

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

MATHEUS ROSSI SANTOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS HIDROGEOQUÍMICOS E APLICAÇÃO DE
ISÓTOPOS AMBIENTAIS ESTÁVEIS DE H, O E Pb NO ESTUDO DO SISTEMA
AQUÍFERO FRATURADO PRÉ-CAMBRIANO NO MUNICÍPIO DE PORTO
ALEGRE, RS**

Porto Alegre, 2017

MATHEUS ROSSI SANTOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS HIDROGEOQUÍMICOS E APLICAÇÃO DE
ISÓTOPOS AMBIENTAIS ESTÁVEIS DE H, O E Pb NO ESTUDO DO SISTEMA
AQUÍFERO FRATURADO PRÉ-CAMBRIANO NO MUNICÍPIO DE PORTO
ALEGRE, 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 M.^a Jaqueline Ozorio Chies

Supervisor: Prof. Dr. Ari Roisenberg

Porto Alegre, 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Santos, Matheus Rossi

Análise estatística de dados hidrogeoquímicos e aplicação de isótopos ambientais estáveis de H, O e Pb no estudo do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano no Município de Porto Alegre, RS. / Matheus Rossi Santos. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017. [113 f.] ils.

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientadora: Jaqueline Ozorio Chies

1. Hidrogeoquímica. 2. Estatística Multivariada. 3. Isótopos Ambientais Estáveis. 4. Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano. 5. Município de Porto Alegre. I. Título.

CDU 550.461

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

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 **Análise estatística de dados hidrogeoquímicos e aplicação de isótopos ambientais estáveis de H, O e Pb no estudo do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano no Município de Porto Alegre, RS** elaborado por Matheus Rossi Santos, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Artur Cezar Bastos Neto

Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus

Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Humberto e Laís, pelo esforço heroico realizado para que eu tivesse as melhores condições de aprendizagem durante minha vida, tanto em aspectos de formação pessoal quanto aos de conhecimentos científicos, como também pelo suporte imensurável nesta etapa geológica, me apoiando nas mais diversas situações.

O interesse deles, desde minha infância, em me manter em contato com a natureza, desde as trilhas nos diversos cânions formados nos processos de intemperismo e erosão das litologias vulcânicas do Serra Geral, até as visitas às encantadoras praias dos sistemas laguna-barreira do litoral gaúcho, possibilitaram-me um contato próximo ao sistema Terra desde cedo, cativando minha curiosidade às ciências naturais, tendo sido a fagulha que acendeu meu interesse na Geologia.

AGRADECIMENTO

Aos meus orientadores, Ari e Jaqueline, pelos 5 anos de aprendizado e amizade, me ajudando de maneira extraordinária a evoluir como pessoa.

Aos meus camaradas do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, André, Edinei, Gisela e Tiago, pela árdua missão que trilhamos juntos, recheada de obstáculos, para obter os dados isotópicos.

À amiga e colega de sala, Luciana, pelo fundamental suporte em campo e laboratório.

Às gurias do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, da Universidade de São Paulo, Alyne, Elí e Veridiana, pelos valiosos padrões isotópicos e o curso intensivo sobre metodologia analítica de isótopos.

À Isadora, pela importante ajuda para desbravar o desafiador mundo da estatística.

Aos professores e técnicos do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul que me forneceram materiais para a realização deste trabalho: Carla, Denise, Isaías e Viero.

Aos porto-alegrenses que se dispuseram a me ajudar na etapa de campo, permitindo acesso aos poços tubulares de água subterrânea.

Aos brasileiros, pagadores de altíssimos impostos, por financiarem esta pesquisa.

“Somewhere, something incredible is waiting to be known.”

(Carl Sagan)

“Pass on what you have learned.”

(Yoda)

RESUMO

O Município de Porto Alegre apresenta centenas de poços tubulares cadastrados, sendo a maioria perfurada sobre litologias heterogêneas granito-gnáissicas, que representam o Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC). O trabalho teve como objetivos: organizar um banco de dados referente ao SAFPC; identificar tipos hidrogeoquímicos no sistema; caracterizar isótopos estáveis de H, O e Pb no manancial; e integrar os dados para reconhecer fatores e processos que controlam a hidrogeoquímica do aquífero. A metodologia adotada teve a aplicação de técnicas estatísticas em dados hidrogeoquímicos (Análise de Componentes Principais, Análise de Agrupamentos Hierárquicos, cálculo de índices de saturação e quantificação de lineamentos morfo-estruturais), verificando-se a correlação entre os resultados. A partir da análise estatística foi planejada a amostragem de litologias e de água subterrânea, para obtenção de assinaturas isotópicas. As leituras de isótopos se deram em espectrômetro de massa de razão isotópica para H e O, e espectrômetro de massa de ionização térmica para Pb. Por fim, os dados hidrogeoquímicos e isotópicos foram compilados, correlacionados e reinterpretados, a partir da geração de gráficos e tabelas. Os resultados obtidos mostram que o controle químico das águas possui relação ao tipo de aquífero (SAFPC ou ao Sistema Aquífero Granular Cenozoico que o sobrepõe parcialmente), e também às direções preferenciais de estruturas tectônicas. Lineamentos E-O apresentam a maior correlação com misturas de águas e aporte de íons da dissolução de minerais secundários, indicando-os como importantes conexões hidráulicas no sistema. Maiores concentrações de fluoreto e assinaturas isotópicas de Pb correspondentes às das unidades granito-gnáissicas definem o controle geogênico no aquífero. Por outro lado, são registrados poços nos quais torna-se evidente a ação de processos superficiais e interferências antrópicas, marcados por valores mais elevados de nitrato e assinaturas isotópicas de Pb mais diferenciadas em relação às das litologias. A utilização de técnicas estatísticas e de análises isotópicas demonstrou a importância destas ferramentas para subsidiar a gestão e planejamento do uso das águas subterrâneas do SAFPC.

Palavras-chave: Hidrogeoquímica. Estatística Multivariada. Isótopos Ambientais Estáveis. Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano. Município de Porto Alegre.

ABSTRACT

The Municipality of Porto Alegre has hundreds of registered tubular wells, being the majority drilled on heterogeneous granite-gneissic lithologies which represent the Pre-Cambrian Fractured Aquifer System (Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano – SAFPC). The work had as objectives: to organize a database referring to the SAFPC; to identify hydrogeochemical types in the system; to characterize H, O and Pb stable isotopes in the reservoir; and to integrate the data to recognize factors and processes controlling the hydrogeochemistry of the aquifer. The adopted methodology was the application of statistical techniques on the hydrogeochemical data (Principal Component Analysis, Hierarchical Grouping Analysis, saturation index calculation and morphostructural lineaments quantification), verifying the correlation between the results. From the statistical analysis it was planned the rock and groundwater sampling, for the obtainment of isotopic signatures. The readings of isotopes were made in an isotope ratio mass spectrometer for H and O and in a thermal ionization mass spectrometer for Pb. Lastly, the hydrogeochemical and isotopic data were compiled, correlated and reinterpreted from the generation of graphs and tables. The obtained results show that the water chemical control is related to the type of aquifer (SAFPC or the Cenozoic Granular Aquifer System that partially overlaps the first) and also to the preferred directions of tectonic structures. E-W lineaments present the highest correlation with water mixing and ion contribution from the dissolution of secondary minerals, which indicates them being important hydraulic connections in the system. Higher fluoride concentrations and Pb isotope signatures corresponding to the granite-gneissic rocks define the geogenic control of the aquifer. On the other hand, there are wells in which become evident the action of superficial processes and anthropic interferences, marked by higher values of nitrate and more differentiated Pb isotopic signatures in relation of the lithological ones. The use of statistical techniques and isotopic analysis demonstrated the importance of these tools to assist the groundwater management of the SAFPC.

Keywords: Hydrogeochemistry. Multivariate Statistics. Environmental Stable Isotopes. Pre-Cambrian Fractured Aquifer System. Municipality of Porto Alegre.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	16
Figura 2 – Mapa geológico do Município de Porto Alegre	20
Figura 3 – Imagem de relevo sombreado do Município de Porto Alegre, ressaltando as estruturas geomorfológicas	35
Figura 4 – Esquema simplificado de um espectrômetro de massa, com seus três componentes principais: fonte de íons, analisador e coletores.....	42
Figura 5 – Poços selecionados para o desenvolvimento da pesquisa.....	49
Figura 6 – Dendrograma da Análise de Agrupamentos Hierárquicos, com os quatro agrupamentos discriminados	53
Figura 7 – Gráfico tridimensional dos três componentes, mostrando a distribuição de poços separados por agrupamento	54
Figura 8 – Diagrama de Piper com os poços identificados por agrupamento	54
Figura 9 – Localização dos poços no mapa geológico identificados por agrupamento	56
Figura 10 – Componente 1 vs. Componente 2 por agrupamento	58
Figura 11 – Componente 3 vs. Componente 2 por agrupamento	59
Figura 12 – Componente 1 vs. Componente 3 por agrupamento	59
Figura 13 – Gráfico de frequência das concentrações de fluoreto por agrupamento	60
Figura 14 – Gráfico de dispersão dos índices de saturação de calcita vs. fluorita por agrupamento.....	62
Figura 15 – Gráfico de dispersão dos índices de saturação de dolomita vs. gipso por agrupamento.....	63
Figura 16 – Lineamentos identificados no Município de Porto Alegre.	64
Figura 17 – Mapa da densidade total de lineamentos no Município de Porto Alegre	65
Figura 18 – Diagrama de caixa da densidade total de lineamentos por agrupamento	65
Figura 19 – Diagramas de caixa da densidade de lineamentos NO-SE, NE-SO, N-S e E-O por agrupamento	66
Figura 20 – Localização dos poços amostrados no mapa geológico.....	72

