim o programa foi rodado 12 vezes para obter os 1200 poços iniciais da área total do Batólito de Pelotas. Com a utilização da macro no OutWit Hub não foi necessário abrir cada endereço individualmente para buscar concentrações de fluoreto de interesse, o que otimizou e agilizou consideravelmente o desenvolvimento do trabalho.

Figura 6 - Arquivo exportado para Excel a partir do OutWit Hub, demonstrando o endereço eletrônico e a concentração de fluoreto medida de forma automática.

Source Url	Fluor
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=430000806	0.7
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=430000831	0.17
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300001005	0.4
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300001006	0.3
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300001011	0.5
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300001012	0.6
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300001013	0.3
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300001016	0

Source Url	Fluor
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300024747	0.25
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300025284	2.2
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300025287	2.4
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300025323	1.6
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300025441	5.28
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/relatorio_impressao.php?ponto=4300025443	0.8

Fonte - Elaborado pela autora.

3.1.3 SELEÇÃO DE POÇOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A seleção dos poços, após o levantamento inicial, foi feita de forma manual (buscando por litologias de interesse e pela maior concentração de poços em determinada área). Após decidida qual seria a área de estudos, foi escrita e rodada no programa OutWit Hub uma segunda macro que leu mais 100 endereços de páginas do SIAGAS a cada vez e armazenou de forma automática dados relevantes previamente apontados no código desta macro. Com estes dados do SIAGAS foi possível obter a localização do poço, o tipo de aquífero (fissural/fraturado ou granular), a litologia, os dados construtivos (como a profundidade do poço e a profundidade de entrada de água) e dados hidroquímicos (pH, condutividade elétrica e concentrações de íons). Estes dados foram exportados para Excel novamente para serem refinados.

Os dados obtidos foram reduzidos com a exclusão de poços com concentração de fluoreto abaixo de 0,9 mg/L. A tabela final, com 75 poços, foi revisada e organizada conforme a litologia indicada no perfil construtivo do poço disponibilizado no SIAGAS. A tabela gerada foi utilizada em todas as fases subsequentes do trabalho.

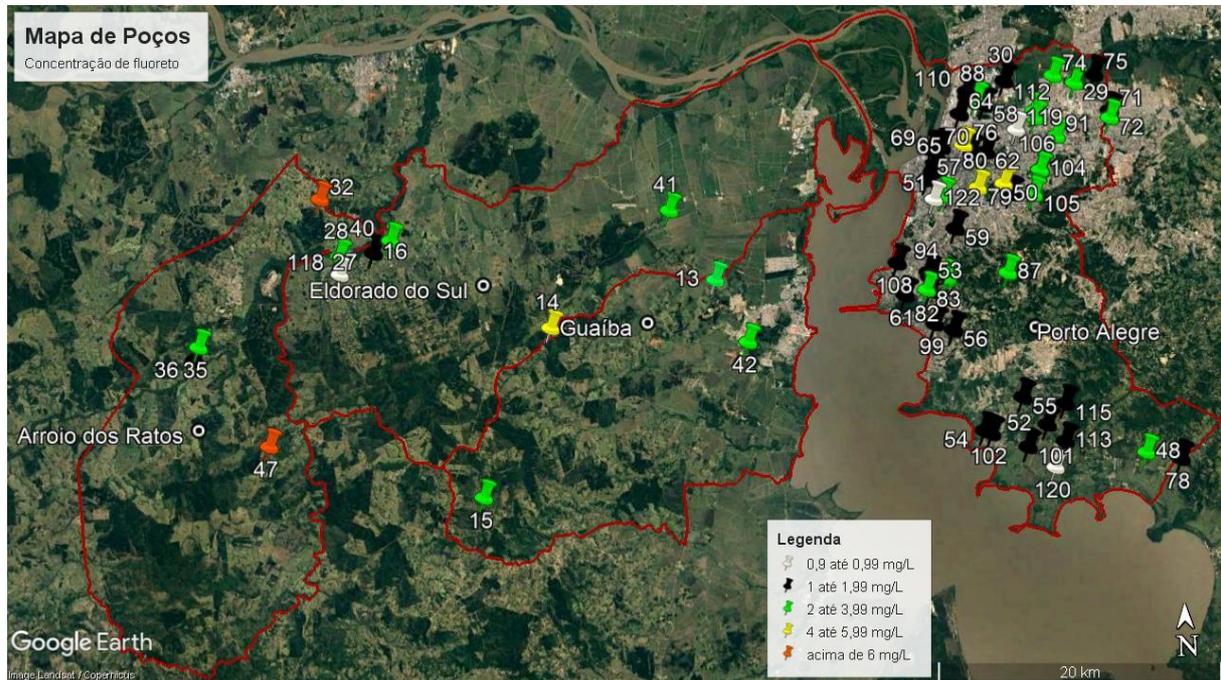
3.1.4 MAPA DE PONTOS PRÉVIO

Concomitante com a seleção de poços, foi realizada a confecção de um mapa de pontos prévio de forma expedita no *software* Google Earth Pro (Figura 7), tendo em vista que somente seriam estudados os pontos com ocorrência de poços de água subterrânea cujas concentrações de fluoreto identificadas estivessem acima de 0,9 mg/L (limite superior do padrão de potabilidade das águas, definido pela Portaria 10/99 da Secretaria da Saúde do Estado do Rio Grande do Sul) e dentro dos municípios de interesse. Este mapa de pontos inicial possibilitou uma visão geral da distribuição da concentração de fluoreto e norteou as atividades seguintes.

3.2 ETAPA II

A etapa II (originalmente etapa pós-campo) compreendeu a caracterização geológica, a caracterização hidroquímica, a caracterização hidrogeoquímica e a identificação de lineamentos.

Figura 7 - Mapa de pontos prévio com a delimitação dos municípios de Porto Alegre, Arroio dos Ratos, Eldorado do Sul e Guaíba. Os marcadores indicam o agrupamento realizado inicialmente em função das diferentes concentrações de fluoreto observadas.



Fonte - Elaborado pela autora com auxílio do software Google Earth Pro.

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A caracterização geológica foi realizada com a utilização do mapa geológico do Rio Grande do Sul - escala 1:750.000 (WILDNER *et al.*, 2008) - e com a análise dos dados litológicos disponíveis dos poços tubulares selecionados a partir do SIAGAS. A revisão bibliográfica, juntamente com a localização dos poços, auxiliou no refinamento da caracterização litológica.

Em PHILLIP (1998) o conjunto de dados utilizados para caracterizar as litologias do Batólito de Pelotas é proveniente das amostras coletadas pelo próprio autor, além de dados de outros autores. Os dados das análises realizadas por PHILLIP (1998) foram obtidos através de análise de rocha total por ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) e Fluorescência de Raios X, junto ao Activations Laboratories Ltd. (Canadá). Os elementos maiores foram obtidos por ICP-MS juntamente com o Ni e o Nb por Fluorescência de Raios X, com os limites de detecção para os mais variados elementos oscilando no intervalo de 0,05 a 1 ppm.

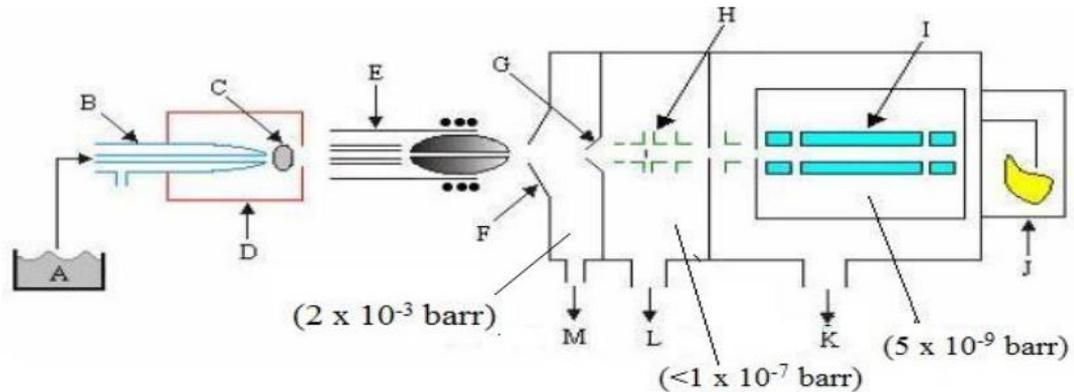
A espectrometria de massa é uma técnica analítica instrumental que separa espécies iônicas com base em suas razões massa/carga. É uma análise tanto

qualitativa (identificação do espectro de massas) como quantitativa, por gerar sinais analíticos proporcionais à concentração das espécies presentes na amostra. É uma técnica sensível que pode detectar até níveis de pg g^{-1} e também muito utilizada, pois serve para analisar misturas de substâncias sólidas, líquidas e gasosas. A espectrometria de massa pode ser utilizada na obtenção de informações em amostras orgânicas (estrutura, energia de ligação, cinética) e em amostras inorgânicas (detecção de isótopos para determinar a composição elementar e isotópica) (BARBOUR, 2011). A partir de um experimento desenvolvido por Thomson com raios catódicos em 1912, originou-se a espectrometria de massa. Neste experimento, os átomos do gás Ne foram ionizados e acelerados através de um cátodo oco, sob ação de um campo magnético e de um campo elétrico, o que fez com que os íons se dispersassem, descrevendo trajetórias separadas. Estas trajetórias, ao atingir uma tela fosforescente, produziram duas parábolas, correspondentes aos isótopos de Ne. Então, para ser utilizado como método analítico é necessário ter uma fonte de energia para gerar íons, um sistema para transportar eficientemente estes íons gerados para o espectrômetro onde serão separados e então enviados para o detector. O percurso livre médio para conduzir os íons deve ser longo o suficiente para que estes alcancem o detector sem colisões (o que causaria perda e/ou transformações dos íons). Este percurso livre médio depende do tamanho dos íons e da temperatura, além de ser inversamente proporcional ao vácuo do meio (BARBOUR, 2011). O transporte dos íons ocorre em trajetórias que dependem da razão massa/carga e da ação do campo elétrico e/ou magnético (GINÉ-ROSIAS, 1999).

As medidas de espectrometria de massa são realizadas com partículas carregadas porque assim é mais fácil controlar o movimento e a direção dos íons pela aplicação de forças elétricas e magnéticas e promover sua separação e detecção. A função da fonte de íons é converter as moléculas ou átomos da amostra em espécies iônicas em fase gasosa. O plasma formado por acoplamento indutivo (*Inductively Coupled Plasma* – ICP) é uma das fontes de ionização mais usadas em acoplamentos com espectrômetros de massas. Os componentes do ICP-MS são os seguintes: sistema de introdução de amostras, tocha como fonte de íons, interface (sistema para extração e focalização dos íons – composto por cone de amostragem, cone de

separação e lente iônicas), analisador de massas e sistema de detecção de íons (Figura 8) (BARBOUR, 2011).

Figura 8 – Sistema ICP-MS. A) Solução da amostra; B) Nebulizador; C) Aerosol; D) Câmara de nebulização; E) Tocha; F) Cone de amostragem; G) Cone de separação; H) Lentes iônicas; I) Analisador de massas; J) Sistema de detecção; K e L) Bombas de vácuo turbo-molecular; M) Bomba de vácuo mecânica.



Fonte - extraído de BARBOUR (2011).

O plasma com acoplamento indutivo como fonte de íons é um gás parcialmente ionizado contendo moléculas, radicais, átomos, íons e elétrons livres. As duas formas existentes de transferência de energia no plasma são a radioativa (emissão, absorção e fluorescência) e a não radioativa (colisão), sendo a colisão a de maior interesse para a espectrometria de massas. A ionização no plasma acontece sob pressão atmosférica com energia de 15,7 eV, que é suficiente para desenvolver e ionizar a maioria dos elementos (mais que 90% - exceções: As, Se, S, F, Cl, Br, I, Te, P, Sb, Zn, Hg, Au, Pt entre outros) em solução. No plasma há o predomínio de íons positivos e uma pequena população de íons de dupla carga e óxidos (BARBOUR, 2011). A amostragem das espécies do plasma e o transporte até o espectrômetro dependem de uma interface adequada. A interface de amostragem e extração dos íons consiste em dois cones metálicos com um pequeno orifício (< 1 mm) circular no ápice colocados em sequência. Os cones são de platina ou níquel, por serem materiais resistentes a alta temperatura (3000 K). O cone de amostragem é refrigerado, o que resfria o plasma ao entrar em contato com a superfície metálica do cone, mudando seu formato externo e formando uma camada de gás ao seu redor.

O plasma contém igual número de cargas positivas e negativas sendo assim considerado neutro (coleta íons, elétrons, átomos e moléculas neutras). Como os elétrons possuem uma mobilidade maior, forma-se uma corrente elétrica entre o plasma e a superfície metálica e, como essa corrente é maior que o fluxo de íons, o

cone fica carregado com potencial negativo. Logo, os elétrons são parcialmente repelidos e os íons positivos atraídos na superfície do cone (BARBOUR, 2011). O fluxo de gás pelo cone de amostragem não pode exceder o fluxo total de gás na tocha, para que a maior parte de íons do analito seja amostrada (e não a atmosfera circundante). Na condução das partículas carregadas, a função do vácuo é evitar que estas colidam com outras. Os tipos de bombas empregadas nos espectrômetros de massas são as rotativas mecânicas e as turbomoleculares (60.000 a 90.000 rpm). O analisador de massas é a parte principal do instrumento porque é responsável por separar os íons de interesse (analitos) dos outros íons, matriz e solvente. O analisador de massas quadrupolar é o mais usado na espectrometria de massas, sendo constituído de quatro hastes cilíndricas ou hiperbólicas metálicas, de mesmo comprimento e diâmetro (comprimento de 15-20 cm e diâmetro de 1 cm). Geralmente são feitos de aço ou molibdênio e alguns têm recobrimento de cerâmica metalizada com ouro para aumentar a resistência à corrosão. Quando uma determinada corrente direta (DC) e um campo oscilante em radiofrequência (RF) são aplicados sobre o quadrupolo, o par positivo e negativo de hastes conduz o íon de interesse de uma extremidade até a outra. Outro tipo de analisador é o analisador de massas de alta resolução, que foi desenvolvido para superar as limitações dos instrumentos de quadrupolo tais como as interferências espectrais, a determinação de ultra-traço e as medidas que exigem elevada precisão. Esse analisador possui um setor magnético e um setor eletrostático (ESA), onde a focalização ocorre por direção e energia. Quando utilizado em alta resolução (8.000 a 10.000 u.m.a) resolve a maioria das interferências espectrais (BARBOUR, 2011).