Figura 21. Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ dos poços amostrados, plotados juntamente a valores de referência da Linha de Água Meteórica Local (LAML) e dados do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC) e Sistema Aquífero Granular Cenozoico (SAGC)	76
Figura 22 – Gráfico de fluoreto vs. $\delta^{18}\text{O}$ com os poços separados por agrupamento	78
Figura 23 – Gráfico de fluoreto vs. $\delta^{18}\text{O}$ nos Agrupamentos II, III e IV	78
Figura 24 – Gráfico $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas	82
Figura 25 – Gráfico $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas	82
Figura 26 – Gráfico $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas	83
Figura 27 – Diagrama $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas, com campos de compartimentos ambientais	84

FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Local de amostragem do Granito Ponta Grossa (PG-2), em afloramento pouco alterado	38
Fotografia 2 – Calibração dos equipamentos	39
Fotografia 3 – Leitura in situ do pH, condutividade elétrica e temperatura	39
Fotografia 4 – Amostragem de água com a lavagem prévia dos frascos por três vezes com a própria água do poço.....	40
Fotografia 5 – Coleta de água para análise de isótopos de H e O.....	40
Fotografia 6 – Ferramentas do Laboratório de Preparação de Amostras do Instituto de Geociências utilizados para a pulverização de amostras de rocha.....	41
Fotografia 7 – Espectrômetro de Razão Isotópica Thermo Scientific, modelo Delta V, do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul	44
Fotografia 8 - Thermal Ionisation Mass Spectrometer, marca VG, modelo Sector 54, multi-coletor equipado com 9 coletores Faraday e 1 Daly do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul	45

Fotografia 9 – Chapa elétrica utilizada na preparação de amostras isotópicas de Pb	45
Fotografia 10 – Coleta de água no poço EXT01 ao lado de afloramento do Granito Viamão	71
Fotografia 11 – Detalhe do afloramento do Granito Viamão ao lado do poço EXT01	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Razões isotópicas e seus padrões internacionais	27
Tabela 2 – Registro dos pontos de amostragem litológica	37
Tabela 3 – Listagem das vulnerabilidades dos métodos utilizados	48
Tabela 4 – Resultado da Análise de Componentes Principais, mostrando os valores referentes à porcentagem de variância simples e acumulada de cada componente	50
Tabela 5 – Correlação de Pearson dos diferentes constituintes com os componentes	51
Tabela 6 – Dados estatísticos dos parâmetros hidrogeoquímicos e das concentrações dos principais íons de cada agrupamento	55
Tabela 7 – Valores estatísticos dos componentes por agrupamento.....	58
Tabela 8 – Correlação de Pearson de cálcio com fluoreto por agrupamento	60
Tabela 9 – Valores médios e desvios padrões de lineamentos por agrupamento	67
Tabela 10 – Correlação de Pearson das direções de densidade de lineamentos com fluoreto, bicarbonato, nitrato, sílica, pH, condutividade elétrica, dureza e componentes principais.....	68
Tabela 11 – Correlação de Pearson das direções de densidade de lineamentos com cálcio, cloreto, magnésio, sulfato, sódio e potássio	68
Tabela 12 – Poços em que houve reconhecimento presencial sem possibilidade de amostragem.....	70
Tabela 13 – Poços amostrados, com a identificação dos estabelecimentos, os valores de pH, temperatura e condutividade elétrica medidos in situ, a data de amostragem, o agrupamento e a litologia da entrada de água.	73
Tabela 14 – Valores isotópicos de oxigênio e hidrogênio dos poços amostrados, identificados por agrupamento e litologia da entrada de água.....	74
Tabela 15 – Precipitação média, temperatura média e valores isotópicos médios mensais de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ no período de 1965 a 1983	75
Tabela 16 – Valores isotópicos de Pb nas diferentes litologias granito-gnáissicas da região de Porto Alegre, com as imprecisões analíticas	80
Tabela 17 – Valores isotópicos de Pb das amostras de água subterrânea identificadas por agrupamento e litologia da entrada de água, com as imprecisões analíticas	81
Tabela 18 – Valores de $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ das amostras de rocha e água subterrânea.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAH	Análise de Agrupamentos Hierárquicos
ACP	Análise de Componentes Principais
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgotos
IGEO	Instituto de Geociências
IS	Índice de Saturação
LAMG	Linha de Água Meteórica Global
LAML	Linha de Água Meteórica Local
LPA	Laboratório de Preparação de Amostras
MPA	Município de Porto Alegre
SAFPC	Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano
SAGC	Sistema Aquífero Granular Cenozoico
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Caracterização da área e problemas.....	15
1.2 Hipótese.....	17
1.3 Justificativa.....	17
1.4 Objetivos e metas.....	18
2. ESTADO DA ARTE.....	19
2.1 Contexto geológico.....	19
2.2 Contexto hidrogeológico.....	23
2.3 Contexto hidrogeoquímico.....	24
2.4 Estatística hidrogeoquímica.....	25
2.5 Hidrogeologia isotópica.....	25
2.5.1 Isótopos de H e O.....	27
2.5.2 Isótopos de Pb.....	28
3. METODOLOGIA.....	31
3.1 Etapa pré-campo.....	31
3.1.1 Levantamento bibliográfico.....	31
3.1.2 Cadastro de poços de água subterrânea.....	31
3.1.3 Seleção de poços de água subterrânea.....	32
3.1.4 Análise de Componentes Principais e Agrupamentos Hierárquicos ..	32
3.1.5 Modelamento hidrogeoquímico.....	33
3.1.6 Demarcação de lineamentos.....	34
3.2 Etapa de campo.....	36
3.2.1 Amostragem de litologias.....	36
3.2.2 Amostragem de águas subterrâneas.....	38
3.3 Etapa pós-campo.....	41
3.3.1 Pulverização de amostras de rocha.....	41
3.3.2 Análise de isótopos estáveis.....	42
3.3.3 Integração de dados isotópicos e estatísticos.....	46
3.4 Vulnerabilidade dos métodos.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 Hidrogeoquímica estatística.....	49

4.1.1	Análise de Componentes Principais	50
4.1.2	Análise de Agrupamentos Hierárquicos.....	52
4.1.3	Modelamento hidrogeoquímico	61
4.1.4	Demarcação de lineamentos	63
4.2	Isótopos ambientais	69
4.2.1	Isótopos de H e O	74
4.2.2	Isótopos de Pb	78
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6.	REFERÊNCIAS	89

APÊNDICE A – Valor dos componentes principais, identificação dos agrupamentos, classificação de Piper e valor da densidade de lineamentos resultantes do tratamento estatístico dos poços selecionados

94

APÊNDICE B – Valores dos índices de saturação para fluorita, calcita, dolomita e gipso dos poços selecionados para a pesquisa

98

ANEXO A – Dados de identificação e localização dos poços de água subterrânea selecionados para a pesquisa.....

101

ANEXO B – Dados de condutividade elétrica, dureza, pH, concentrações iônicas e tipo de aquífero dos poços selecionados

105

ANEXO C – Análises solicitadas aos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.....

109

ANEXO D – Fichas de avaliação.....

110

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os aspectos introdutórios, com a apresentação de dados gerais da área em estudo, problemas, hipótese, justificativa e objetivos que motivaram a realização do presente trabalho.

1.1 Caracterização da área e problemas

O Município de Porto Alegre (MPA) está localizado entre os paralelos 29° 57' 14" S e 30° 16' 05" S e os meridianos 51° 01' 08" W e 51° 16' 00" W (Figura 1). É limitado a oeste pelo Lago Guaíba; a leste pelos Municípios de Viamão e Alvorada; a norte pelos Municípios de Canoas, Cachoeirinha, Triunfo e Nova Santa Rita; e a sul pelo Município de Viamão. Perfaz uma área de aproximadamente 496 km² e possui uma população aproximada de 1,48 milhão de pessoas (IBGE, 2016).