A Fluorescência de Raios X (FRX) é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Os raios X emitidos excitam os elementos constituintes, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra. Quando um elemento de uma amostra é excitado, tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis dos átomos, e como consequência disto os elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron e esta energia é emitida na forma de um fóton de energia

característica e bem definida para cada elemento. Para provocar a emissão dos raios X característicos dos elementos que constituem a amostra, a excitação pode ser feita de várias formas: excitação por partículas aceleradas como elétrons, prótons ou íons; excitação por raios X, partículas alfa, partículas betanegativas ou raios gama emitidos por radionuclídeos, além do processo mais utilizado, que é através raios X gerados em tubos (NASCIMENTO FILHO, 1999).

Para haver produção de raios X característicos há a necessidade de se retirar elétrons localizados nas camadas mais internas dos átomos, por exemplo camada K, e para isto a energia mínima deve ser superior à energia de ligação do elétron nessa camada, denominada energia de ligação eletrônica ou também de corte de absorção. Esta energia de ligação eletrônica pode ser calculada de modo aproximado aplicando-se a teoria atômica de Bohr para o átomo de hidrogênio e átomos hidrogenoides, e posteriormente, fazendo-se algumas considerações sobre as experiências de Moseley. Após ocorrer a ionização, um elétron mais externo tende a ocupar a vacância, e desse modo há emissão de raios X, de energia característica, cujo valor depende da diferença da energia de ligação do elétron nos dois níveis quânticos. Conseqüentemente, a energia dos raios X também é diretamente proporcional ao quadrado do número atômico Z do elemento excitado, quando se considera o mesmo salto quântico. Em equipamentos que fazem uso da dispersão por comprimento de onda de acordo com a lei de Bragg (com utilização de cristais de difração com distâncias interplanares conhecidas) é mais interessante se ter a relação entre o comprimento de onda dos raios X característicos e o número atômico do elemento a ser analisado (NASCIMENTO FILHO, 1999).

Em PHILLIP (1998) as análises petrográficas foram conduzidas por métodos tradicionais utilizando o microscópio petrográfico monocular e binocular de luz polarizada das marcas Zeiss e Leitz. Os estudos incluem a identificação e descrição dos minerais constituintes, sua caracterização textural, sua representatividade e significado na trama, estabelecimento de paragêneses, além das relações e transformações texturais provocadas nos granitoides pelo metamorfismo e deformação gerados pela zona de cisalhamento. A descrição da forma e dos limites dos grãos das rochas ígneas seguiu a terminologia proposta por WILLIAMS *et al* (1981) e a das rochas metamórficas de acordo com SPRY (1969) e HIBBARD (1995). A determinação do feldspato potássico e plagioclásio para classificação das rochas

ígneas foi realizada pelo teste colorimétrico com cobaltinitrito de sódio. Neste teste a amostra é colocada inicialmente em contato com uma solução alcoólica de cobaltinitrito de sódio por aproximadamente 40 segundos, obtendo como produto final a cor amarela no feldspato potássico e branca no plagioclásio. Para a classificação dos granitos foi seguida a recomendação da *International Union of Geological Sciences* (IUGS) através de STRECKEISEN (1976) e LE BAS e STRECKEISEN (1991). As rochas metamórficas encontradas como xenólitos foram classificadas de acordo com a nomenclatura utilizada por YARDLEY (1989).

Em PHILLIP e CAMPOS (2004) a análise modal da petrografia indicou uma composição granodiorítica a monzogranítica, com dioritos subordinados. O autor utilizou 6 lâminas e 5 amostras para litoquímica.

Os materiais e métodos utilizados por GREGORY (2010) compreenderam a coleta de amostras na primeira etapa do trabalho para confecção de lâminas. Os estudos petrográficos realizados em 15 lâminas possibilitaram o autor caracterizar a composição das litologias e microestruturas deformacionais, para assim desenvolver critérios para individualização de unidades e seleção de alvo específico para o estudo geoquímico. A segunda etapa de trabalhos de campo foi realizada para verificar os critérios desenvolvidos e coletar amostras para análises químicas (sem alteração e longe de zonas de cataclase, além de serem armazenadas em saco plástico e sem utilizar caneta para identificar para que a tinta não contaminasse as amostras). Nas amostras selecionadas para geoquímica foram, quando possível, efetuadas contagens modais por pontos, em microscópio óptico equipado com contador (1000 a 1500 pontos por lâminas contados) em espaçamento de 2 x 0,3mm. Foram selecionadas 18 amostras para análise geoquímica para serem pulverizadas no anexo do Laboratório de Geologia Isotópica do Instituto de Geociências da UFRGS, submetidas à prensa hidráulica e a pulverização preliminar em gral de porcelana e pistilo, além da utilização do moinho de bolas de ágata para finalizar. O manejo seguiu as normas do laboratório. As amostras preparadas foram enviadas para o *Activations Laboratories Ltd.* (Canadá) para análises quantitativas de elementos maiores e traços, utilizando a técnica *Fusion Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry* (FUS-ICP-ES) para os elementos maiores e alguns traços (Sc, Be, V, Ba, Sr, Y e Zr) e *Fusion Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (FUS-ICP-MS) para demais elementos traço e terras raras. Os resultados das análises foram trabalhados em

softwares como o Minpet 2.0 para montagem de gráficos e comparados com diagramas da literatura para classificação e identificação do ambiente geotectônico de formação destas rochas.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA

A caracterização hidroquímica foi realizada com a utilização dos dados disponíveis nas fichas dos poços tubulares selecionados da área em estudo.

Os dados hidroquímicos dos poços de interesse foram plotados no *software* Qualigraf 1.7. Para obtenção dos dados utilizados no Qualigraf 1.7 foi escrita uma terceira macro no *software* OutWit Hub que buscou pelos valores de interesse para a montagem do Diagrama de Piper (concentrações de Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , CO_3^{-2} , HCO_3^{-1} , SO_4^{-2}) nos endereços pré-determinados do SIAGAS. A avaliação e classificação da água subterrânea circulante na área de estudo foi feita a partir dos Diagramas de Piper, Diagramas de Stiff e Diagramas Radiais produzidos.

O Diagrama de Piper é amplamente utilizado para classificação e representação gráfica da água subterrânea de acordo com os íons mais abundantes representados em meq/L. Possui dois triângulos, um de cátions e outro de ânions, e um losango central e cada vértice é correspondente a uma escala de concentração do íon. O prolongamento do ponto a partir dos triângulos dos cátions e dos ânions até o losango central, onde as retas se interceptam, define o resultado a partir da posição do novo ponto, indicando assim a classificação da amostra a partir da composição química da água.

A classificação das águas obtida no *software* Qualigraf, utilizando o banco de dados confeccionado na etapa I e refinado na etapa II, é essencial para realizar a correlação com as informações existentes sobre as litologias da área de estudo, especialmente da mineralogia através da petrografia, obtidas principalmente nos trabalhos de PHILLIP (1998), PHILLIP e CAMPOS (2004) e GREGORY (2010).

Os Diagramas de Stiff e os Diagramas Radiais são utilizados para facilitar o estudo das análises através da utilização de recursos gráficos, permitindo comparar entre as diversas amostras de água uma convergência, ou não, de composição. Ambos diagramas relacionam os teores dos principais íons presentes e são úteis para identificar águas com padrões semelhantes de distribuição de elementos. Além disso,

é possível plotar os diagramas radiais em um mapa e visualizar a existência, ou não, de um *trend* na região estudada.

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA

A caracterização hidrogeoquímica foi realizada para verificar as condições de saturação das fases obtendo-se o Índice de Saturação (IS) de alguns minerais.

Conforme DEUTSCH e SIEGEL (1997), valores de IS próximos a zero (entre -0,5 e 0,5) significam saturação, logo o mineral existe no sistema e está afetando a composição das águas. Já se o IS for inferior a -0,5 indica que há subsaturação, representando que o mineral, caso reativo, não está presente ou então está dissolvendo e caso não reativo, que está presente. O IS superior a 0,5 demonstra supersaturação da água para determinada fase mineral, logo o mineral não é reativo (minerais reativos possuem um limite superior de IS próximo a 0) e está precipitando. Calcita, dolomita e gipso são minerais tipicamente reativos.

O programa PHREEQC *for Windows* versão 2.18.00 (POST, 2011) foi utilizado para realizar a caracterização hidrogeoquímica.

3.2.4 IDENTIFICAÇÃO DE LINEAMENTOS

Lineamentos morfoestruturais são traços em planta que representam falhas, fraturas, fissuras, drenagens entre outros e portanto foram utilizados como ferramenta auxiliar para a observação de uma possível influência das estruturas nas concentrações de fluoreto das áreas de estudo. As imagens utilizadas são resultado da união de imagens geradas por sensoriamento remoto e ferramentas de geoprocessamento.

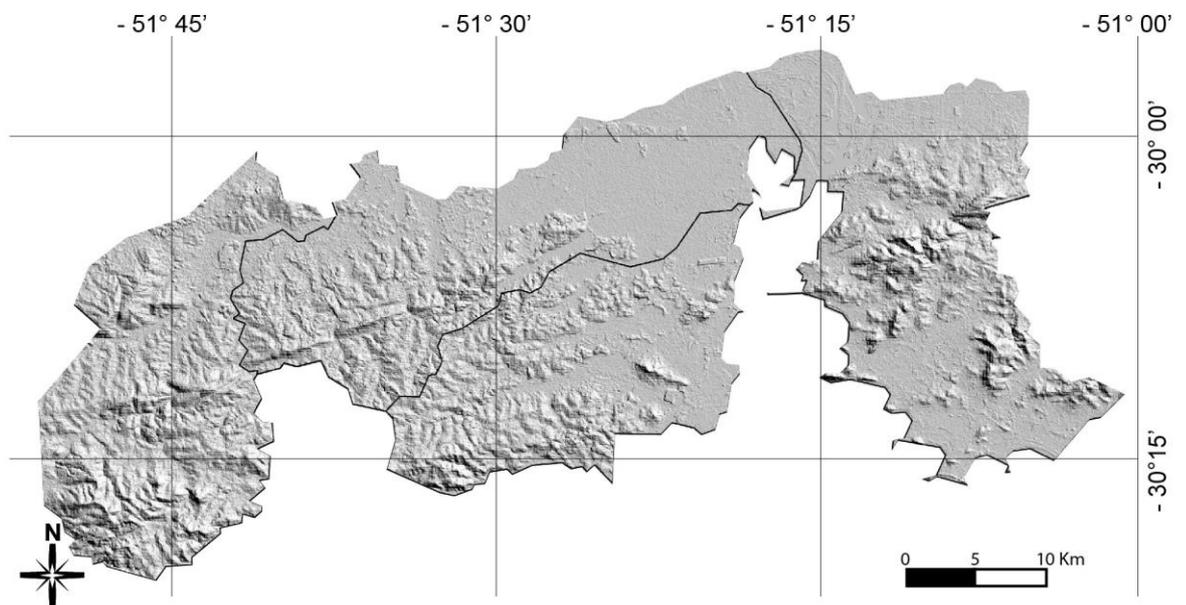
Quatro imagens de modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 30 metros foram usadas para compor o recorte da área de estudo, retiradas do sítio eletrônico *Earth Explorer* (earthexplorer.usgs.gov) e obtidas pelo programa de mapeamento topográfico de detalhe SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) em fevereiro de 2000. O processamento das imagens e o traçado dos lineamentos foram realizados utilizando o *software* de código aberto Quantum GIS.

Inicialmente foi criado um mosaico com as quatro imagens de satélite, gerando um modelo de terreno (MDE) do tipo RASTER. Foram, então, geradas quatro imagens

de sombreamento RASTER de igual atitude de insolação (45°) e diferentes azimutes de insolação (0°, 45°, 90° e 135°) (Figura 9).

Foi adotado o uso destes quatro diferentes azimutes pois, segundo WISE et al. (1985), o sombreamento do relevo é mais claramente observado quando a iluminação incide a partir de uma direção ortogonal a estrutura. Caso fossem coincidentes a estas, não haveria sombra que as definisse, ficando prejudicada a observação. Desta forma, o uso de azimutes variados permite identificar um maior número de estruturas.

Figura 9 - Imagem de sombreamento RASTER dos municípios em estudo.



Fonte - Elaborado pela autora.

3.3 ETAPA III

A etapa III compreendeu o cruzamento dos dados provenientes do SIAGAS com os dados da literatura, além da utilização dados obtidos e confeccionados nas etapas anteriores. Assim, testou-se a hipótese de que as elevadas concentrações de fluoreto na área em estudo são decorrentes da interação entre água subterrânea e as litologias granito-gnáissicas que constituem o aquífero fraturado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 GEOLOGIA DA ÁREA E RELAÇÃO COM OS POÇOS

Através do levantamento realizado no SIAGAS e com o apoio da literatura foram definidas 7 litologias de interesse predominantes na área de estudo, sendo elas

divididas em gnaisses e granitos – Gnaisses Porto Alegre, Granito Viamão, Granito Independência, Granito Canta Galo, Granito Ponta Grossa e Granito Santana (além de alguns diques riolíticos, dacíticos e de diabásio), além do Complexo Arroio dos Ratos (rochas tonalíticas a dioríticas).

Nos poços com rochas exclusivamente de composição granítica predomina a profundidade de aproximadamente 120 m, entrada de água em 72 m e pH 7,4.

Nos poços com rochas exclusivamente de composição gnáissica predomina a profundidade de aproximadamente 180 m, entrada de água em 120 m e pH 7,9.

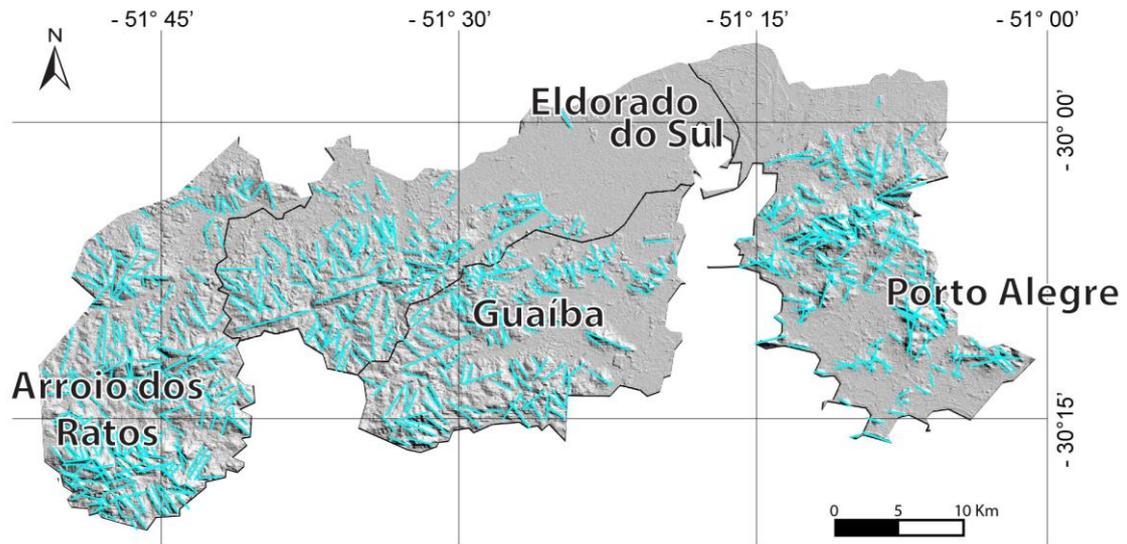
Nos poços com rochas de composição granítica e gnáissica predomina a profundidade de aproximadamente 130 m, entrada de água em 91 m e pH 7,7.