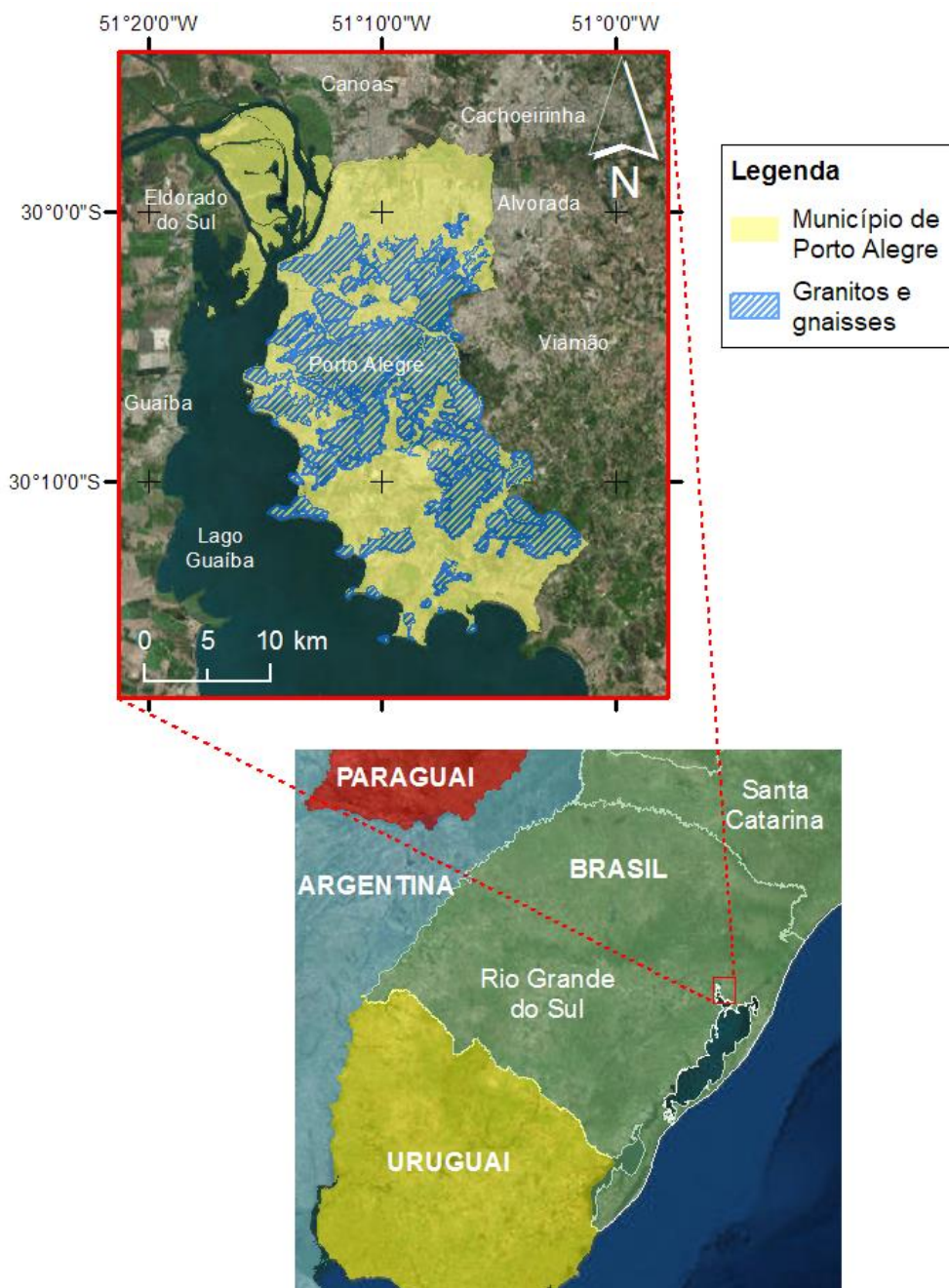
Embora a principal fonte de água utilizada para abastecimento pelos porto-alegrenses seja o Lago Guaíba, há também o registro oficial de centenas de poços de água subterrânea, com um número possivelmente maior de poços clandestinos, que se situam ou nas rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados ou nos granitos e gnaisses do embasamento geológico do MPA. Estas unidades granito-gnáissicas formam o Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC), marcado por intenso fraturamento distensivo, onde estão localizados mais de 80% dos poços tubulares perfurados no Município (KUZNETSOV *et al.*, 2014).

Os poços estão cadastrados em bancos de dados de órgãos públicos. Eles contêm dados químicos, a partir dos quais, por análise estatística, é possível a identificação de grupos químicos de águas. Esse conhecimento é importante para o entendimento hidrogeoquímico dos aquíferos, permitindo uma visão mais ampla da distribuição dos poços, e a compreensão dos processos atuantes no meio.

As análises de isótopos ambientais de H (¹H e ²H), O (¹⁶O e ¹⁸O) e Pb (²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb e ²⁰⁸Pb) consistem em ferramentas de uso crescente nos estudos sobre reservatórios de águas, complementando as observações hidrogeoquímicas. Os isótopos fornecem informações que permitem expandir a compreensão do sistema subterrâneo, possibilitando uma melhor gestão dos aquíferos.

O desenvolvimento do trabalho é norteado pelos seguintes problemas: Quais são os controles litológicos e estruturais das características hidrogeoquímicas e isotópicas do SAFPC? Quais são as condições de recarga, fluxo e misturas de águas no SAFPC? As assinaturas de Pb na água subterrânea do SAFPC são geogênicas, ligadas às diferentes litologias granito-gnáissicas, ou antropogênicas?

Figura 1 – Localização da área de estudo



Fonte – Elaborada pelo autor com dados geológicos de Hasenack *et al.* (2008) e imagens da World Imagery do ArcGIS (Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, e a GIS User Community).

1.2 Hipótese

O presente estudo é baseado na hipótese de que as heterogeneidades litológicas do SAFPC no MPA condicionam diferenças nos processos de fluxo, recarga e mistura de águas, imprimindo características hidrogeoquímicas e isotópicas nas águas subterrâneas, sendo influenciadas pela estruturação tectônica.

1.3 Justificativa

Em Porto Alegre, segundo registros de 2002, do Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), existiam 338 poços de água subterrânea, demonstrando a demanda significativa pelo recurso. O controle do número de poços é resultado da implementação, pelo DMAE, em 1997, do sistema denominado Cadastro Municipal de Poços Tubulares Profundos que exige o registro de todo poço tubular profundo, em acordo com a legislação vigente, permitindo o controle no número e informações dos poços. Além do DMAE, o Serviço Geológico Brasileiro também possui um cadastro, denominado de Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), onde constam centenas de poços no Município. Em ambos os sistemas estão listadas a localização dos poços, dados gerais e técnicos, e análises físico-químicas.

Os bancos de dados disponíveis carecem de uma análise estatística que permita separar os diferentes tipos químicos de águas subterrâneas. Esta distinção é essencial para a compreensão dos processos atuantes nos aquíferos. Diferentes litologias podem acarretar variações químicas significativas nas águas subterrâneas que fluem por suas fraturas e porosidade intergranular. O entendimento destas variações pode servir como subsídio para a locação de poços em áreas mais favoráveis à ocorrência de água com melhor qualidade química em relação à potabilidade.

Juntamente com o estudo hidrogeoquímico, é interessante estabelecer de forma sistemática um registro sobre a composição de isótopos de H (^1H e ^2H) e O (^{16}O e ^{18}O) das águas subterrâneas do MPA, visto que auxilia na compreensão dos processos atuantes no meio hídrico. Por outro lado, também é relevante o registro de isótopos de Pb (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb) das litologias e águas subterrâneas, pois pode possibilitar a distinção de áreas com assinaturas geogênicas daquelas com interferências antropogênicas.

Os resultados obtidos servem de subsídio para melhorar a gestão do recurso hídrico subterrâneo no MPA e constituem uma contribuição para outras pesquisas no âmbito do meio ambiente da região.

1.4 Objetivos e metas

O estudo teve como objetivo o reconhecimento de tipos químicos de água subterrânea no SAFPC do MPA, através do processamento estatístico das informações disponíveis em bancos de dados. Adicionalmente, foram analisados isótopos ambientais estáveis tradicionais e não tradicionais nas águas subterrâneas, para melhorar o entendimento dos processos atuantes no ciclo hidrogeológico e no meio ambiente, tais como recarga meteórica, misturas de águas e fluxo das águas subterrâneas, bem como no reconhecimento dos processos antrópicos presentes na área urbana.

Dentre os objetivos específicos desenvolvidos, devem ser destacados:

- organização de um banco de dados hidrogeoquímicos das águas subterrâneas do Aquífero Fraturado Pré-Cambriano da região de Porto Alegre;
- classificação dos tipos hidrogeoquímicos de águas subterrâneas do SAFPC;
- caracterização dos isótopos ambientais tradicionais de O (^{16}O e ^{18}O) e H (^1H e ^2H) nas águas subterrâneas do SAFPC;
- caracterização dos isótopos ambientais de Pb (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb) na água subterrânea do SAFPC e nas diferentes litologias que compõem o embasamento granito-gnáissico do MPA;
- correlação dos dados isotópicos, litológicos e hidrogeoquímicos, com a finalidade de reconhecer padrões e entender processos.

2. ESTADO DA ARTE

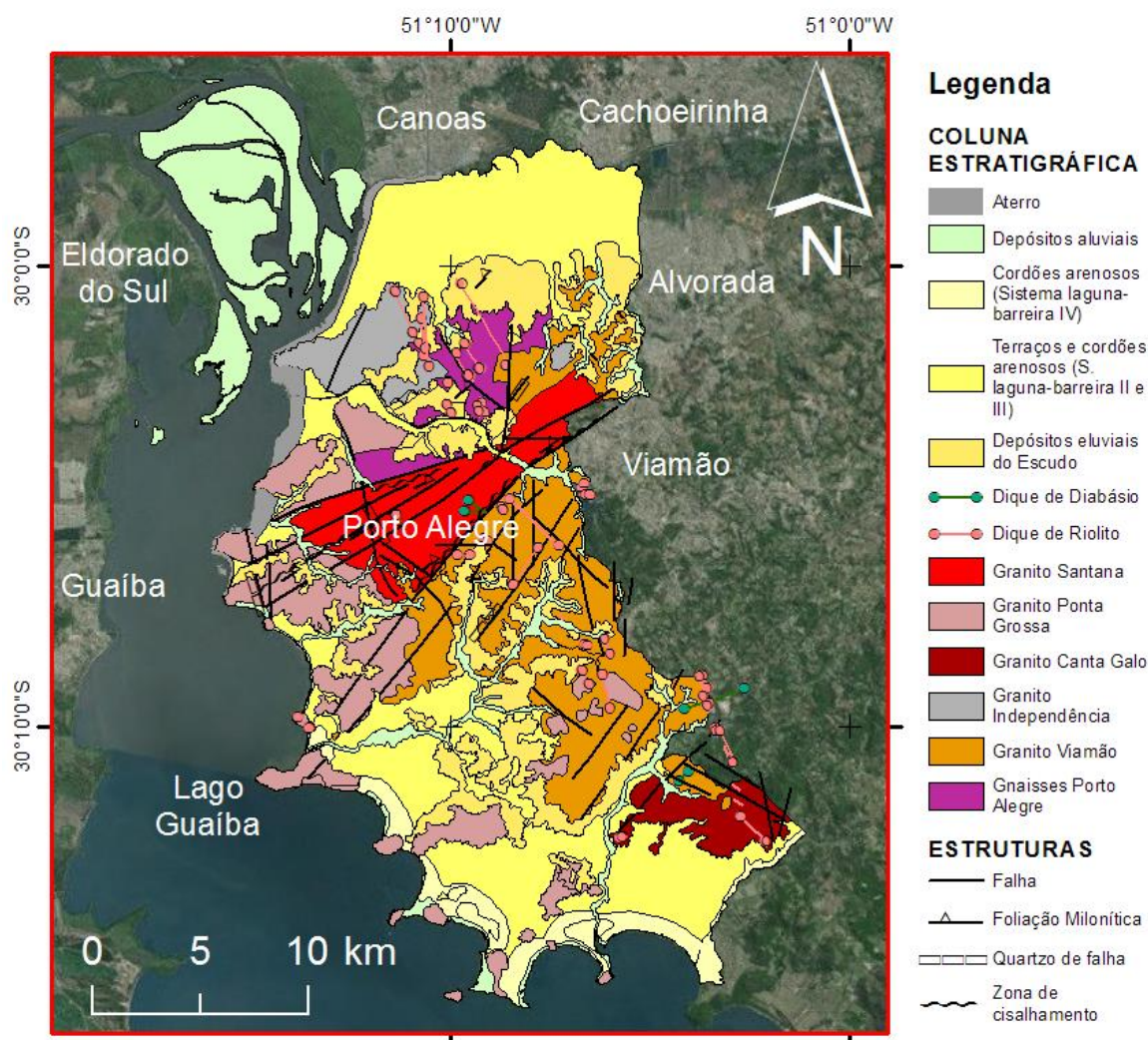
Será apresentada neste capítulo uma revisão das principais unidades geológicas que afloram no MPA e suas características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas, bem como o contexto dos principais isótopos ambientais aplicados às águas subterrâneas.