4.2 LINEAMENTOS

Para traçar os lineamentos, foi gerada uma camada vetorial (*shape*) sobreposta a todas as imagens de relevo feitas, de modo que foram traçados os primeiramente lineamentos visíveis na camada de incidência 0°, depois 45°, 90° e por fim 135°. Cada uma destas imagens foi traçada separadamente, para melhor observação e reconhecimento das estruturas em cada azimute de incidência da iluminação. No total foram reconhecidos 595 lineamentos nas áreas dos quatro municípios (Figura 10).

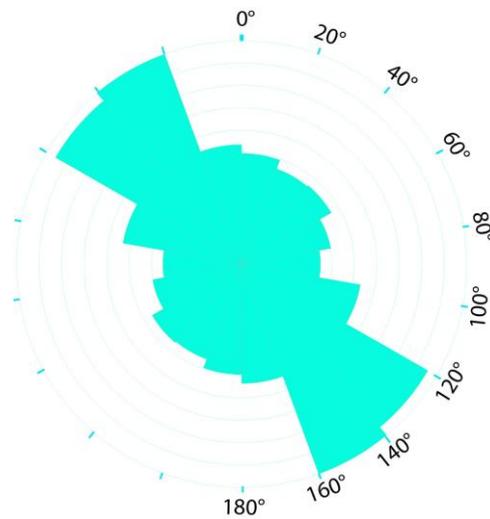
Por fim, os valores de azimute dos lineamentos traçados foram plotados em um histograma de linhas direcionais (Diagrama de Roseta), sendo estes separados em nove (9) grupos, um para cada 20° de azimute: 1°-20° (I), 21°-40° (II), 41°-60° (III), 61°-80° (IV), 81°-100° (V), 101°-120° (VI), 121°-140° (VII), 141°-160° (VIII) e 161°-180° (IX). Como lineamentos são apresentados segundo sua direção, não é necessário organizá-los de 0 a 360°, pois cada direção já compreende seu equivalente no quadrante oposto ($\pm 180^\circ$). Observando o diagrama gerado (Figura 11), pode-se notar uma maior frequência de lineamentos segundo os azimutes 121° e 160°, correspondentes aos grupos VII e VIII, os quais perfazem, respectivamente, um total de 177 e 116 medidas de lineamentos. Estes grupos também apresentaram os maiores valores médios de comprimento: 1056.43 metros (grupo VII) e 1107.17 metros (VIII).

Figura 10 - Mapa de lineamentos.



Fonte - Elaborado pela autora.

Figura 11 - Diagrama de Roseta dos lineamentos traçados.

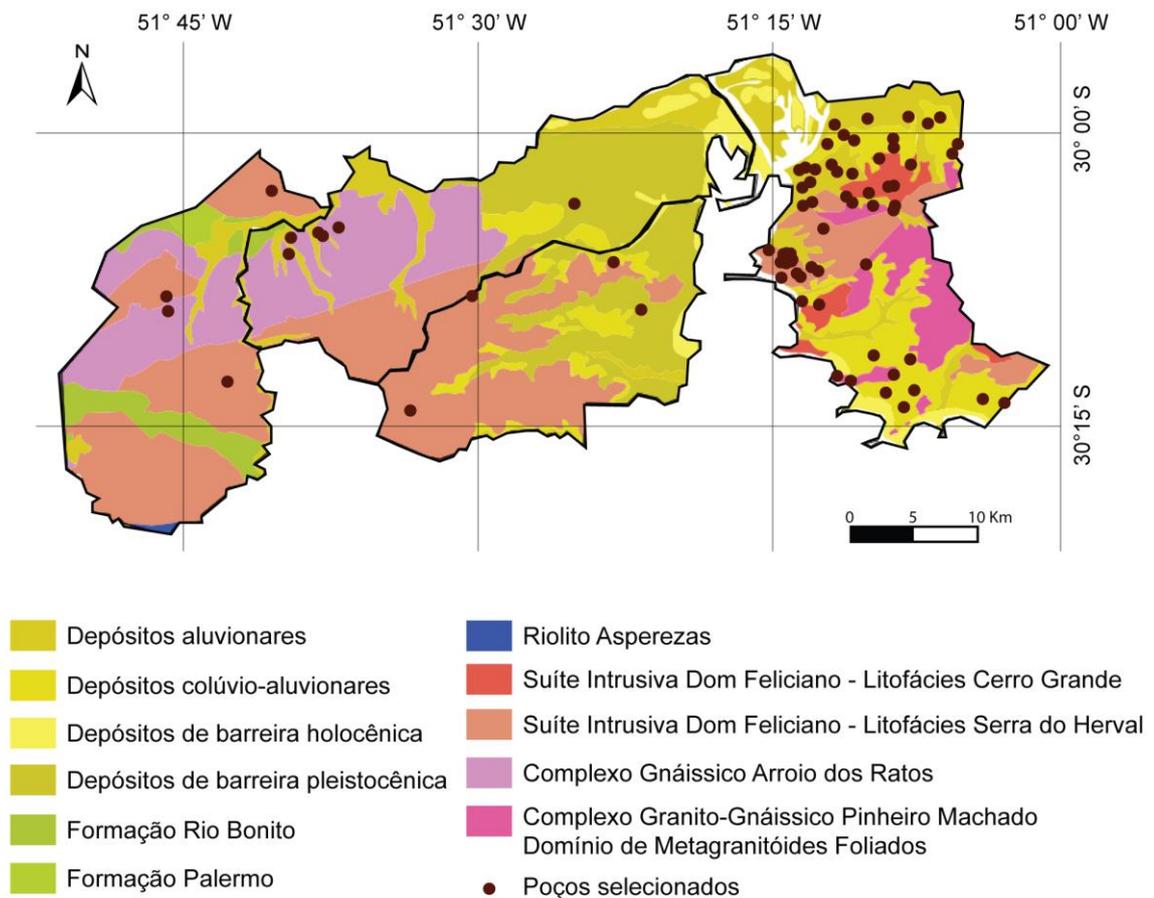


Fonte - Elaborado pela autora.

4.3 POÇOS SELECIONADOS

Foram selecionados inicialmente 1221 poços de captação no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) que compreendiam a área do Batólito de Pelotas. Entre estes apenas 283 poços apresentavam concentração de fluoreto medida e disponível no banco de dados. Dos 283 poços, 122 estavam dentro do escopo de interesse do presente estudo – concentrações acima de 0,9 mg/L, representando risco à saúde pública. Com estes 122 poços, a área foi delimitada buscando ter uma maior representatividade: 75 poços estavam dentro dos limites de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos e em litologias conhecidas e contínuas (Figura 12) e por este motivo foram selecionados.

Figura 12 - Mapa de pontos com os poços selecionados para o desenvolvimento do trabalho.

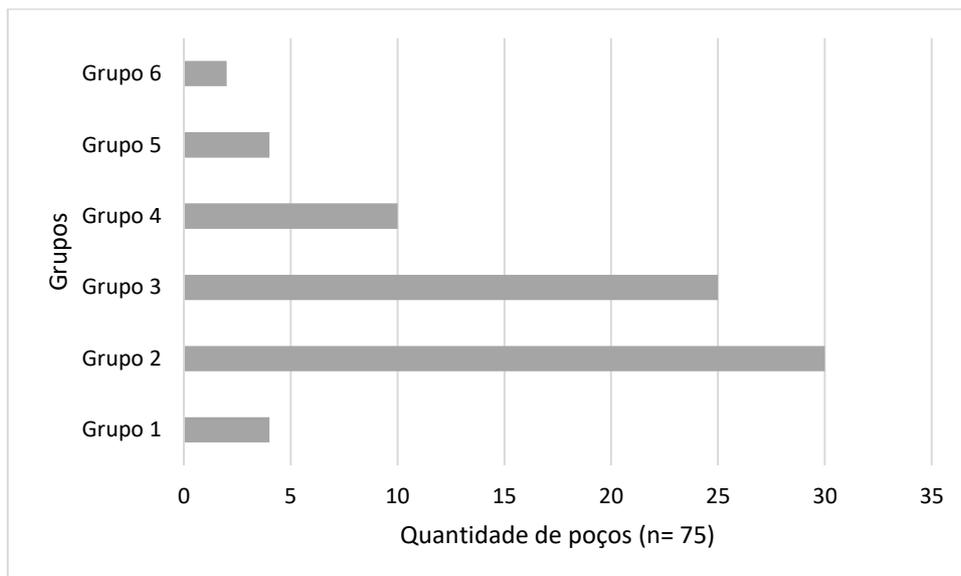


Fonte - Elaborado pela autora com dados da pesquisa.

Os 75 poços selecionados foram divididos em 6 grupos (Figura 13) baseados na concentração de fluoreto apresentada. O grupo 1 possui 4 poços cadastrados com a concentração variando de 0,9 a 0,99 mg/L (acima do limite máximo dentro do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria 10/99 da Secretaria da Saúde do Estado

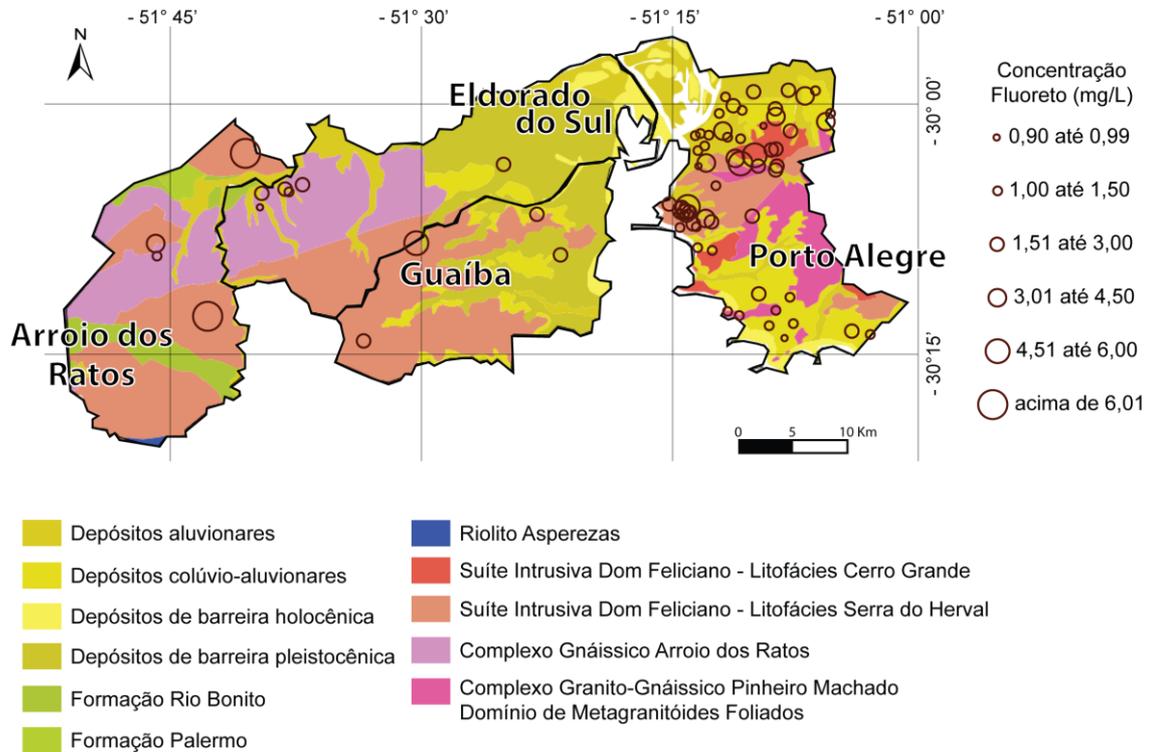
do Rio Grande do Sul), o grupo 2 possui 30 poços cadastrados variando de 1,00 a 1,50 mg/L (acima da Portaria 10/99 porém dentro do limite máximo da Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde e do prescrito pela Organização Mundial de Saúde), o grupo 3 possui 25 poços cadastrados variando de 1,51 a 3,00 mg/L (acima do permitido, sendo o limite máximo o dobro da mais abrangente), o grupo 4 possui 10 poços cadastrados variando de 3,01 a 4,50 mg/L (acima do permitido, sendo o limite máximo o triplo da mais abrangente), o grupo 5 possui 4 poços cadastrados variando de 4,51 a 6,00 mg/L (acima do permitido, sendo o limite máximo o quádruplo da mais abrangente) e o grupo 6 possui 2 poços cadastrados com concentração de fluoreto acima de 6,01 mg/L (Figura 14).

Figura 13 - Gráfico demonstrando a divisão dos 75 poços em 6 Grupos distintos conforme a variação da concentração de fluoreto (Grupo 1: 0,9 a 0,99 mg/L; Grupo 2: 1,00 a 1,50 mg/L; Grupo 3: 1,51 a 3,00 mg/L; Grupo 4: 3,01 a 4,50 mg/L; Grupo 5: 4,51 a 6,00 mg/L e Grupo 6: acima de 6,01 mg/L).



Fonte - Elaborado pela autora.

Figura 14 - Mapa de bolhas mostrando os intervalos das concentrações de fluoreto na região de estudo.



Fonte - Elaborado pela autora.

Os poços estudados são do tipo tubular e a situação operacional dos poços levantados é observada na Tabela 1. Analisando os dados apresentados constata-se que, quanto a situação, 53 (70,67%) poços não possuem informação da operacionalidade, 6 (8%) estão bombeando, 14 (18,67%) estão equipados, 1 (1,33%) não está instalado e 1 (1,33%) não é utilizável.

Com relação ao uso da água (Tabela 2), 36 (48%) poços não possuem informação cadastrada, 13 (17,30%) destinam-se ao abastecimento industrial, 12 (16%) ao abastecimento múltiplo, 5 (6,67%) ao abastecimento urbano, 8 (10,67%) ao abastecimento doméstico e 1 (1,30%) a outros (lazer, etc.).

Tabela 1 – Situação operacional dos poços na área de estudo.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	
Situação	0,90 a 0,99	1,00 a 1,50	1,51 a 3,00	3,01 a 4,50	4,51 a 6,00	maior que 6,01	fluoreto (mg/L)
Sem informação	3	18	19	7	4	2	poço(s)
Bombeando	1	3	1	1			poço(s)
Equipado		9	3	2			poço(s)
Não instalado			1				poço(s)
Não utilizável			1				poço(s)
	4	30	25	10	4	2	total de poços

Fonte - Elaborado pela autora.

Tabela 2 - Uso da água captada pelos poços.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	
Uso	0,90 a 0,99	1,00 a 1,50	1,51 a 3,00	3,01 a 4,50	4,51 a 6,00	maior que 6,01	fluoreto (mg/L)
Sem informação	2	9	16	6	2	1	poço(s)
Abastecimento industrial	1	8	2	1	1		poço(s)
Abastecimento múltiplo	1	5	3	2		1	poço(s)
Abastecimento urbano		1	2	1	1		poço(s)
Abastecimento doméstico		6	2				poço(s)
Outros (lazer, etc.)		1					poço(s)
	4	30	25	10	4	2	total de poços

Fonte - Elaborado pela autora.

Dentre as entradas d'água dos poços estudados (Tabela 3), 36 (48%) estão localizadas em litologia granítica, 11 (14,67%) em gnaisses, 3 (4%) em granito e gnaiss, 3 (4%) em cobertura sedimentar e granito, 1 (1,33%) em cobertura sedimentar e gnaiss, 1 (1,33%) em cobertura sedimentar e 20 (26,67%) não possuem informações.

Tabela 3 - Relação da entrada d'água com a litologia.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	
Entrada d'água	0,90 a 0,99	1,00 a 1,50	1,51 a 3,00	3,01 a 4,50	4,51 a 6,00	maior que 6,01	fluoreto (mg/L)
Granito	2	16	12	3	2	1	poço(s)
Gnaisse	1	2	4	3	1		poço(s)
Granito + Gnaisse		1	2				poço(s)
Cobertura sedimentar + granito	1	2					poço(s)
Cobertura sedimentar + gnaisse			1				poço(s)
Cobertura sedimentar			1				poço(s)
Sem informação		9	5	4	1	1	poço(s)
	4	30	25	10	4	2	total de poços

Fonte - Elaborado pela autora.

4.4 HIDROQUÍMICA, HIDROGEOQUÍMICA, HIDRODINÂMICA E ESTATÍSTICA

O Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriando (SAFPC) apresenta litologias granito-gnáissicas do embasamento pré-cambriano e é intensamente fraturado, possuindo assim características hidrodinâmicas e hidrogeoquímicas muito heterogêneas. A circulação de água neste sistema é condicionada pelas estruturas tectônicas (fraturas) que não se encontram preenchidas ou fechadas em função de ação tectônica posterior.

Com os dados obtidos dos 75 poços selecionados foi realizada a caracterização hidroquímica, hidrogeoquímica e hidrodinâmica. As estatísticas dos dados utilizados são observadas na Tabela 4.

Os 75 poços possuem informações relativas a profundidade, sendo que o de menor profundidade entre os seis grupos tem 46 m e o de maior profundidade 300 m. A concentração de fluoreto tende a aumentar conforme a profundidade média do poço.

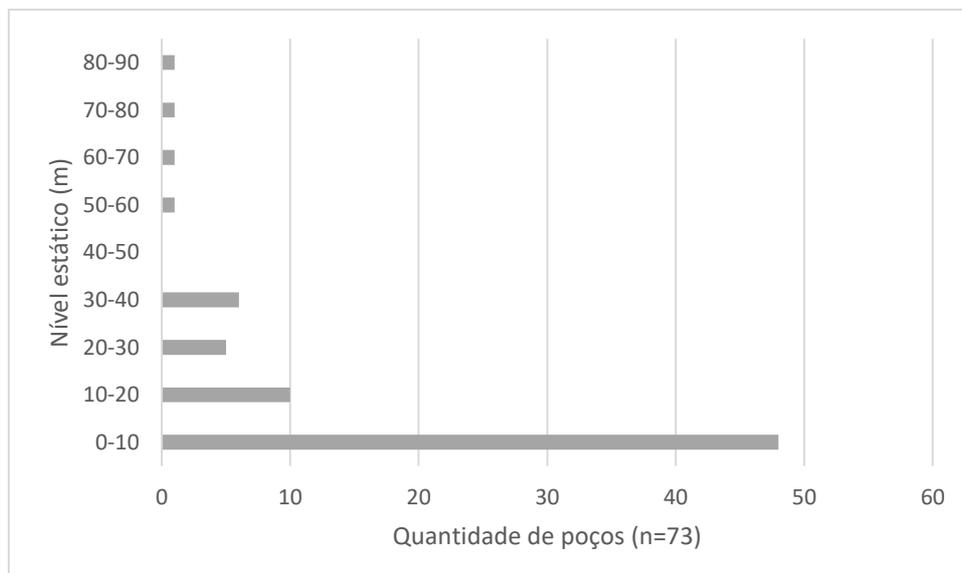
Tabela 4 - Distribuição estatística dos dados observados.

	Mediana	Valor médio	Valor máximo	Valor mínimo	Desvio padrão	Quantidade de poços
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	268,00	446,80	6290,00	2,46	789,47	72
Dureza total (mg/L)	76,00	121,80	1547,00	10,00	210,77	74
pH	7,30	7,35	8,40	5,95	0,57	74
Sódio (mg/L)	33,00	69,08	630,00	4,50	127,91	39
Potássio (mg/L)	2,00	2,84	12,00	0,00	3,04	27
Cálcio (mg/L)	19,20	31,67	380,00	2,20	55,71	75
Cloreto (mg/L)	12,64	65,24	1684,00	2,00	222,66	72
Fluoreto (mg/L)	1,60	2,30	8,71	0,90	1,51	75
Magnésio (mg/L)	6,30	11,74	146,00	0,00	19,45	75
Nitrato (mg/L)	0,35	2,88	44,30	0,00	7,03	66
Sulfato (mg/L)	8,00	29,84	550,00	0,00	77,84	70
Bicarbonato (mg/L)	136,02	132,47	253,80	30,50	50,70	66
Carbonato (mg/L)	77,00	77,95	157,80	0,00	85,59	4

Fonte - Elaborado pela autora.

Quanto ao nível estático (Figura 15), 73 poços apresentaram medidas disponíveis sendo o mais raso com 0 m e o mais profundo com 85,16 m.

Figura 15 - Gráfico demonstrando a ocorrência de poços em função do nível estático.

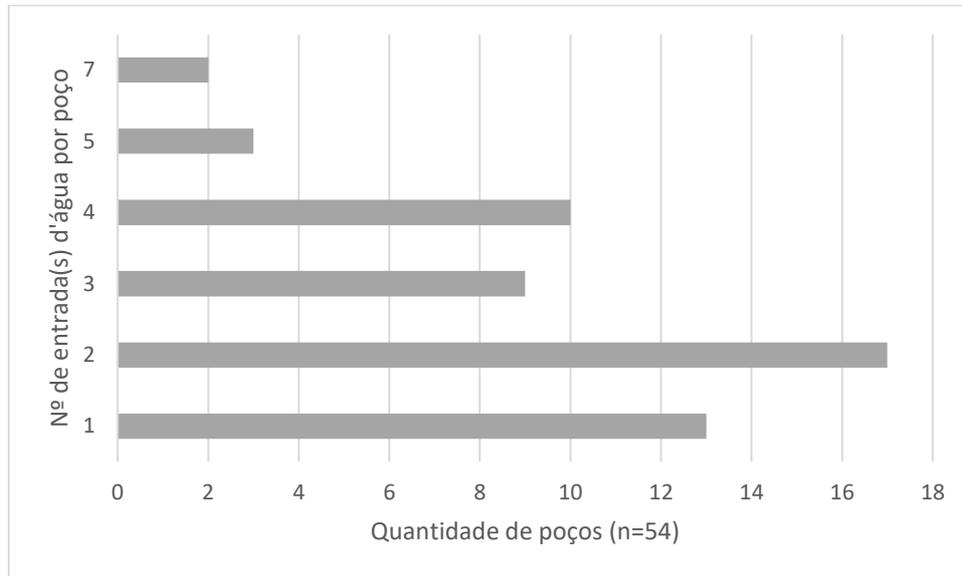


Fonte - Elaborado pela autora.

As informações de entradas d'água estão presentes em 54 dos poços selecionados (Figura 16). Destes, 17 poços (31,48%) apresentam 2 entradas d'água, 13 poços (24,07%) apresentam 1 entrada d'água, 10 poços (18,52%) apresentam 4

entradas d'água, 9 poços (16,67%) apresentam 3 entradas d'água, 3 poços (5,56%) apresentam 5 entradas d'água e 2 poços (3,7%) apresentam 7 entradas d'água, sendo este o máximo cadastrado na área.

Figura 16 - Gráfico demonstrando a quantidade de entradas d'água por poço.

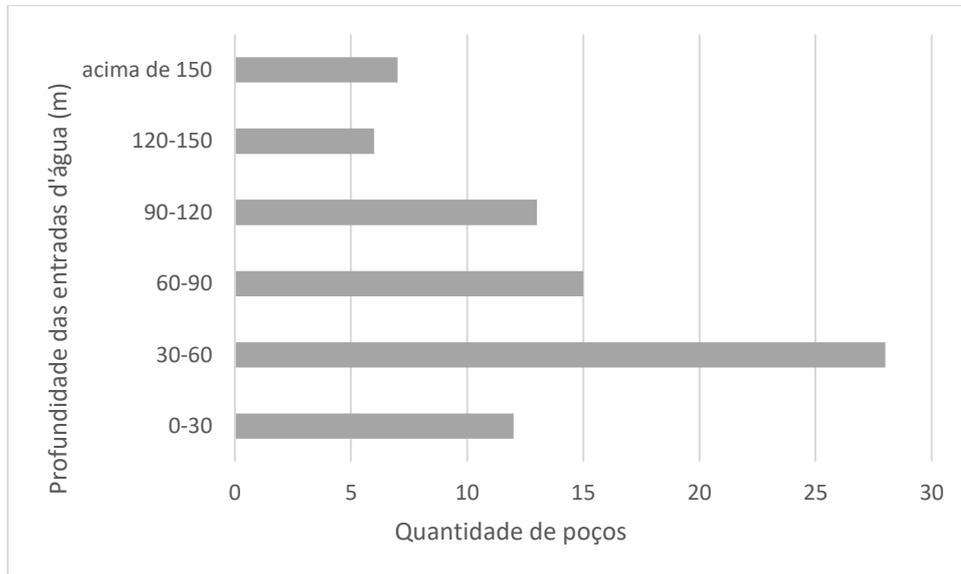


Fonte - Elaborado pela autora.

Quanto às profundidades de entrada d'água (Figura 17), foi observado que em geral quanto mais profundas, maior a concentração de fluoreto na composição da água. No Grupo 1 a média registrada na profundidade das entradas d'água foi de 63 m, no Grupo 2 foi de 53,59 m, no Grupo 3 foi de 72,65 m, no Grupo 4 foi de 100,69 m, no Grupo 5 foi de 99,59 m e no Grupo 6 foi de 152,5 m.

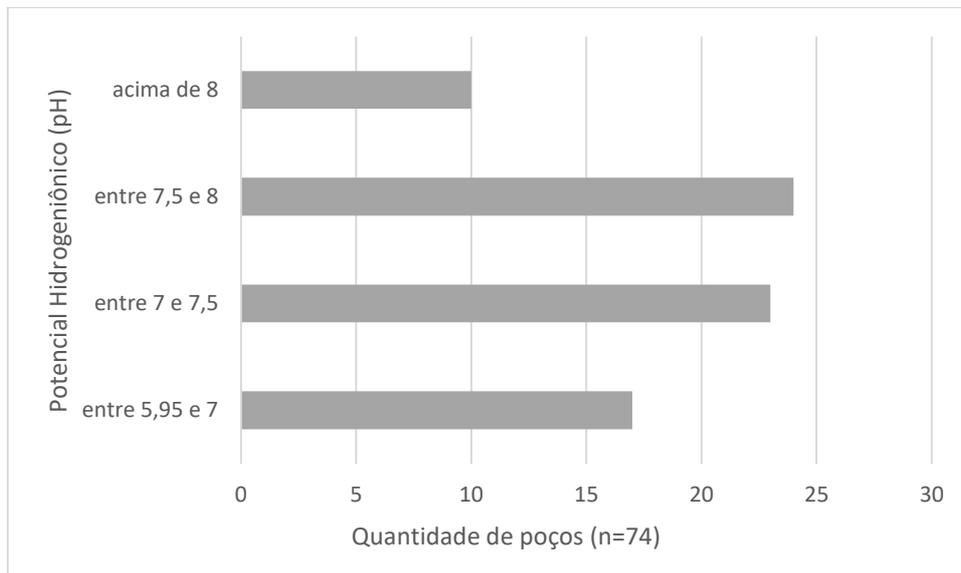
Em relação ao pH 74 poços possuem dados disponíveis (Figura 18). No Grupo 1 a média de pH é de 6,88, no Grupo 2 de 7,16, no Grupo 3 de 7,32, no Grupo 4 de 7,29, no Grupo 5 de 7,69 e no Grupo 6 de 7,25. O pH mais alto e, portanto, mais alcalino foi de 8,4 e o mais baixo e mais ácido foi de 5,95. 17 poços (22,97%) apresentam pH entre 5,95 e 7, 23 poços (31,08%) apresentam pH entre 7 e 7,5, 24 poços (32,43%) apresentam pH entre 7,5 e 8 e 10 poços (13,51%) apresentam pH acima de 8. Sendo assim, 63,51% dos poços pesquisados têm pH entre 7 e 8. O valor de pH mais elevado era esperado em função das entradas d'água serem profundas, privilegiando o tempo de circulação de água.

Figura 17 – Relação entre a profundidade das entradas d'água e a quantidade de poços estudados.



Fonte - Elaborado pela autora.

Figura 18 - Relação entre o intervalo de pH e a quantidade de poços estudados.



Fonte - Elaborado pela autora.

Dos 75 poços disponíveis para estudo, 16 foram selecionados em função das concentrações de sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), cloreto (Cl), bicarbonato (HCO_3) e sulfato (SO_4) disponíveis e necessários para a confecção de diagramas de Piper e de Stiff. A média destes valores em mg/L está demonstrada na

Tabela 4. Os 16 poços seleccionados atenderam aos balanços iônicos realizados pelo *software* Qualigraf baseados no valor do erro prático (Ep%) calculado por duas técnicas: uma que considera os valores de condutividade elétrica (Figura 19) e outra que considera os somatórios dos valores dos cátions ou ânions (Figura 20).