2.1 Contexto geológico

O MPA está situado na porção leste do Escudo Sul-rio-grandense, na unidade principal do Cinturão Dom Feliciano, o Batólito de Pelotas, apresentando diferentes litologias (Figura 2), que são agrupadas em dois domínios: gnaisses e granitos – Gnaisses Porto Alegre, Granito Viamão, Granito Independência, Granito Canta Galo, Granito Ponta Grossa e Granito Santana – e diques riolíticos, dacíticos e de diabásio, formando o embasamento pré-cambriano (SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974; PHILIPP; RÊGO; SIVIERO, 1994; PHILIPP, 1995; PHILIPP, 1998; PHILIPP; NARDI; MACHADO, 1998); e rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados – depósitos eluviais do Escudo, terraços e cordões arenosos (Sistemas Laguna-Barreira II, III e IV) e depósitos aluviais – formando a cobertura sedimentar quaternária (DELANEY, 1965; SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974; VILLWOCK; TOMAZELLI., 1995).

Os Gnaisses Porto Alegre foram descritos originalmente como migmatitos heterogêneos por Schneider, Loss e Pinto (1974). Posteriormente foram caracterizados como ortognaisses – gnaisses tonalíticos e granodioríticos, com ocorrência localizada de gnaisses dioríticos (PHILIPP; RÊGO; SIVIERO, 1994; PHILIPP, 1998). A seguir passaram a ser designados como Gnaisses Chácara das Pedras (MENEGAT *et al.*, 1998; OLIVEIRA; KOESTER; SOLIANI JR., 2001). Apresenta bandamento félsico sub-horizontal, estirado, exibindo dobras isoclinais intrafoliares. A mineralogia principal é constituída por plagioclásio, quartzo e biotita. Feldspato potássico e hornblenda ocorrem em menor proporção. Os minerais acessórios são titanita, zircão, apatita, allanita e minerais metálicos. A assembleia de alteração compreende argilominerais e epidoto.

Figura 2 – Mapa geológico do Município de Porto Alegre



Nota – As unidades granito-gnáissicas formam o Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano, enquanto as unidades sedimentares formam o Sistema Aquífero Granular Cenozoico.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados geológicos de Hasenack *et al.* (2008) e imagens da World Imagery do ArcGIS (Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, e a GIS User Community).

O Granito Viamão (PHILIPP, 1998) é constituído por litologias definidas inicialmente como migmatitos homogêneos (SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974). Composicionalmente, são monzogranitos, com granodioritos associados. É caracterizado por megacristais de K-feldspato, que definem a textura porfírica da unidade. A matriz é equigranular grossa a média, granodiorítica, composta por plagioclásio, K-feldspato, quartzo, biotita e, raramente, biotita. A principal estrutura que apresenta é uma foliação de fluxo magmático definida pelo K-feldspato, biotita e

enclaves máficos. Os minerais acessórios compreendem zircão, apatita, allanita, titanita e opacos.

O Granito Independência (SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974; PHILIPP, 1998) possui composição sienogranítica a, subordinadamente, monzogranítica. A textura predominante é equigranular média grossa – com tipos menos frequentes de textura fina – com a ocorrência localizada de textura inequigranular definida por cristais de K-feldspato. Mineralogicamente é composto por K-feldspato, plagioclásio e quartzo, com alguma biotita. A mineralogia acessória é de titanita, zircão, apatita, allanita, 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.

O Granito Canta Galo (SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974; PHILIPP, 1998) apresenta composição sienogranítica. Apresenta textura equigranular grossa a inequigranular, sendo esta 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 (SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974; PHILIPP, 1998) é de composição sienogranítica. 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, plagioclásio e, em pequena quantidade, biotita, que está parcialmente cloritizada e mostrando substituição por epidoto, muscovita e titanita. Titanita, zircão, allanita, magnetita, apatita e, raramente, fluorita, são os acessórios presentes. A estrutura é maciça.

O Granito Santana (SCHNEIDER; LOSS; PINTO, 1974; PHILIPP, 1998) é composicionalmente variável de feldspato alcalino granito a sienogranito. Apresenta textura equigranular média a grossa, gradando para protomilonítica a milonítica em faixas de intensa deformação, com a recristalização do K-feldspato e do quartzo para pequenos cristais. A constituição mineralógica é dominada por K-feldspato e quartzo, com a ocorrência rara de plagioclásio e biotita. A mineralogia acessória é composta por titanita, zircão, apatita, allanita e opacos. Há a ocorrência de paragênese

metamórfica de epidoto, clorita, opacos, mica branca, titanita e carbonato, relacionada a zonas de cisalhamento dúcteis. Possui uma foliação pela orientação do K-feldspato e biotita e, em zonas de maior deformação, pelo alongamento do quartzo.

Os diques riolíticos, dacíticos e de diabásio (ROISENBERG *et al.*, 2002; HASENACK *et al.*, 2008) são as últimas manifestações do magmatismo pré-cambriano no MPA. Os riolitos são os mais expressivos, com textura porfirítica, definida por fenocristais de quartzo e K-feldspato milimétricos, em uma matriz afanítica de composição quartzo-feldspática, contendo também biotita e anfibólio como varietais, e apatita, magnetita, zircão, clorita e epidoto como acessórios. Os dacitos são raros, com textura porfirítica, caracterizada por fenocristais de quartzo, plagioclásio, sanidina e hornblenda, em uma matriz muito fina, de textura granofírica, de composição mineralógica igual a dos fenocristais, com excessão do anfibólio, que pode estar ausente. Os diabásios são de granulometria fina, compostos por plagioclásio e piroxênio, contendo também magnetita e ilmenita, e uma mineralogia metamórfica de anfibólios, clorita, titanita em magnetita e ilmenita.

O Quaternário é representado por fácies pleistocênicas e holocênicas (TOMAZELLI; VILLWOCK; LOSS, 1987; VILLWOCK, 1972; VILLWOCK, 1984; VILLWOCK *et al.*, 1986; VILLWOCK; TOMAZELLI, 1995). Leques aluviais alimentados pelo Escudo Pré-Cambriano correspondem a fácies formadas no Pleistoceno, com área fontes as rochas ígneas e metamórficas do Escudo Sul-riograndense. As áreas graníticas e a distância reduzida de transporte resultaram em fácies de texturas e mineralogias imaturas. As fácies são diamictitos, conglomerados, arenitos e lamitos. Eventos transgressivos pleistocênicos geraram a Barreira II há 325 mil anos, na forma de terraços arenosos; a Barreira III, há 120 mil anos, em cordões arenosos; e a Barreira IV, há 5 mil anos, também em cordões arenosos. Há ainda a ocorrência de depósitos deltaicos, terraços e planícies fluviais com gênese nos eventos transgressivos de 120 mil anos e 5 mil anos, com a presença de sedimentos aluviais ao longo de arroios.

2.2 Contexto hidrogeológico

A hidrogeologia do MPA é caracterizada pela ocorrência de dois sistemas aquíferos com diferenças litológicas e estruturais (Figura 2): SAFPC e SAGC (ROISENBERG, 2001; ROISENBERG *et al.*, 2002; ROISENBERG *et al.*, 2003; RAMAGE, 2005).

O SAFPC é composto pelos granitos e gnaisses do embasamento pré-cambriano. As características hidrodinâmicas e hidrogeoquímicas são muito heterogêneas. Há a ocorrência de inúmeras fraturas que, pelas diferenças de densidades, dimensões, aberturas, preenchimentos e interconexões, controlam a hidrodinâmica e hidrogeoquímica do reservatório. As litologias deste aquífero são recobertas pelas unidades quaternárias e capas de alteração intempérica, que ampliam o potencial de alimentação indireta de fraturas, diminuindo perdas por escoamento e evaporação. Os poços tubulares profundos construídos no aquífero são poços com entradas de água exclusivamente nas fraturas ou poços com entradas de água na cobertura sedimentar e nas fraturas. O pH varia de neutro a pouco ácido (6,5 a 7). A profundidade média dos poços é de 93 m, com variação entre 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 5,0 a 180,0 m, com valor médio de 54,7. A vazão média é 3,8 m³/h, variando de 0,1 a 35,5 m³/h, resultando em capacidade específica máxima de 2,27 m³/h, e valor máximo de 0,26 m³/h (ROISENBERG *et al.*, 2002).