Figura 19 - Fórmula do cálculo do erro prático (Ep%) efetuado pelo Qualigraf levando em consideração o valor de condutividade elétrica da amostra.

- Balanço Iônico N°1 -

Baseado no Erro prático (Ep), definido por Custódio e Llamas (1983) como:

$$Ep (\%) = \frac{|r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cations}|}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cations}} \times 200$$

O erro Teórico é o E.P. máximo permitido considerando-se a condutividade elétrica (C.E.), conforme mostrado abaixo:

Cond. Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2.000	> 2.000
Erro permitido (%)	30	10	8	4	< 4

Fonte - Elaborado pela autora.

Figura 20 - Fórmula do cálculo do erro prático (Ep%) efetuado pelo Qualigraf levando em consideração o somatório dos valores dos íons da amostra.

- Balanço Iônico N°2 -

Baseado no Erro prático (Ep) definido por Logan (1965), dado como:

$$Ep (\%) = \frac{|r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cations}|}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cations}} \times 100$$

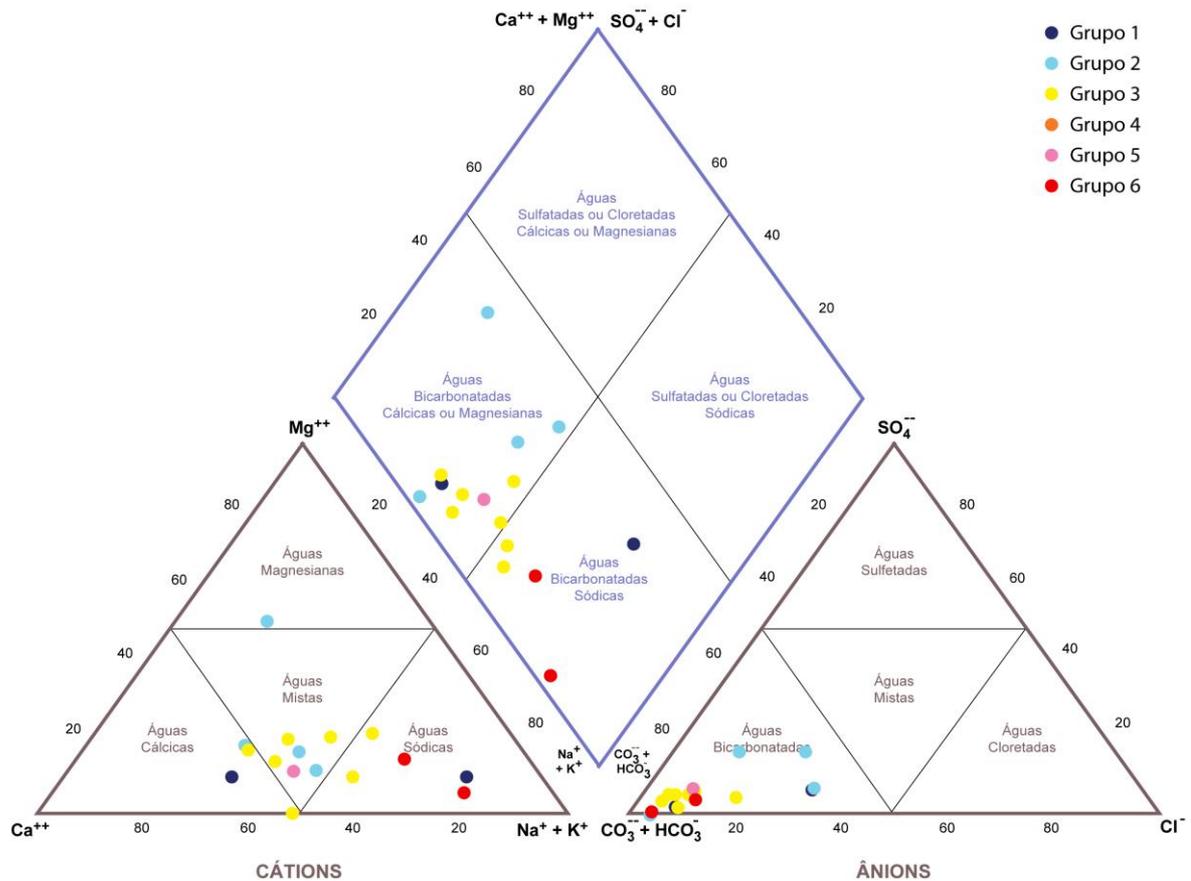
O erro Teórico é o E.P. máximo permitido levando-se em consideração os valores dos íons, conforme mostrado abaixo:

\sum cátions ou \sum ânions	< 1	1	2	6	10	30	>30
Erro permitido (%)	15	10	6	4	3	2	1

Fonte - Elaborado pela autora.

Os poços então puderam ser utilizados na confecção dos diagramas de Piper (Figura 21), para classificação e comparação das águas quanto aos íons dominantes, de Stiff para distinguir famílias de águas e Radiais para verificar um *trend* no mapa.

Figura 21 - Diagrama de Piper demonstrando a classificação das águas.



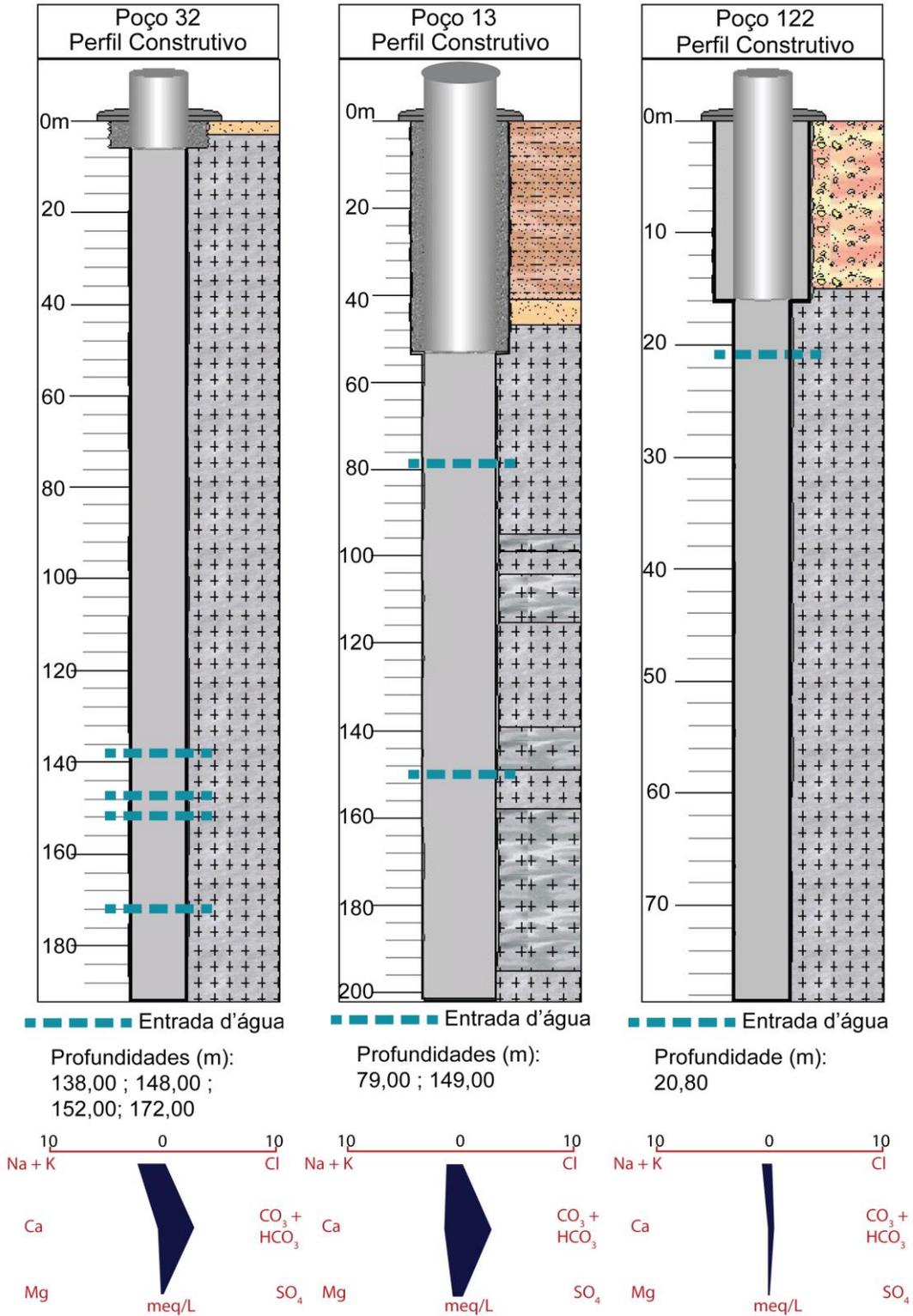
Fonte - Elaborado pela autora.

De acordo com o diagrama de Piper demonstrado na figura 21, as águas analisadas foram classificadas majoritariamente como águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e subsidiariamente como águas bicarbonatadas sódicas. Esta classificação vem ao encontro ao observado por ROISENBERG *et al.*, 2003 quanto às águas do município de Porto Alegre, e se estende aos municípios de Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos conforme demonstrado na presente pesquisa.

Conforme os diagramas de Stiff (Figura 22) as amostras apresentam diferentes concentrações iônicas que respondem às entradas d'água e às litologias. O poço 13 (pertencente ao Grupo 3 – concentração de fluoreto entre 1,51 e 3,00 mg/L) ao centro da figura é o que representa a maioria dos 16 poços analisados (8 poços apresentam diagramas de Stiff muito semelhantes a este poço). O poço 32 (pertencente ao Grupo 6 – concentração de fluoreto acima de 6,01 mg/L) à esquerda da figura representa 4 outros poços também associados a entradas d'água profundas. O poço 122 (pertencente ao Grupo 1 – concentração de fluoreto entre 0,9 e 0,99 mg/L) apresenta

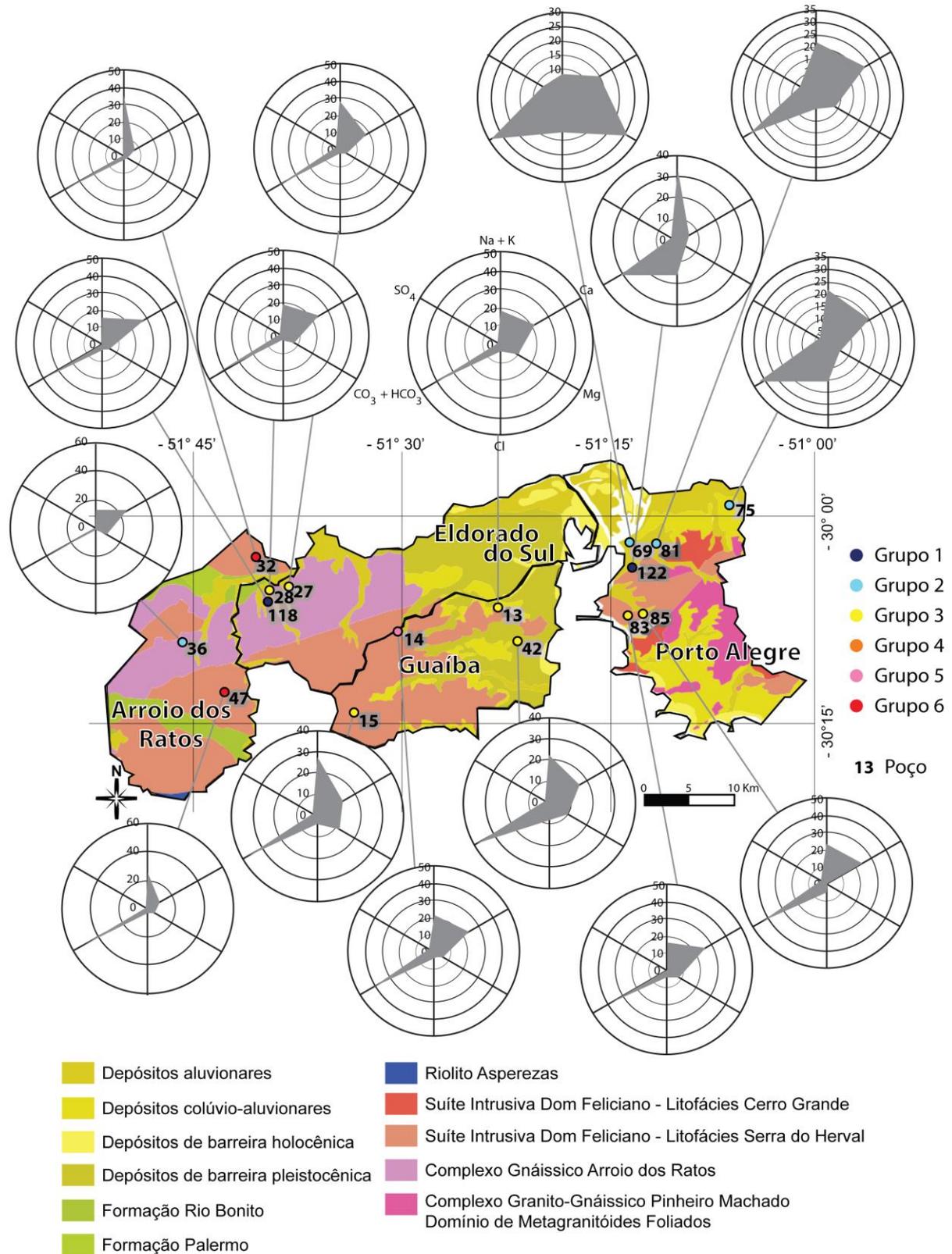
comportamento isolado, provavelmente relacionado a baixa profundidade da entrada d'água e diferente dos outros 3 poços restantes.

Figura 22 - Perfis de três poços da pesquisa com os diagramas de Stiff caracterizando a água.



Fonte - Elaborado pela autora com dados do SIAGAS.

Figura 23 - Mapa geológico da área com os diagramas radiais de cada um dos 16 poços. O Poço 13 é o mais representativo e está em destaque ao centro. O diagrama radial deste poço mostra a nomenclatura de cada quadrante, ficando assim subentendido que se deve aplicar a mesma aos outros diagramas radiais mostrados.



Fonte - Elaborado pela autora.

Os diagramas radiais (Figura 23), ao serem plotados no mapa geológico da área de estudo, permitiram visualizar uma tendência composicional principal bem como um *trend* no mapa (poços 36, 118, 28, 27, 13, 14, 83, 42 e 45).

A análise da qualidade da água subterrânea foi realizada com base na Portaria 2914/2011 (em 2017, o Ministério da Saúde revogou a portaria 2.914 e criou o Código do SUS que abrange o conteúdo normativo da antiga Portaria - atualmente, ela está incorporada pela Portaria de Consolidação nº 5, no Anexo XX) do Ministério da Saúde. Foram utilizados dados de concentração de ferro (Fe), manganês (Mn), fluoreto e nitrato.

Tabela 5 - Valor máximo permitido (VMP) e dados estatísticos dos valores de Ferro, Manganês, Fluoreto e Nitrato nos poços observados.

	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Fluoreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
VMP	0,30	0,10	1,50	10,00
Mediana	0,18	0,15	1,60	0,40
Valor médio	0,65	0,63	2,30	3,33
Valor máximo	18,00	17,97	8,71	44,30
Valor mínimo	0,00	0,00	0,90	0,00
Desvio padrão	2,18	2,31	1,51	7,62
Quantidade de poços	72,00	70,00	75,00	65,00

Fonte - Elaborado pela autora.

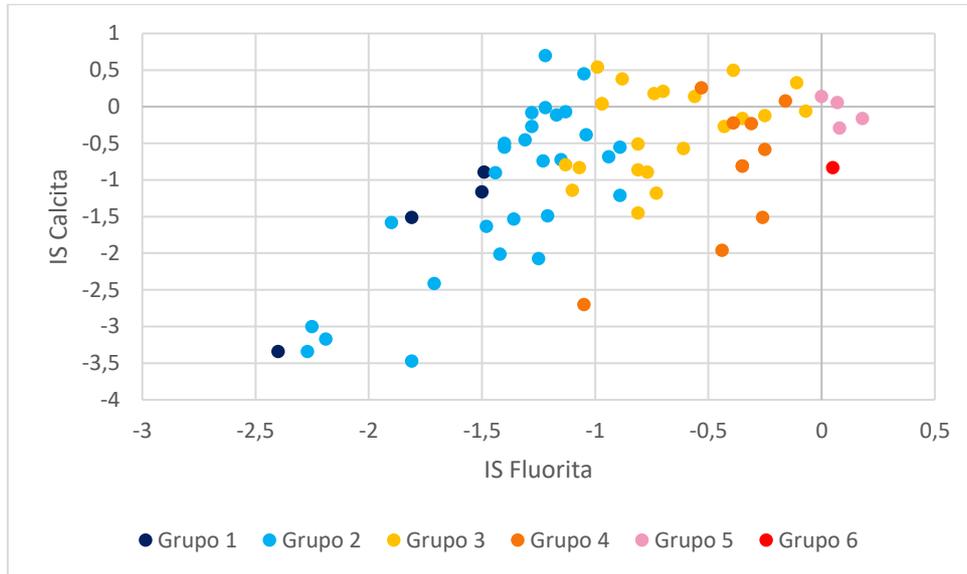
Em relação a concentração de ferro dos 72 poços observados, 22 apresentam valor igual ou acima do valor máximo permitido (VMP) de 0,3 mg/L. Dos 70 poços com informações referente a concentração de manganês, 38 apresentam valor igual ou acima do VMP de 0,1 mg/L. Com relação ao fluoreto, de 75 poços apenas 29 estão abaixo do VMP de 1,5 mg/L referente a Portaria do Ministério da Saúde (porém estão acima da Portaria mais restritiva do Estado do Rio Grande do Sul). Dos 65 poços com concentração de nitrato medida, 5 poços estão acima do VMP de 10 mg/L estabelecido. Verifica-se assim que não somente a alta concentração de fluoreto é um problema com relação a qualidade da água da região.

A caracterização hidrogeoquímica para cálculo do índice de saturação (IS) foi feita para as fases fluorita, calcita, dolomita e gipso.

Os IS calculados para fluorita e calcita demonstraram que os Grupos 5 e 6 estão saturados, bem como a maioria das amostras do Grupo 4 e parte das amostras do Grupo 3. Este resultado indica uma maior influência da composição da rocha na

química destas águas. Os Grupos 1 e 2 estão subsaturados, logo são menos influenciados.

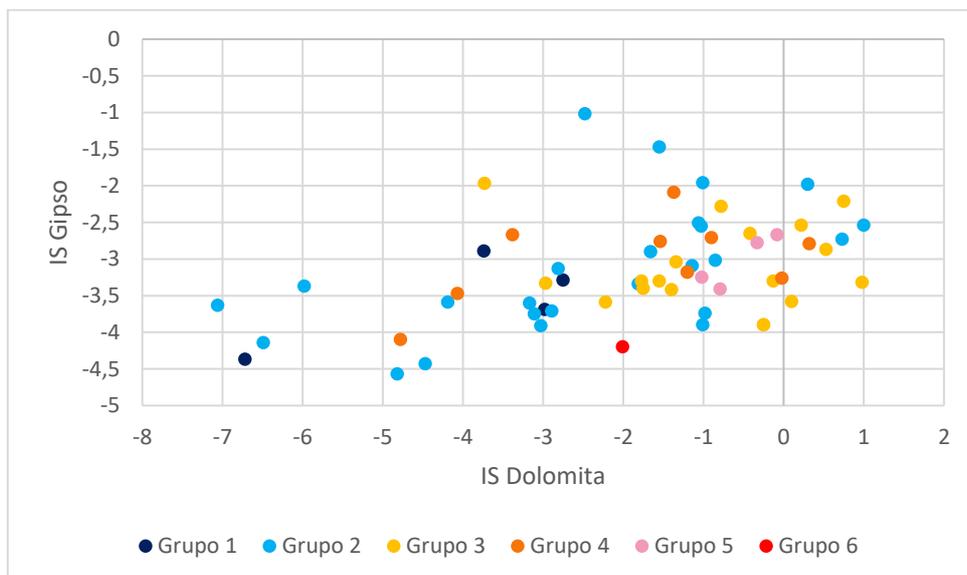
Figura 24 - Gráfico de dispersão dos índices de saturação de fluorita por calcita.



Fonte - Elaborado pela autora.

O índice de saturação para gipso e dolomita mostrou uma subsaturação para a maioria dos poços, com exceção da dolomita em alguns poços dos Grupos 2, 3, 4 e 5. O espalhamento das amostras não permite afirmar com clareza a relação destas fases com a composição dos poços amostrados.

Figura 25 - Gráfico de dispersão dos índices de saturação de dolomita por gipso.



Fonte - Elaborado pela autora.

Tabela 6 - Valores médios referente aos parâmetros principais estudados.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Fluoretos (mg/L)	0,9 a 0,99	1,00 a 1,50	1,51 a 3,00	3,01 a 4,50	4,51 a 6,00	maior que 6,01
Quantidade de poços	4	30	25	10	4	2
Profundidade do poço (m)	109,00	109,97	134,50	152,00	152,30	198,00
Nível estático (m)	5,29	10,20	10,85	17,74	13,98	53,00
Entrada de água (m)	63,00	53,59	72,65	100,69	99,59	152,50
pH	6,89	7,16	7,63	7,30	7,69	7,25
Alcalinidade total (mg/L)	69,06	96,30	126,17	114,79	137,61	104,65
Cloreto (mg/L)	19,39	40,75	136,70	11,25	10,91	6,30
Nitrato (mg/L)	2,18	4,89	0,54	0,85	2,52	10,10
Sulfato (mg/L)	5,99	46,31	27,35	14,84	8,30	1,90
Sódio (mg/L)	15,33	25,01	115,74	43,23	60,00	38,00
Cálcio (mg/L)	13,25	21,28	53,76	20,78	28,46	9,15
Potássio (mg/L)	1,50	4,37	2,66	1,00	*	2,00
Magnésio (mg/L)	2,83	13,01	14,66	8,67	5,06	2,70
Bicarbonato (mg/L)	84,20	115,47	151,87	137,53	168,18	167,00
Condutividade Elétrica (μ S/cm)	213,18	357,02	654,70	373,25	285,50	217,85
(*) sem dados coletados						

Fonte - Elaborado pela autora.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de água subterrânea nos municípios estudados (Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos) é ampla, apesar de existir abastecimento municipal pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) e pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) em Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos. Apesar de haver informação de que apenas 10,67% dos poços cadastrados referem-se a abastecimento doméstico, é necessária atenção na região em função dos perigos à saúde que as altas concentrações de fluoreto podem causar.

A presença de rochas graníticas ricas em plagioclásio, K-feldspato (ortoclásio e microclínio), quartzo, biotita e anfibólio como máficos, além de acessórios como apatita e fluorita, influencia na composição química das águas de Porto Alegre, Guaíba, Eldorado do Sul e Arroio dos Ratos. As entradas d'água em diferentes pontos corrobora essa hipótese pois é perceptível, principalmente relativo ao fluoreto, que: quando a entrada d'água está apenas no gnaisse, o pH é mais alto e a concentração de fluoreto também; quando a entrada d'água está no granito ou no granito e no gnaisse, o pH e a concentração de fluoreto ficam em intervalos intermediários (mas

ainda altos); e por fim quando uma das entradas d'água está próxima da cobertura sedimentar, o pH tende a diminuir, bem como as concentrações de fluoreto.

Os Grupos 1 e 2 sofrem maior influência das águas superficiais, conforme evidenciado pelos altos valores de nitrato e cloreto, além de pH mais baixo em relação aos outros grupos. As entradas d'água nestes grupos também são mais rasas que as dos demais grupos. O Poço 122 conforme ilustrado anteriormente demonstra bem essa característica por meio do diagrama de Stiff.

O Grupo 3 tem a maior quantidade de poços com pH mais elevado, que favorece o aumento da concentração de fluoretos.

Os Grupos 4, 5 e 6 possuem as maiores profundidades de poço e as entradas d'água também mais profundas. Os valores de cloreto são mais baixos e os de fluoreto mais altos, conclui-se assim que estão sujeitos a processos profundos que refletem a interação rocha-água prolongada devido ao grande tempo de residência.

Tal como o relatado pelos estudos em Gana, as altas concentrações de fluoreto em Porto Alegre, Eldorado do Sul, Guaíba e Arroio dos Ratos também estão relacionadas à litologia. As águas aqui também são bicarbonatadas cálcicas, sofrendo influência da mineralogia das rochas (granitos, gnaisses e tonalitos) e do tempo de residência nos poços.

REFERÊNCIAS

APAMBIRE, W. B.; BOYLE, D. R.; MICHEL, F. A. Geochemistry, genesis, and health implications of fluoriferous groundwaters in the upper regions of Ghana. **Environmental Geology**, v. 33, n. 1, p. 13-24, 1997.

BANKS, D. *et al.* Natural concentrations of major and trace elements in some Norwegian bedrock groundwaters. **Applied Geochemistry**, v. 10, n. 1, p. 1-16, 1995.

BANKS, D. *et al.* The chemistry of Norwegian groundwaters: I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. **Science of the Total Environment**, v. 222, n. 1, p. 71-91, 1998.

BARBOUR, R. **Determinação de impurezas em cobre eletrolítico por espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado**, 102f. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

BÅRDSSEN, A.; BJORVATN, K.; SELVIG, K. A. Variability in fluoride content of subsurface water reservoirs. **Acta Odontologica Scandinavica**, v. 54, n. 6, p. 343-347, 1996.

BOTHA, F. S.; VAN ROOY, J. L. Affordable water resource development in the northern province, South Africa. **Journal of African Earth Sciences**, v. 33, n. 3, p. 687-692, 2001.

BOYLE, D. R. Effects of base exchange softening on fluoride uptake in groundwaters of the Moncton Sub-basin, New Brunswick, Canada. **Waterrock interaction**, p. 771-774, 1992.

BOYLE, D. R. **The geochemistry of fluorine and its applications in mineral exploration**, 386 f. Tese de Doutorado. University of London, 1976.

BOYLE, D. R.; CHAGNON, M. An incidence of skeletal fluorosis associated with groundwaters of the maritime carboniferous basin, Gaspé region, Quebec, Canada. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 17, n. 1, p. 5-12, 1995.

BRASIL. **Portaria nº 2914**, de 12 de dezembro de 2011. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 22 nov. 2018.

CARRILLO-RIVERA, J. J.; CARDONA, A.; EDMUNDS, W. M. Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. **Journal of Hydrology**, v. 261, n. 1, p. 24-47, 2002.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Ficha de Informação de Produto Químico. Disponível em: http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=FL%D AOR. Acesso em: 15 nov. 2017.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO. **Indicadores de qualidade da água distribuída**. Disponível em: <http://www.corsan.com.br/indicadoresdequalidadedaaguadistribuida>. Acesso em: 11 nov. 2017.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Sistema de Informação de Águas Subterrâneas**. Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php. Acesso em: 09 nov. 2017.

CRAIG, L. *et al.* Determining the optimum locations for pumping low-fluoride groundwater to distribute to communities in a fluoridic area in the Upper East Region, Ghana. **Chemical Geology**, v. 476, p. 481-492, 2018.

CUNHA, G. G. **Caracterização estrutural e hidrogeológica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral na região do Alto Uruguai, noroeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 86p. Monografia (Conclusão de Curso). Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

CUNHA, G. G. *et al.* 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**. v. 43, n. 1. p. 55-67, 2016.

DELANEY, P. J. V. **Fisiografia e geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1965.

DESHMUKH, A. N.; WADASKAR, P. M.; MALPE, D. B. Fluorine in environment: A review. **Gondwana Geol. Mag**, v. 9, p. 1-20, 1995.

DEUTSCH, W. J.; SIEGEL, R. **Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination**. CRC Press, 1997.

DOWGIAŁŁO, J. Thermal water prospecting results at Jelenia Góra-Cieplice (Sudetes, Poland) versus geothermometric forecasts. **Environmental Geology**, v. 39, n. 5, p. 433-436, 2000.

EDMUNDS, W. M. Hydrogeochemistry of groundwaters in the Derbyshire Dome with special reference to trace constituents. **HM Stationery Office**, 1971.

ELY, H. C. **Fluorose e cárie dentária em cidades do RS: estudo epidemiológico em locais com diferentes níveis de flúor nas águas**. Porto Alegre, 1999.

EZAKI, S. *et al.* Avaliação da ocorrência de íon fluoreto nas águas subterrâneas dos Aquíferos Tubarão e Cristalino, região de Salto (SP). **Águas Subterrâneas**, v. 1, 2009.

FERNANDES, A. J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, v. 29, n. 1-2, p. 49-72, 2008.

FRENGSTAD, B.; BANKS, D.; SIEWERS, U. The chemistry of Norwegian groundwaters: IV. The pH-dependence of element concentrations in crystalline bedrock groundwaters. **Science of the Total Environment**, v. 277, n. 1, p. 101-117, 2001.