O SAGC é formado por depósitos de leques aluviais, lagunares, flúvio-lacustres e aluvionares atuais, formando aquíferos intergranulares extensos e livres ou semiconfinados, com espessura média de 30 m, podendo atingir mais de 40 m. Os depósitos são relacionados às ingressões marinhas – depósitos lagunares e flúvio-lacustres – que o recobrem, e podem imprimir características especiais à água do aquífero fraturado. Poços construídos sobre os depósitos de leques aluviais possuem profundidade média de 38 m, com vazões médias de 5 m³/h, apresentando níveis estático e dinâmico médios, respectivamente, de 4,9 e 12,4 m, variando de 0,8 a 6,3 – estático – e 7,4 a 19,8 – dinâmico. As águas apresentam pH entre 6,5 e 7. As águas subterrâneas são salobras a salgadas onde os depósitos de leques ocorrem junto aos depósitos lagunares e flúvio-lacustres. Os depósitos semiconsolidados de areia, argila

e areia-silte, relacionados aos depósitos lagunares e flúvio-lacustres, possuem um nível freático normalmente raso – menor que 1 m – e as águas subterrâneas são salobras a salgadas, com conteúdo comum de cloreto superior a 1000 mg/L. Grande parte dos poços construídos nos depósitos lagunares e flúvio-lacustres possui água com teores de ferro maiores que 0,3 mg/L, com o manganês também seguindo essa tendência. As vazões médias são de 3 m³/h, com variação de 1 m³/h a 30 m³/h, em areas de grande permeabilidade. O nível estático médio é de 1,5 m, enquanto o dinâmico não é superior a 10 m (ROISENBERG *et al.*, 2002).

2.3 Contexto hidrogeoquímico

As águas do SAFPC são bicarbonatadas cálcico-sódicas a sódicas e caracterizadas por baixa a moderada mineralização, com resíduos totais entre 200 e 400 mg/L (Roisenberg, 2001). As composições das diferentes litologias do embasamento não possuem ligação com as variações químicas observadas, sendo, então, compreendidas como produto de mistura com o SAGC. As variações compreendem tipos intermediários de composição cloretada-bicarbonatada-cálcico-sódica, com cloreto, sulfato, sódio, cálcio e magnésio enriquecidos, e elevação nos resíduos totais. As concentrações de cloreto e sódio apresentam correlação positiva, mostrando a influência do aquífero sedimentar. Destaca-se, ainda, a ocorrência frequente de fluoreto em elevadas concentrações, provavelmente proveniente da dissolução de fluorita em fraturas e, mais raramente, em grãos intersticiais.

No SAGC, segundo Ramage (2005), as águas são sódico-cloretadas, variando a cálcico-sódico-bicarbonatadas, composição que indica mistura com o SAFPC pelo aumento de fluoreto. Apresenta elevados valores de condutividade elétrica (até 6540 µS/cm), dureza (até 846,0 mg/L de CaCO₃), sódio (740,3 mg/L), cloreto (até 909,7 mg/L), bicarbonato (até 510,90 mg/L), sulfato (até 400,0 mg/L), cálcio (até 125,8 mg/L) e resíduos totais (até 2038 mg/L). Observa-se correlação positiva entre magnésio e potássio no sistema. Ocorre aumento nas concentrações dos principais íons onde há maior espessura de sedimentos e maior distância ao aquífero granito-gnáissico.

2.4 Estatística hidrogeoquímica

Estudos geológicos em águas subterrâneas envolvem bancos de dados multivariados que podem ser muito extensos. A compreensão deste grande volume de informações é possível através de análises que reduzam a dimensionalidade dos dados, com o agrupamento das informações, possibilitando a correlação dos resultados.

Diversos trabalhos têm mostrado a utilidade da análise estatística para caracterizar o meio ambiente hídrico subterrâneo, permitindo o reconhecimento das principais variáveis que controlam a composição das águas e a distinção de grupos com diferentes características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas (SUK; LEE, 1999; CLOUTIER *et al.*, 2008; HAMZAOUI-AZAZA; BOUHLILA; GUEDDARI, 2009), bem como o entendimento da influência das estruturas tectônicas na composição das águas (CHIHAI *et al.*, 2015; CUNHA *et al.*, 2016).

No estudo dos aquíferos do MPA, já foram realizados trabalhos focados na interpretação de extensos conjuntos de dados, com o uso de diferentes tratamentos estatísticos. Ramage (2005) e Viero *et al.* (2009) utilizaram análise de agrupamentos, análise de fatores e modelamento hidrogeoquímico a fim de caracterizar as águas do SAGC e interpretar a gênese do fluoreto nas águas subterrâneas do MPA, respectivamente. Roisenberg (2001) demarcou lineamentos para identificar os principais padrões de estruturas na região. Os resultados obtidos pelos autores permitiram caracterizar a hidrogeoquímica dos aquíferos sob diferentes aspectos.

2.5 Hidrogeologia isotópica

Isótopos são átomos estáveis ou radioativos, podendo em ambos os casos serem radiogênicos, de um mesmo elemento químico com números atômicos iguais e números de massa diferentes, pela variação no número de nêutrons. A diferença implica em propriedades distintas nos isótopos de um mesmo elemento, com diferenças na taxa de movimento, nas frequências de vibrações intermoleculares, rotações e estabilidade de ligações químicas, na abundância relativa de isótopos no material de origem e no produto de processos dinâmicos (GAT, 2010). Esta heterogeneidade de características ocasiona o processo de fracionamento isotópico, que é a variação na abundância relativa dos isótopos por mudança de fase ou estado,

diferenciação na taxa de reação química (o isótopo leve é mais reativo e se concentra nos produtos da reação, enquanto o isótopo pesado se concentra nos reagentes), e diferença na velocidade de difusão molecular (CLARK; FRITZ, 1997).

Isótopos ambientais, segundo Clark e Fritz (1997), referem-se tradicionalmente aos isótopos de elementos de origem natural que ocorrem em abundância na natureza: H, C, N, O e S. Eles são os principais elementos de sistemas naturais, como o hidrogeológico. Por eles serem elementos leves, a diferença de massa entre seus isótopos é grande, resultando na ocorrência de um fracionamento isotópico de mensuração rotineira pelas técnicas analíticas disponíveis. O ^2H , por exemplo, possui aproximadamente o dobro da massa atômica do ^1H . O termo “isótopos ambientais” também tem sido utilizado para isótopos de elementos de menor concentração na natureza, como U, Th, Li, B e Pb, que são igualmente importantes em comparação aos tradicionais para o entendimento dos ciclos naturais.

Nos estudos hidrogeológicos, os isótopos ambientais possibilitam a indicação de proveniência, processos de subsuperfície, taxas de reação, reações geoquímicas, qualidade, recarga e contaminação da água subterrânea (CLARK; FRITZ, 1997). Processos meteóricos modificam a composição isotópica da água de precipitação, com a geração de uma assinatura isotópica característica nas águas de recarga de aquíferos, que serve como traçador da origem das águas subterrâneas (SCOZZARI; DOTSIKA, 2015).

Os valores isotópicos são representados pela razão entre dois isótopos do mesmo elemento. Por convenção, o denominador é o isótopo leve, de maior abundância. O benefício do uso de razões é que elas representam diferenças relativas de amostras analisadas em condições iguais. Com isso, os erros analíticos de valores relativos são menores do que de valores absolutos.

As composições isotópicas são descritas em comparação a um padrão internacional, sendo representadas pela notação delta (δ), em partes por mil (‰), através da Equação 1.

$$\delta (\text{‰}) = [(R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}) / R_{\text{padrão}}] \times 1000 \quad (1)$$

Onde R_{amostra} é a razão isotópica medida na amostra e $R_{\text{padrão}}$ é a mesma razão de um padrão, que é um material calibrado em relação a um padrão internacional.

Assim sendo, o valor de 0 ‰ representa o padrão, com desvios deste valor para materiais com valores isotópicos contrastantes ao padrão, podendo ser negativos, significando relativo enriquecimento do isótopo mais leve ou empobrecimento do isótopo pesado, ou positivos, significando relativo empobrecimento do isótopo mais leve ou enriquecimento do isótopo pesado. A Tabela 1 mostra os diferentes padrões para as razões de isótopos ambientais tradicionais, segundo Werner e Brand (2001).

Tabela 1 – Razões isotópicas e seus padrões internacionais

Razão isotópica	Padrão internacional	Valor
$^2\text{H}/^1\text{H}$	<i>Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)</i>	0,00015575
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	<i>Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW) ou Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)</i>	VSMOW = 0,0020052 VPDB = 0,0020672

Fonte – Elaborada pelo autor com dados de Werner e Brand (2001).

2.5.1 Isótopos de H e O

Os isótopos de H e O são fundamentais para o entendimento de processos hidrogeológicos, pois eles formam a molécula da água. O hidrogênio tem três isótopos naturais: ^1H , ^2H e ^3H , que representam, da abundância da concentração do elemento, 99,985%, 0,015% e uma quantidade mínima, respectivamente, sendo os dois primeiros estáveis e o último radioativo, com uma meia-vida de 12,32 anos. O oxigênio também tem três isótopos naturais, estáveis: ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O , com porcentagens de abundância de 99,76%, 0,035% e 0,20%, respectivamente. Existem ainda isótopos radioativos de O, todos com meias-vidas muito curtas.

A aplicabilidade dos isótopos estáveis de H e O em estudos hidrogeológicos e hidrológicos fundamenta-se na variação de suas razões isotópicas resultantes de precipitação, a partir do vapor formado do oceano, que acaba sendo empobrecido nos isótopos pesados, ou enriquecido nos isótopos leves, deixando uma assinatura isotópica característica nas águas. Existe uma relação de valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ descrita por Craig (1961), conhecida como Linha de Água Meteórica Global (LAMG),

baseada em dados de diferentes localizações no mundo, que serve para comparação de resultados, expressa na Equação 2.

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2)$$

Abbott, Lini e Bierman (2000) analisaram os isótopos estáveis de H e O em aquífero fraturado de Vermont, Estados Unidos. O autor correlacionou os valores isotópicos à precipitação, infiltração e evaporação, definindo variações sazonais.

Hamouda *et al.* (2013) caracterizaram isotopicamente ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) a água subterrânea no Golfo de Gabes, na Tunísia. Foram identificadas contribuições de diferentes aquíferos no meio hídrico, relacionando-as a recargas distintas.

Stradioto e Chang (2016), em estudo sobre o Sistema Aquífero Bauru, em São Paulo, reconheceram diferenças isotópicas de H e O nas diferentes formações que compõem o manancial.

2.5.2 Isótopos de Pb

O Pb é um metal muito tóxico que normalmente ocorre em concentrações pequenas no ambiente, porém concentrações anormalmente altas podem ocorrer tanto por origem natural quanto por fontes antrópicas, caracterizando um risco ambiental grave (NORRSTRÖM; KNUTSSON, 2012).

Quatro isótopos estáveis de Pb ocorrem naturalmente: ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb . As porcentagens da abundância relativa na média das rochas da crosta são de 1,36%, 25,42%, 21,11% e 52,10%, respectivamente. ^{204}Pb não é radiogênico, e, por isso, sua abundância não muda pela passagem do tempo, enquanto ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb são isótopos-filho (radiogênicos) do decaimento radioativo do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , respectivamente, sendo acumulados com o passar do tempo (FAURE, 1986).

O Pb que ocorre de maneira natural em materiais geológicos é tanto o Pb incorporado ao material em seu momento de formação quanto o Pb radiogênico produto do decaimento radioativo. A maioria dos materiais geológicos incorpora pequenas quantidades de U e/ou Th, resultando no enriquecimento de Pb radiogênico com o tempo. Minerais relativamente ricos em Pb e pobres em U e Th, como alguns sulfetos e feldspatos, porém, incorporam quantidades de U e Th mínimas durante sua

formação, com a consequente composição isotópica de Pb praticamente inalterada durante o avanço de suas idades (LEPITRE *et al.*, 2003).

Diferentes unidades litológicas têm diferentes composições isotópicas pela diversidade de ambientes geológicos e idades. Isso ocasiona assinaturas isotópicas características para cada litologia, possibilitando traçar o caminho de contaminações de Pb dissolvido em águas subterrâneas. Diversos trabalhos têm utilizado os isótopos de Pb para investigações de fontes de Pb em aquíferos (SIEGEL; BICKFORD; ORREL, 2000; TONER; FROST; CHAMBERLAIN, 2003; LANDMEYER; BRADLEY; BULLEN, 2003; FERNÁNDEZ *et al.*, 2005; NORRSTRÖM; KNUTSSON, 2012). Deve-se ressaltar que a composição isotópica de uma contaminação de Pb em uma amostra de água pode ser resultante da mistura de múltiplas origens de contaminantes de Pb, como Pb proveniente de aerossóis depositados pela atmosfera ou Pb de depósitos superficiais. Quando diversas origens são presentes, a composição isotópica de Pb de cada fonte deve ser conhecida para a correta interpretação das fontes (LEPITRE *et al.*, 2003).

Águas que dissolvem Pb progressivamente enquanto fluem por diferentes materiais geológicos, ou águas de diferentes proveniências que se misturam, apresentam uma variação isotópica ao longo do fluxo. Amostras coletadas em diferentes locais ao longo do trajeto do fluxo são combinações das diferentes origens, e devem resultar, quando os valores das razões isotópicas são plotados em gráficos, em linhas de mistura entre as várias fontes. A quantidade de Pb proveniente de cada fonte pode ser determinada quando se considera um modelo de mistura simples. O conhecimento das razões isotópicas na água é, por esse motivo, útil para distinção entre múltiplas fontes de contaminação de Pb, pela medição da composição isotópica das possíveis fontes contaminantes, e para estimar o valor relativo de Pb dissolvido proveniente de diferentes origens, fundamentando-se em um processo de simples mistura (LEPITRE *et al.*, 2003).

A utilização dos isótopos de Pb como traçadores pela assinatura isotópica depende de certos critérios: a composição isotópica de Pb da fonte principal deve ser relativamente homogênea, e as composições isotópicas de Pb de outras potenciais fontes na região devem ser conhecidas (LEPITRE *et al.*, 2003).

Gioia *et al.* (2006) pesquisou a origem dos sedimentos do Lago Paranoá, em Brasília, pelos valores isotópicos de Pb. O autor conseguiu discriminar Pb geogênico e antropogênico, relacionados a diferentes tempos de deposição, marcados por fases distintas da urbanização do local.

Kuhn e Roisenberg (2017), em estudo sobre o Sistema Aquífero Guarani e o Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul, identificaram assinaturas isotópicas de Pb características para cada compartimento, bem como para misturas entre eles. As assinaturas encontradas foram de origem natural, controladas pelas litologias, com exceção de poucos poços, onde foram detectadas assinaturas antropogênicas.

Midugno (2012) analisou os isótopos de Pb para o estudo de arroios do MPA, encontrando como principal contribuinte, em amostras de material em suspensão, Pb geogênico, proveniente das rochas do embasamento granito-gnáissico. A contribuição de Pb antropogênico registrada foi secundária, relacionada à intensidade de atividades antrópicas urbanas, principalmente pelo tráfego automotivo.

3. METODOLOGIA

O presente estudo teve seu desenvolvimento metodológico estabelecido em três etapas sequenciais: pré-campo, campo e pós-campo.

3.1 Etapa pré-campo

A etapa pré-campo consistiu em atividades realizadas nas dependências do Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo representada pela i) revisão bibliográfica, para a verificação do conhecimento atual da área de estudo; ii) interpretação de lineamentos morfo-estruturais, para o conhecimento da posição georreferenciada de estruturas tectônicas, permitindo testar hipóteses de fluxo e transporte de água subterrânea; iii) levantamento georreferenciado de poços tubulares em Porto Alegre, para definição das condições hidrogeoquímicas; iv) seleção de poços de água subterrânea, para validar e permitir o adequado uso de dados; v) tratamento estatístico dos dados hidrogeoquímicos e tectônicos, para reconhecer padrões e correlações com significado geológico.

3.1.1 Levantamento bibliográfico

A primeira etapa do estudo consistiu na leitura de artigos científicos em periódicos, livros, trabalhos acadêmicos e relatórios técnicos, para o reconhecimento do estado da arte do tema na área em estudo, formando a base conceitual do trabalho e norteando a elaboração das estratégias para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1.2 Cadastro de poços de água subterrânea

Os bancos de dados do DMAE e do SIAGAS foram utilizados para aquisição de informações de poços tubulares em todo o MPA, permitindo obter localização, tipo de aquífero, litologia da entrada de água e dados hidrogeoquímicos (pH, condutividade elétrica, dureza e concentrações de íons) de cada poço. Dados referentes à profundidade dos poços, profundidade da entrada de água, e coberturas intempéricas e sedimentares são pouco detalhados no registro do DMAE, e, por isso, não puderam ser utilizados.

A litologia da entrada de água dos poços selecionados foi identificada pelos dados de perfis geológicos e construtivos, quando disponíveis, como também por

meio da identificação da unidade existente na localização do poço a partir do mapa geológico (HASENACK *et al.*, 2008).

Os dados foram utilizados para a geração de tabelas no *software* Excel, e conseqüente cadastro georreferenciado no *software* ArcMap 10.1, para, juntamente à geologia da área, visualizar a distribuição espacial dos poços em relação aos diferentes aquíferos. Os arquivos gerados foram utilizados nas etapas seguintes.

3.1.3 Seleção de poços de água subterrânea

Os dados obtidos na fase de cadastro foram filtrados pela exclusão dos poços com o registro incompleto ou insuficiente para o estudo, removendo-se também aqueles com informações incoerentes ou imprecisas.

A seguir foi calculado o balanço iônico, no *software* Excel, a partir das análises químicas, mantendo-se o registro de poços com erro inferior a 10%. Pela incompletude de dados, utilizou-se valores iguais a 0 para valores faltantes, e, para aqueles que ficaram abaixo do limite de detecção, optou-se por considerar o valor igual à metade do limite. Os poços que se mantiveram, com valores tabelados, foram manipulados nas etapas subsequentes.

3.1.4 Análise de Componentes Principais e Agrupamentos Hierárquicos

O *software* SPSS Statistics 21 foi utilizado para, primeiramente, reconhecer a variabilidade dos parâmetros hidrogeoquímicos dos poços, com a obtenção de estatísticas descritivas (médias, desvios padrões, valores máximos e mínimos).

As variáveis mais expressivas, correspondentes aos elementos químicos com concentração média maior que 1 mg/L, foram aplicadas para Análise de Componentes Principais (ACP), para estabelecer componentes que explicam a dispersão das variáveis, permitindo reduzir a dimensionalidade dos dados.

A ACP utilizou o método de rotação *varimax*, que procura maximizar a dispersão das cargas dentro dos componentes, agregando um número reduzido de variáveis para cada componente resultando em mais aglomerados de componentes interpretáveis, simplificando a leitura dos resultados (FIELD, 2009). Neste tipo de análise, valores ausentes não são válidos. Desta forma, optou-se a troca deles pela

média da variável. Valores armazenados como inferiores ao limite de detecção da análise química foram substituídos pela metade do limite, a fim de se obter um valor numérico válido para a estatística.

Os componentes da ACP foram utilizados para Análise de Agrupamentos Hierárquicos (AAH), a fim de agrupar os poços mais similares. A AAH utilizou o método de agrupamento de Ward, que busca gerar grupos que possam minimizar a variância dentro deles, minimizando o quadrado da distância euclidiana às médias dos grupos. Um grupo será unido a um outro se isso proporcionar o menor aumento da variância intragrupo (VICINI; SOUZA, 2005). Os agrupamentos são então definidos por uma distância de corte relacionada à similaridade estatística.