GACIRI, S. J.; DAVIES, T. C. The occurrence and geochemistry of fluoride in some natural waters of Kenya. **Journal of Hydrology**, v. 143, n. 3-4, p. 395-412, 1993.

GALEMBECK, T. M. B. **O complexo múltiplo, centrado e pluriserial Itu-SP**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 1997.

GEOQUÍMICA - FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E DIFRAÇÃO DE RAIOS X. FRX. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/geoquimica/frx-2/>. Acesso em: 11 nov. 2017.

GINÉ-ROSIAS, M. F. G. **Espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS)**. CENA, 1999.

GIZAW, B. The origin of high bicarbonate and fluoride concentrations in waters of the Main Ethiopian Rift Valley, East African Rift system. **Journal of African Earth Sciences**, v. 22, n. 4, p. 391-402, 1996.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Versão 7.3.0.3832 (32-bit). 2017. Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://earth.google.com/download-earth.html>. Acesso em: 11 nov. 2017.

GREGORY, T. R. **Caracterização estrutural e petrológica de metatonalitos e metadioritos do Complexo Arroio dos Ratos na sua seção-tipo, Região de Quitéria, RS**. 65 f. Dissertação de Mestrado. 2010.

GREGORY, T. R. **Evolução petrológica do magmatismo TTG paleoproterozoico do Complexo Arroio dos Ratos, Distrito de Quitéria, São Jerônimo/RS**. 2014.

HANDA, B. K. Geochemistry and genesis of Fluoride-Containing ground waters in india. **Groundwater**, v. 13, n. 3, p. 275-281, 1975.

HIBBARD, M. J. Petrography to petrogenesis. New Jersey, USA. **Prentice Halle**, 587p. 1975.

HASENACK, H. *et al.* **Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: geologia, solos, drenagem, vegetação/ocupação e paisagem**. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil em Síntese**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>. Acesso em: 11 nov. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil em Síntese**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/guaiba/panorama>. Acesso em: 11 nov. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil em Síntese**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/eldorado-do-sul/panorama>. Acesso em: 11 nov. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brasil em Síntese**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/arroio-dos-ratos/panorama>. Acesso em: 11 nov. 2017.

KIM, K.; JEONG, G. Y. Factors influencing natural occurrence of fluoride-rich groundwaters: a case study in the southeastern part of the Korean Peninsula. **Chemosphere**, v. 58, n. 10, p. 1399-1408, 2005.

KULLENBERG, B.; GUPTA, R. S. Fluoride in the Baltic. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 37, n. 5, p. 1327-1337, 1973.

LE BAS, M. J.; STRECKEISEN, A L. The IUGS systematics of igneous rocks. **Journal of the Geological Society**, v. 148, n. 5, p. 825-833, 1991.

LIU, Y.; ZHU, W. H. Environmental characteristics of regional groundwater in relation to fluoride poisoning in North China. **Environmental Geology**, v. 18, n. 1, p. 3-10, 1991.

LIU, Y.; ZHU, W. H. Environmental geology of high-content fluoride groundwater and fluoride-decreasing problem. **Journal of Hydrogeology Technology**, v. 19, p. 16-20, 1989.

LEUNG, D. C. W.; HRUDEY, S. E. Removal of fluorides from water supplies. **Alberta Environment Standards and Approvals Division**, p. 107, 1985.

MARIMON, M. P. C. *et al.* Evaluation of the potential impact of fluorine-rich fertilizers on the Guarani Aquifer System, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, n. 1, p. 77-84, 2013.

MENEGAT, R. *et al.* Porto Alegre antes do homem: evolução geológica. R. Menegat; ML Porto; CC Carraro; Fernandes, LAD (eds.) **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 11-24, 1998.

MURRAY, R. J. The Geology of "Zuarungu" ½ Field sheet. Accra, **Geological Survey Bulletin**, n. 25, 1960.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF) e por reflexão total (TXRF)**. Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1999.

NORDSTROM, D. K. *et al.* Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 53, n. 8, p. 1727-1740, 1989.

OLIVEIRA, L. D.; KOESTER, E.; SOLIANI JÚNIOR, E. Geoquímica das rochas graníticas pós-transcorrentes da região de Porto Alegre e Viamão, RS. **Geochimica Brasiliensis**, v. 15, n. 2, 2011.

PAULING, L.. **The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals: an introduction to modern structural chemistry**. Cornell University Press, 1960.

PEÇANHA, R. M. **Fluorita. Balanço mineral brasileiro, 2001**. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-fluorita/@@download/file/BALANCO_MINERAL_016_2001.pdf. Acesso em: 22 nov. 2018.

PHILIPP, R. P. **A evolução geológica e tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PHILIPP, R. P. **Condições de posicionamento do plutonismo da Suíte Dom Feliciano na Região de Porto Alegre, RS.** SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, v. 5, p. 207-209, 1995.

PHILIPP, R. P.; CAMPOS, R. Sacks de. Geologia, petrografia e litogeoquímica dos Gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: implicações geotectônicas. **Pesquisas em Geociências.** Porto Alegre, RS. Vol. 31, n. 2 (2004), p. 79-94, 2004.

PHILIPP, R. P.; NARDI, L. V. S.; MACHADO, R. O Magmatismo Granítico Neoproterozóico tardi a pós-colisional da região de Porto Alegre, RS. **Contribuição ao estudo dos granitos e rochas correlatas**, p. 129-152, 1998.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JR, F.. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 83-104, 2016.

PHILIPP, R. P.; RÊGO, I. T. S. F.; SIVIERO, R. S. Geologia das rochas granitóides da região de Porto Alegre, RS. XXXVIII **Congr Brasileiro de Geologia**, Balneário Camboriú, SC, v. 2, p. 98-99, 1994.

POST, V. PHREEQC for Windows. **Graphical User Interface-2005**, Version, v. 2, n. 03, 2011.

RAMA RAO, N. V. Geochemical factors influencing the distribution of fluoride in rocks, soils, and water sources of Nalgonda district. **AP Unpublished thesis**, Osmania University, 1982.

RAMAGE, L. **Hidroggeoquímica do sistema aquífero granular cenozóico do município de Porto Alegre, RS.** Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

RIO GRANDE DO SUL. Portaria nº 10, de 16 de agosto de 1999. Define teores de concentração do íon fluoreto nas águas para consumo humano fornecidas por Sistemas Públicos de Abastecimento. Secretaria de Estado da Saúde. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/sms/usu_doc/portaria_10_99.pdf. Acesso em: 09 nov. 2017.

ROISENBERG, C. *et al.* Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas Subterrâneas de Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 4, p. 137-147, 2003.

SAXENA, V. K.; AHMED, S. Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater. **Environmental Geology**, v. 43, n. 6, p. 731-736, 2003.

SCHNEIDER, A. W. *et al.* Mapa geológico da Folha Porto Alegre, RS, escala 1: 50.000. Porto Alegre: CNPq, 1974.

SHANKAR, P. M. *et al.* Classification of breast masses in ultrasonic B scans using Nakagami and K distributions. **Physics in Medicine and Biology**, v. 48, n. 14, p. 2229, 2003.

SPRY, A. **Metamorphic textures**, 3 ed. Oxford, Pergamon, 350p, 1969.

STRECKEISEN, A. To each plutonic rock its proper name. **Earth-Science Reviews**, v. 12, n. 1, p. 1-33, 1976.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A.; LOSS, E. L. Roteiro geológico da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. In: **Congresso Da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, p. 1-26, 1987.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Sistema de Solicitação de Análises de Raios X**. Disponível em: <http://csd.fisica.ufc.br/solicitacoes/#/Inicio>. Acesso em: 15 nov. 2017.

VIERO, A. P. *et al.* The origin of fluoride in the granitic aquifer of Porto Alegre, Southern Brazil. **Environmental geology**, v. 56, n. 8, p. 1707, 2009.

VILLWOCK, J. A. **Contribuição à geologia do holoceno da província costeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 113p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1972.

VILLWOCK, J. A. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis. **Pesquisas em Geociências**, v. 16, n. 16, p. 5-49, 1984.

VILLWOCK, J. A. *et al.* Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. In: **International symposium on sea-level changes and quaternary shorelines**, p. 79-97, 1986.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J. Geologia costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica**, Porto Alegre, v. 8, p. 1-45, 1995.

VOROSHELOV, Y. I. Geochemical behaviour of fluorine in the groundwaters of the Moscow region. **Geochem. Int.**, v. 2, p. 261, 1966.

WEDEPOHL, K.H. **Handbook of Geochemistry**. Springer Verlag, II-1, section 9, Fluorine, 1978.

WENZEL, W. W.; BLUM, W. E. H. Fluorine speciation and mobility in F-contaminated soils. **Soil Science**, v. 153, n. 5, p. 357-364, 1992.

WILDNER, W. *et al.* **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM. Mapa escala 1:750.000. Programa Geológico do Brasil. Mapas Estaduais, 2008.

WILLIAMS, M. L. *et al.* Syntectonic generation and segregation of tonalitic melts from amphibolite dikes in the lower crust, Striding-Athabasca mylonite zone, northern Saskatchewan. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 100, n. B8, p. 15717-15734, 1995.

WISE, D. U. *et al.* Topographic lineament swarms: Clues to their origin from domain analysis of Italy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 96, n. 7, p. 952-967, 1985.

YARDLEY, B. W. D. **An introduction to metamorphic petrology**. 1989.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking-water quality. **WHO chronicle**, v. 38, p. 104-8, 2011.

Anexo A - Dados utilizados na pesquisa como condutividade elétrica, dureza, pH, litologias dos poços agrupados, concentração iônica, localização e tipo de aquífero (continua).

	Poço	Condutividade Elétrica	Dureza	pH	Litologia
Grupo 1	118	193,00	58,00	7,00	Granito
	119	316,00	80,81	6,94	Granito e Gnaisses
	120	270,00	78,00	7,20	Granito
	122	73,70	10,00	6,40	Granito
	Média	213,18	56,70	6,89	
Grupo 2	61	95,00	64,00	6,50	Granito
	62	150,00	72,00	7,70	Granito
	64	800,00	192,00	7,00	Granito e Gnaisse
	65	300,00	50,00	7,60	Granito
	69	387,00	107,90	6,90	Granito
	70	414,00	175,87	7,04	Granito
	71	310,00	97,00	7,86	Gnaisse, Quartzito, Granito
	75	415,00	128,43	8,29	*
	78	177,90	36,36	6,19	Granito
	81	232,00	96,04	7,56	Granito
	82	118,10	40,40	5,95	Granito
	94	205,00	70,00	6,80	Granito
	95	*	56,00	6,50	Granito
	97	102,50	46,00	7,10	Granito
	98	240,00	78,00	7,60	Granito
	99	320,00	80,00	8,30	Granito
	101	180,00	64,00	7,30	Granito
	102	*	*	6,30	Granito
	110	450,00	296,00	6,50	Granito
	111	210,00	48,00	6,70	Granito
	113	160,00	56,00	7,70	Granito
	115	265,00	34,00	7,00	Granito
	16	243,00	63,00	8,00	Granito
	36	220,00	76,00	7,80	Gnaisse
	52	*	64,00	7,60	Granito
	54	1450,00	186,00	7,10	Granito
	56	155,00	34,00	6,50	Granito e diabásio
57	950,00	204,00	7,10	Granito	
58	850,00	214,00	7,60	Granito	
59	240,00	64,00	6,80	Granito	
Média	357,02	96,31	7,16		
Grupo 3	13	224,00	103,77	7,21	Granito e gnaisses

	Poço	Condutividade Elétrica	Dureza	pH	Litologia
	15	184,00	48,00	7,30	Granito
	27	250,00	56,00	8,20	Granito
	28	223,00	68,00	7,50	Granito
	30	6290,00	1547,00	7,30	Granito
	40	268,00	58,00	8,30	Granito
	41	268,00	58,00	*	Granito
	42	250,00	64,00	6,80	Granito
	48	1100,00	196,00	7,90	Granito e gnaisses
	53	300,00	104,00	8,10	Granito
	55	280,00	86,00	8,40	Granito
	63	300,00	68,00	7,10	Granito e gnaisses
	74	770,00	196,40	8,05	Gnaisse
	77	416,00	163,20	7,17	Gnaisse
	83	290,00	97,40	8,00	Granito
	85	234,00	56,72	7,47	Granito
	87	233,00	54,33	7,51	Granito e gnaisses
	88	2530,00	1092,96	7,91	Granito e gnaisses
	91	388,00	105,00	7,30	Granito
	96	260,00	98,00	7,50	Granito
	104	289,30	76,00	7,20	Granito
	105	225,00	56,00	7,90	Gnaisse
	106	320,10	74,00	7,30	Gnaisse
	108	250,00	76,00	7,80	Granito
	109	225,00	56,00	7,90	Granito e gnaisses
	Média	654,70	186,35	7,63	
Grupo 4	29	530,00	120,00	7,10	Granito
	35	265,00	103,00	7,80	Granito
	51	145,00	36,00	6,70	Granito
	72	2,46	80,07	7,90	Granito
	76	1373,00	36,32	6,74	Granito e gnaisse
	80	322,00	127,14	7,61	Gnaisse
	84	240,00	104,91	6,40	Granito
	92	290,00	114,00	7,20	Granito
	103	290,00	114,00	7,20	Granito
	112	275,00	65,85	8,30	Gnaisse
	Média	373,25	90,13	7,30	
Grupo 5	14	272,00	100,46	7,77	Granito
	50	265,00	76,00	7,60	Granito e "cataclasito"
	79	305,00	102,65	7,89	Gnaisse
	107	300,00	86,00	7,50	Granito

	Poço	Condutividade Elétrica	Dureza	pH	Litologia
	Média	285,50	91,28	7,69	
Grupo 6	32	281,00	31,40	7,40	Granito
	47	154,70	36,50	7,10	Granito
	Média	217,85	33,95	7,25	
* sem informação					