Os agrupamentos obtidos foram analisados em termos de valores médios, mínimos e máximos de seus parâmetros hidrogeoquímicos. Com isso foi possível observar a influência do aquífero fraturado ou do granular nas águas, bem como misturas entre os reservatórios.

Para a classificação química tradicional de águas subterrâneas, foi gerado diagrama de Piper (PIPER, 1944) no software GW_Chart (WINSTON, 2000), com a obtenção das fácies em valores tabelados com o uso do programa QualiGraf v.1.17 (MÖBUS, 2017).

Os poços, separados por agrupamentos, foram plotados no mapa geológico da área (HASENACK *et al.*, 2008), com o uso do programa ArcMap 10.1, para a visualização da existência de controles geológicos nas características químicas das águas subterrâneas.

3.1.5 Modelamento hidrogeoquímico

Para explicar a concentração iônica das águas, foi realizado modelamento geoquímico. Utilizando-se o programa Phreeqc Interactive 3.3.12 (PARKHURST; APPELO, 2013), foi verificada as condições de saturação de fases químicas, obtendo-se o Índice de Saturação (IS) de certos minerais.

Segundo Deutsch e Siegel (1997), os valores de IS representam diferentes situações: um IS próximo ao valor 0 ($\pm 0,5$), significa saturação, em que o mineral existe no sistema aquífero e está afetando a composição das águas; se o IS for inferior

a 0,5, representa que a água está em subsaturação em relação ao mineral, indicando que o mineral, se reativo, não está presente ou está dissolvendo, e, se não é reativo, que está presente; um IS superior a 0,5, denota supersaturação da água para o determinado mineral, mostrando que o mineral não é reativo e está precipitando, já que minerais reativos têm um limite superior de SI próximo a 0. Minerais tipicamente reativos incluem calcita, dolomita e gipso.

Os dados de IS levaram em consideração os principais minerais que ocorrem nos aquíferos e que controlam a química das águas, segundo o registro de trabalhos anteriores (ROISENBERG, 2001; RAMAGE, 2005). Foram gerados gráficos no programa SPSS Statistics 21, com os poços separados pelos agrupamentos da AHH, verificando-se as características existentes em cada grupo.

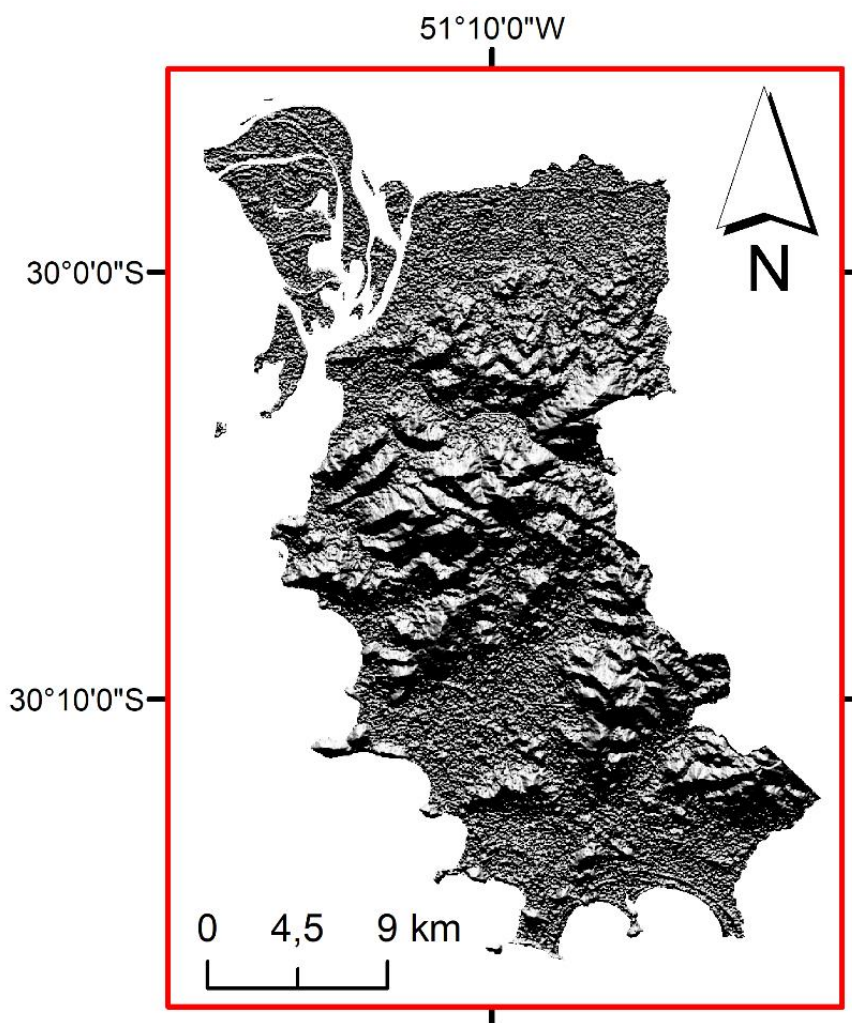
3.1.6 Demarcação de lineamentos

Lineamentos morfo-estruturais são representações em planta de falhas e fraturas, em diferentes tipos de imagens aéreas e orbitais, que podem permitir a conexão hidráulica entre aquíferos. Para o SAFPC, é de suma importância o estudo destes elementos, pela natureza fraturada do reservatório, relacionada à intensidade de processos rúpteis que afetaram a região, e pela possibilidade de promover misturas com águas do SAGC.

Inicialmente foram obtidos dados de lineamentos de Roisenberg (2001). A demarcação destes pelo autor foi feita pela visualização de imagens orbitais da missão Landsat 5 Thematic Mapper e fotografias aéreas nas escalas 1:110.000 e 1:60.000. Os dados coletados foram cadastrados em ambiente georreferenciado com o *software* ArcMap 10.1.

De modo a complementar os dados, foram traçados lineamentos em imagens de relevo sombreado (Figura 3), geradas a partir de um modelo digital de terreno obtido da Shuttle Radar Topography Mission, com o uso do *software* ArcMap 10.1. Foram produzidas 4 imagens com azimutes de iluminação diferentes (000°, 045°, 090° e 135°), com a ferramenta *Hillshade*, para permitir o ressaltos de lineamentos com diferentes direções, tendo em vista que estruturas com direção coincidente com a iluminação ficam indefinidas pela falta de sombras que as salientem.

Figura 3 – Imagem de relevo sombreado do Município de Porto Alegre, ressaltando as estruturas geomorfológicas



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da Shuttle Radar Topography Mission.

Os diferentes tipos de imagens foram analisados individualmente, de modo que lineamentos demarcados em uma imagem, foram igualmente traçados em outras, resultando em registros duplicados. Com isso, foi realizada a exclusão de duplicatas manualmente, utilizando-se a escala 1:60.000 no *software* ArcMap 10.1.

Os azimutes dos lineamentos foram obtidos usando-se a extensão ArcSDM (SAWATZKY *et al.*, 2009), com a criação de tabelas de atributos que foram exportadas ao *software* Excel, para a divisão das tabelas pela direção das estruturas (NO-SE, NE-SO, N-S, E-O). As novas tabelas foram utilizadas para a geração de mapas de densidade de lineamentos separados por direção, no *software* ArcMap 10.1, utilizando-se a ferramenta *Line Density*, com a obtenção da soma do comprimento de lineamentos por área (com raio de procura de 1 km e tamanho da célula de saída de

100 m). Os valores de densidade, de natureza contínua, sem a discriminação de classes, foram correlacionados com as análises estatísticas posteriores, a partir de tabelas no programa SPSS Statistics 21.

Diagramas de roseta, para observar a distribuição dos lineamentos na área em estudo, foram produzidos com a extensão *Polar Plots* (JENNESS; 2014), para a frequência absoluta de ocorrências e para a soma de comprimentos.

3.2 Etapa de campo

A etapa de campo consistiu na amostragem das unidades litológicas que compõem o SAFPC e amostragem de água de poços tubulares em pontos selecionados com base nos agrupamentos estatísticos. Neste caso foram priorizados poços com maior relação hidrogeoquímica com o aquífero fraturado e cujas entradas de água estejam nos granitos e gnaisses.

3.2.1 Amostragem de litologias

As seis diferentes litologias granito-gnáissicas principais do MPA (HASENACK *et al.*, 2008) foram amostradas para realização de análises isotópicas de Pb. A coleta se deu em 2 pontos distintos para cada unidade (Tabela 2), a fim de identificar variabilidades isotópicas.

Os pontos de coleta foram escolhidos com base na representatividade da unidade, com o cuidado de se obter amostras pouco alteradas (Fotografia 1), para evitar assinaturas isotópicas não representativas das litologias.

Tabela 2 – Registro dos pontos de amostragem litológica

Unidade geológica	Código da amostra	Localização (UTM – WGS84 – Zona 22 J)
Gnaisses Porto Alegre	GP-1	484944.00 m E 6676604.00 m S
	GP-2	485388.56 m E 6676703.80 m S
Granito Viamão	V-3	488124.00 m E 6673108.00 m S
	V-4	488203.00 m E 6673620.00 m S
Granito Independência	I-1	480519.00 m E 6677448.00 m S
	I-2	480304.00 m E 6677458.00 m S
Granito Santa Galo	CG-1	496089.00 m E 6660694.00 m S
	CG-4	495638.00 m E 6660234.00 m S
Granito Ponta Grossa	PG-1	476640.00 m E 6666536.00 m S
	PG-2	478271.00 m E 6664790.00 m S
Granito Santana	S-1	486550.00 m E 6673190.00 m S
	S-2	484987.00 m E 6671208.00 m S

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Fotografia 1 – Local de amostragem do Granito Ponta Grossa (PG-2), em afloramento pouco alterado



Fonte – Acervo do autor.