	Poço	Na	K	Ca	Cl	F	Mg	NO3	SO4	HCO3	CO3	Litologia
Grupo 1	118	12,00	0,80	20,00	4,30	0,90	2,00	3,80	1,70	95,00	*	Granito
	119	22,00	*	10,00	27,35	0,92	8,30	2,74	9,07	105,20	*	Granito e Gnaisses
	120	*	*	20,80	36,90	0,90	0,10	0,00	10,60	104,90	*	Granito
	122	12,00	2,20	2,20	9,00	0,90	0,90	*	2,60	31,70	*	Granito
	Média	15,33	1,50	13,25	19,39	0,91	2,83	2,18	5,99	84,20		
Grupo 2	61	*	*	2,40	14,20	1,11	16,70	0,90	1,90	48,80	*	Granito
	62	*	*	17,60	10,70	1,10	8,10	5,30	1,80	87,80	*	Granito
	64	*	*	54,50	76,70	1,30	16,10	0,35	185,00	152,40	*	Granito e Gnaiss
	65	*	*	12,80	17,00	1,30	5,20	0,35	11,00	139,10	*	Granito
	69	19,00	1,00	30,61	43,11	1,50	31,93	13,55	38,74	*	*	Granito
	70	19,00	12,00	28,53	45,72	1,18	24,36	13,59	60,64	*	*	Granito
	71	31,00	0,00	19,00	*	1,27	11,00	*	*	*	157,80	Gnaiss, Quartzito, Granito
	75	50,00	*	39,40	56,05	1,01	6,99	8,80	17,24	188,74	*	Sem informação
	78	26,00	*	2,70	19,82	1,11	2,80	0,01	25,60	88,62	*	Granito
	81	24,50	9,50	27,24	11,67	1,41	6,52	6,50	20,86	113,81	*	Granito
	82	9,60	*	4,40	31,39	1,29	1,50	0,07	7,80	63,93	*	Granito
	94	*	*	19,20	18,10	1,30	6,40	26,60	1,60	81,70	*	Granito
	95	*	*	14,40	11,70	1,40	5,80	1,80	2,90	69,50	*	Granito
	97	*	*	9,60	6,70	1,50	6,30	0,53	3,20	63,40	*	Granito
	98	*	*	24,00	11,70	1,10	5,20	0,30	7,40	145,20	*	Granito
	99	*	*	23,20	14,20	1,50	6,90	0,00	15,80	161,00	*	Granito
	101	*	*	16,00	14,20	1,10	6,90	1,40	4,90	102,50	*	Granito
	102	*	*	2,40	14,70	1,00	1,70	0,10	4,00	40,30	*	Granito
110	*	*	76,00	90,80	1,40	30,60	0,35	550,00	185,40	*	Granito	
111	*	*	12,00	14,50	1,50	52,00	44,30	2,50	59,80	*	Granito	
113	*	*	15,20	10,30	1,30	5,20	0,40	1,40	113,50	*	Granito	
115	*	*	5,60	16,30	1,10	5,80	0,00	22,20	132,90	*	Granito	

	Poço	Na	K	Ca	Cl	F	Mg	NO3	SO4	HCO3	CO3	Litologia
	16	33,00	1,40	17,00	3,00	1,40	5,00	0,10	*	*	146,00	Granito
	36	13,00	2,30	22,00	3,00	1,30	5,00	*	*	139,00	*	Gnaiss
	52	*	*	16,80	41,90	1,50	4,60	0,17	13,00	70,80	*	Granito
	54	*	*	25,70	227,20	1,40	35,10	0,17	130,00	213,50	*	Granito
	56	*	*	5,60	8,90	1,30	5,80	1,60	1,00	78,10	*	Granito e diabásio
	57	*	*	48,90	220,00	1,40	23,60	0,35	17,00	156,20	*	Granito
	58	*	*	31,30	103,70	1,40	39,10	0,40	100,00	228,10	*	Granito
	59	*	*	14,40	24,50	1,10	8,10	8,90	3,00	78,10	*	Granito
	Média	25,01	4,37	21,28	40,75	1,29	13,01	4,89	46,31	115,47	151,90	
Grupo 3	13	26,00	3,00	27,68	7,33	2,30	8,07	0,00	6,66	169,65	*	Granito e gnaisses
	15	22,00	4,00	10,30	5,00	2,00	5,40	0,00	4,16	89,00	*	Granito
	27	30,00	1,10	17,00	4,20	3,00	3,00	0,00	5,30	127,00	*	Granito
	28	18,00	1,70	21,00	3,20	2,00	4,00	0,18	3,20	117,00	*	Granito
	30	420,00	7,45	380,00	1684,00	1,65	146,00	0,00	128,40	*	*	Granito
	40	36,00	2,10	15,00	2,00	2,60	5,00	0,00	*	127,00	8,00	Granito
	41	36,00	2,10	15,00	*	2,60	5,00	*	*	127,00	*	Granito
	42	23,00	2,10	16,00	15,30	2,30	6,00	0,00	5,20	112,00	*	Granito
	48	*	*	64,10	390,50	3,00	10,40	0,10	12,60	131,80	*	Granito e gnaisses
	53	*	*	30,50	9,90	1,60	8,00	0,89	9,00	163,50	*	Granito
	55	*	*	23,20	9,60	1,60	8,10	0,62	4,00	154,90	*	Granito
	63	*	*	18,40	13,10	1,60	6,30	0,26	5,00	180,50	*	Granito e gnaisses
	74	420,00	0,00	54,58	165,23	2,57	14,00	1,06	39,55	185,16	*	Gnaiss
	77	97,00	*	68,75	28,70	2,38	0,01	0,10	41,53	253,80	*	Gnaiss
	83	18,50	2,80	29,00	7,80	2,00	6,10	0,04	1,80	145,00	*	Granito
85	36,00	2,00	34,86	11,41	2,73	0,00	0,70	10,61	184,08	*	Granito	
87	39,00	2,50	11,14	11,27	2,94	10,49	0,06	0,00	91,66	*	Granito e gnaisses	

	Poço	Na	K	Ca	Cl	F	Mg	NO3	SO4	HCO3	CO3	Litologia
	88	630,00	9,00	323,75	815,41	2,30	66,27	0,00	287,45	*	*	Granito e gnaisses
	91	34,00	0,01	63,70	22,50	2,97	6,33	2,21	20,20	211,70	*	Granito
	96	*	*	29,60	10,60	2,80	17,40	0,09	16,50	161,00	*	Granito
	104	36,00	0,90	18,00	9,00	2,20	7,50	*	4,20	134,20	*	Granito
	105	*	*	16,00	7,00	2,40	5,10	*	8,00	*	*	Gnaisse
	106	46,00	1,80	16,80	28,00	1,60	8,00	*	5,80	135,40	*	Gnaisse
	108	*	*	23,60	12,80	1,60	4,90	4,43	1,00	187,90	*	Granito
	109	*	*	16,00	7,00	2,40	5,10	*	9,00	*	*	Granito e gnaisses
	Média	115,74	2,66	53,76	136,70	2,29	14,66	0,54	27,35	151,87	8,00	
Grupo 4	29	*	*	32,90	*	3,30	9,20	0,09	55,00	201,30	*	Granito
	35	19,00	*	33,00	2,70	3,54	10,00	0,03	3,50	152,00	*	Granito
	51	*	*	4,00	12,10	3,30	7,50	1,80	3,00	30,50	*	Granito
	72	47,90	*	25,35	11,74	3,02	3,90	2,07	15,00	77,69	*	Granito
	76	48,00	*	9,36	7,34	4,50	3,01	2,25	6,06	67,85	*	Granito e gnaisse
	80	95,00	*	20,01	14,41	3,90	0,74	0,78	18,26	206,49	*	Gnaisse
	84	4,50	*	31,20	10,98	3,15	6,29	0,54	13,33	175,82	*	Granito
	92	*	*	17,20	16,30	4,00	20,50	0,30	8,00	163,50	*	Granito
	103	*	*	17,20	16,30	4,00	20,50	0,30	8,00	163,50	*	Granito
	112	45,00	1,00	17,60	9,34	3,16	5,07	0,30	18,24	136,64	0,00	Gnaisse
	Média	43,23	1,00	20,78	11,25	3,59	8,67	0,85	14,84	137,53	0,00	
Grupo 5	14	33,00	*	31,71	9,06	4,72	4,95	2,37	10,78	167,52	*	Granito
	50	*	*	26,50	9,30	5,60	2,40	0,90	3,90	168,40	*	Granito e "cataclasito"
	79	87,00	*	30,82	12,47	4,56	5,98	4,29	15,53	163,61	*	Gnaisse
	107	*	*	24,80	12,80	5,28	6,90	*	3,00	173,20	*	Granito
	Média	60,00		28,46	10,91	5,04	5,06	2,52	8,30	168,18		
Grupo 6	32	50,00	2,00	9,40	7,60	8,15	1,90	0,20	1,20	167,00	*	Granito
	47	26,00	2,00	8,90	5,00	8,71	3,50	20,00	2,60	*	*	Granito
	Média	38,00	2,00	9,15	6,30	8,43	2,70	10,10	1,90	167,00		

* sem informação						
Poço	UTM N	UTM E	Tipo	Aquífero	pH	Fluoreto (mg/L)
13	666900 9	46310 4	Complexo gnaissico/migmatitico	Aquífero: Fissural	7.2 1	2.3
14	666595 5	45142 2	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.7 7	4.72
15	665412 1	44638 2	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.3 0	2
16	667160 9	43910 4	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	8.0 0	1.4
27	667162 5	43910 6	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	8.2 0	3
28	667139 8	43670 9	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.5 0	2
29	668220 0	48880 0	Quaternario	Aquífero: Fissural	7.1 0	3.3
30	668246 9	48385 2	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.3 0	1.65
32	667549 2	43545 3	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.4 0	8.15
35	666530 0	42660 0	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.8 0	3.54
36	666438 2	42629 4	Pre-cambriano indiviso	Aquífero: Fissural	7.8 0	1.3
40	667243 6	44035 0	Depositos aluvionares	Aquífero: Fissural	8.3 0	2.6
41	667400 0	46000 0		Aquífero		2.6
42	666456 8	46528 4	Depositos litoraneos	Aquífero: Fissural	6.8 0	2.3
47	665815 0	43137 2	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.1 0	8.71
48	665598 2	49314 0	Quaternario	Aquífero: Fissural	7.9 0	3
50	667521 6	48361 4	Aluvioes	Aquífero: Fissural	7.6 0	5.6

Poço	UTM N	UTM E	Tipo	Aquífero	pH	Fluoreto (mg/L)
51	667449 9	47931 4	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	6.7 0	3.3
52	665815 0	48620 0	Quaternario	Aquífero: Fissural	7.6 0	1.5
53	666912 6	47811 4	Aluvioes	Aquífero: Fissural	8.1 0	1.6
54	665785 0	48175 0	Aluvioes	Aquífero: Fissural	7.1 0	1.4
55	666013 4	48452 9	Aluvioes	Aquífero: Fissural	8.4 0	1.6
56	666501 8	47979 2	Quaternario	Aquífero	6.5 0	1.3
57	667565 8	47823 8	Quaternario	Aquífero: Fissural	7.1 0	1.4
58	668081 7	48239 0	Quaternario	Aquífero: Fissural	7.6 0	1.4
59	667215 8	48011 4	Proterozoico medio	Aquífero: Fissural	6.8 0	1.1
61	666755 9	47644 5	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	6.5 0	1.11
62	667750 7	48242 5	Pre-cambriano indiviso	Aquífero: Fissural	7.7 0	1.1
63	667450 0	48410 0	Aluvioes	Aquífero: Fissural	7.1 0	1.6
64	668023 3	48064 7	Quaternario	Aquífero: Fissural	7.0 0	1.3
65	667620 0	47862 0	Quaternario	Aquífero: Fissural	7.6 0	1.3
69	667771 7	47858 3	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	6.9 0	1.5
70	667778 8	47884 0	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.0 4	1.18
71	668018 2	49123 6	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.8 6	1.27
72	667966 8	49123 4	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.9 0	3.02

Poço	UTM N	UTM E	Tipo	Aquífero	pH	Fluoreto (mg/L)
74	668276 0	48731 6	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	8.0 5	2.57
75	668276 9	49019 9		Aquífero	8.2 9	1.01
76	667802 0	48085 5	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	6.7 4	4.5
77	668027 3	48592 7	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.1 7	2.38
78	665546 5	49557 5	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	6.1 9	1.11
79	667498 4	48179 4	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.8 9	4.56
80	667504 5	48180 7	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.6 1	3.9
81	667754 8	48135 9	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.5 6	1.41
82	666779 5	47820 6	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	5.9 5	1.29
83	666788 3	47797 4	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	8.0 0	2
84	666870 0	47941 5	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	6.4 0	3.15
85	666857 5	47947 0	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.4 7	2.73
87	666893 2	48372 6	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.5 1	2.94
88	668121 6	48183 1	Aluvioes	Aquífero: Fissural	7.9 1	2.3
91	667846 6	48740 9	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.3 0	2.97
92	666879 0	47835 6	Aluvioes	Aquífero: Fissural	7.2 0	4
94	666878 3	47821 5	Complexo granito-gnaissico Pinheiro Machado	Aquífero: Fissural	6.8 0	1.3
95	666878 0	47851 5	Complexo granito-gnaissico Pinheiro Machado	Aquífero: Fissural	6.5 0	1.4

96	666882 8	47852 0	Complejo granito-gnaissico Pinheiro Machado	Aquífero: Fissural	7.5 0	2.8
97	666880 9	47858 3	Complejo granito-gnaissico Pinheiro Machado	Aquífero: Fissural	7.1 0	1.5
98	666874 2	47847 5	Complejo granito-gnaissico Pinheiro Machado	Aquífero: Fissural	7.6 0	1.1
99	666546 8	47848 4	Complejo granito-gnaissico Pinheiro Machado	Aquífero: Fissural	8.3 0	1.5
101	665661 5	48480 0	Depositos fluvio-lagunares	Aquífero: Fissural	7.3 0	1.1
102	665762 5	48225 5	Depositos fluvio-lagunares	Aquífero: Fissural	6.3 0	1
103	666890 0	47830 0		Aquífero	7.2 0	4
104	667612 9	48620 7	Complejo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.2 0	2.2
105	667439 6	48570 5	Complejo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.9 0	2.4
106	667612 4	48620 7	Complejo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.3 0	1.6
107	666896 1	47840 2	Depositos coluvionares	Aquífero: Fissural	7.5 0	5.28
108	666985 0	47595 0	Pre-cambriano indiviso	Aquífero: Fissural	7.8 0	1.6
109	667450 0	48570 0	Pre-cambriano indiviso	Aquífero: Fissural	7.9 0	2.4
110	668180 0	48120 0	Pre-cambriano indiviso	Aquífero: Fissural	6.5 0	1.4
111	667792 0	47930 0	Pre-cambriano indiviso	Aquífero: Fissural	6.7 0	1.5
112	667980 0	48595 0	Depositos aluvio-coluvionares	Aquífero: Fissural	8.3 0	3.16
113	665692 0	48743 0	Complejo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.7 0	1.3
115	665960 0	48750 0	Complejo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.0 0	1.1
118	667013 1	43669 6	Complejo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	7.0 0	0.9

119	667899 9	48460 9	Complexo granito-gnaissico	Aquífero: Fissural	6.9 4	0.92
120	665510 9	48668 8	Depositos fluvio-lagunares	Aquífero: Poroso	7.2 0	0.9
122	667425 0	47865 0	Pre-cambriano indiviso	Aquífero: Fissural	6.4 0	0.9