3.2.2 Amostragem de águas subterrâneas

A coleta de águas foi iniciada pela calibração dos equipamentos de leitura em laboratório (Fotografia 2), para garantir a qualidade dos dados. Em campo, obteve-se *in situ* os parâmetros físico-químicos básicos das águas subterrâneas (Fotografia 3), utilizando-se o pHmetro PH221 Lutron, para obtenção do pH, e do condutivímetro DM-32 Digimed, para aquisição de condutividade elétrica e temperatura.

Fotografia 2 – Calibração dos equipamentos



Fonte – Acervo do autor.

Fotografia 3 – Leitura *in situ* do pH, condutividade elétrica e temperatura



Fonte – Acervo do autor.

Para a amostragem optou-se por realizar a coleta após, no mínimo, 2 dias sem chuva, minimizando qualquer efeito de entrada de água meteórica recente na estrutura do poço, que pudesse afetar a assinatura isotópica da água subterrânea. Também se utilizou o processo de purga por 15 minutos, ou mais, dependendo da profundidade e diâmetro do poço, a fim de remover a água estagnada na tubulação, não representativa do aquífero. Foi feita a lavagem prévia dos frascos de coleta por três vezes com a própria água do poço (Fotografia 4).

Fotografia 4 – Amostragem de água com a lavagem prévia dos frascos por três vezes com a própria água do poço



Fonte – Acervo do autor.

A coleta de água para análise de isótopos de H e O (Fotografia 5) utilizou o método do Laboratório de Isótopos Estáveis Reston do Serviço Geológico Americano (RÉVÉSZ; COPLEN, 2008a, 2008b). Não foi adicionado nenhum composto químico para tratamento ou preservação da alíquota, completando-se integralmente um recipiente de polietileno de 1 L com água, sem deixar espaços com ar, para minimizar efeitos de evaporação que causam o fracionamento isotópico da amostra.

Fotografia 5 – Coleta de água para análise de isótopos de H e O.



Fonte – Acervo do autor.

Nota – Foi conectado um cano até a entrada de água vinda do poço no reservatório.

Para análise de isótopos de Pb, a coleta foi baseada na Norma CETESB nº 6410 de 1988, que trata da amostragem e monitoramento das águas subterrâneas. Alíquotas de 1 L foram acondicionadas em frascos de polietileno previamente lavados no Laboratório de Preparação de Amostras (LPA) do IGEO com ácido nítrico bidestilado e água destilada. Ácido nítrico bidestilado foi adicionado às amostras com a finalidade de tornar o pH menor que 2, impossibilitando a formação de complexos iônicos e precipitação de metais.

3.3 Etapa pós-campo

A etapa pós-campo refere-se às atividades realizadas em diferentes laboratórios do IGEO e em ferramentas computacionais. Iniciou-se pela pulverização das amostras de rocha para processamento analítico. As amostras de água e rocha foram então preparadas, a partir de diferentes métodos, para análise isotópica em espectrômetros de massa do Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do IGEO.

3.3.1 Pulverização de amostras de rocha

As amostras de rocha foram pulverizadas até passarem por peneira de malha inferior a 200 *mesh*. Este processo foi realizado com o uso de moinho de bolas, gral e pistilo de ágata (Fotografia 6) no LPA. Teve-se o cuidado de descontaminar os aparelhos antes do uso, utilizando-se água destilada.

Fotografia 6 – Ferramentas do Laboratório de Preparação de Amostras do Instituto de Geociências utilizados para a pulverização de amostras de rocha



Legenda – Moinho de bolas (à esquerda) e gral e pistilo de ágata (à direita).

Fonte – Acervo do autor.

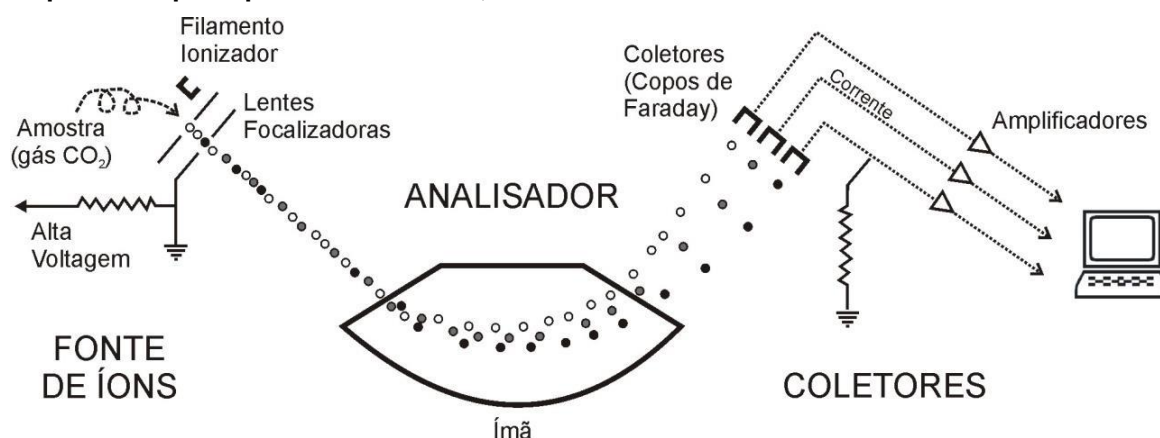
Após a preparação preliminar, as amostras para análise de isótopos de Pb passaram por um sucessivo ataque ácido para digestão da amostra, com uma posterior separação do Pb em colunas de troca isotópica. Ambos os procedimentos foram realizados nas dependências do LGI. Estes passos estão explicados na próxima seção.

3.3.2 Análise de isótopos estáveis

As razões isotópicas são usualmente medidas por espectrômetros de massa, compostos por três componentes principais: uma fonte de íons em uma extremidade, um analisador de massas na região central e um conjunto de coletores de íons na outra extremidade (CAXITO; SILVA, 2015) (Figura 4).

A fonte iônica gera íons positivos que são acelerados por diferença de potencial até o analisador, composto por um ímã, no qual é gerado um campo magnético, que deflete os íons pela razão massa / carga, provocando a separação dos diferentes isótopos em diferentes trajetórias. Os feixes são então captados por coletores que, pela geração de correntes elétricas, com intensidades dependentes do número de partículas que atingem cada coletor, fazem a leitura da razão isotópica (CAXITO; SILVA, 2015).

Figura 4 – Esquema simplificado de um espectrômetro de massa, com seus três componentes principais: fonte de íons, analisador e coletores



Fonte – Extraído de Caxito e Silva (2015).

Isótopos de H e O são analisados em espectrômetro de fonte gasosa, com a conversão de amostras líquidas em gases antes da análise. Já os isótopos de Pb, por

possuírem baixo potencial de ionização, devem ser medidos através do aquecimento em altas temperaturas da amostra em estado sólido (CAXITO; SILVA, 2015).

3.3.2.1 Análise isotópica de H e O

Os isótopos estáveis de H e O foram analisados em um Espectrômetro de Razão Isotópica Thermo Scientific, modelo Delta V do LGI (Fotografia 7). Para a operação do aparelho, são necessários 0,2 mL de amostra, com incerteza analítica de 0,4 ‰ para H e de 0,2 ‰ para O.

A entrada da amostra no espectrômetro é feita por um dispositivo Gasbench II que coleta a fase gasosa localizada no *headspace* do frasco. Este contém a amostra líquida (após a geração de um equilíbrio isotópico entre as duas fases pela adição de um gás e um catalisador de platina), de maneira a injetar um fluxo gasoso contínuo no aparelho.

O equipamento precisa de soluções com valores conhecidos (padrões) para a calibração das medidas. Os padrões utilizados foram secundários, referenciados para o padrão internacional Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW). Para os isótopos de H, foram obtidos padrões juntamente ao Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo: SP1 (2,2 ‰); SP2 (-26,7 ‰); e SP3 (-70,4 ‰). Para os isótopos de O, foram utilizados os padrões SLAP (-55,5 ‰), LGI1 (-37,16 ‰) e LGI2 (-4,52 ‰).

Os resultados analíticos foram dados pela notação δ , através da Equação 3.

$$\delta (\text{‰}) = [(R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}) / R_{\text{padrão}}] \times 1000 \quad (3)$$

Fotografia 7 – Espectrômetro de Razão Isotópica Thermo Scientific, modelo Delta V, do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Fonte – Acervo do autor.

3.3.2.2 Análise isotópica de Pb

A análise de isótopos estáveis de Pb (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb), em água e nos principais tipos de litologias, permite a correlação dos resultados analíticos. A determinação de razões isotópicas do Pb deve ser feita através de espectrômetro de massa de ionização termal (TIMS – *Thermal Ionisation Mass Spectrometer*), onde a amostra é carregada em formato sólido em um filamento metálico, normalmente de rênio ou tungstênio, altamente purificados, que é aquecido a altas temperaturas até que a amostra seja ionizada.

Os isótopos de Pb foram analisados no LGI, em um TIMS da marca VG, modelo Sector 54, multi-coletor equipado com 9 coletores Faraday e 1 Daly (Fotografia 8). Os erros analíticos (2σ) pelo teste do padrão NBS-981 foram de 0,003 ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), 0,001 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), 0,001 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), 0,00001 ($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) e 0,00007 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$).

Fotografia 8 - Thermal Ionisation Mass Spectrometer, marca VG, modelo Sector 54, multi-coletor equipado com 9 coletores Faraday e 1 Daly do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Fonte – Acervo do autor.

A preparação das amostras para análise foi iniciada pela digestão e separação do Pb. O primeiro passo foi a pesagem das amostras de rocha em pó em balança de precisão, separando-se aproximadamente 0,1 g em frascos de teflon, seguida pela adição de 10 gotas de HNO_3 concentrado nos frascos. Para as amostras de água, foram evaporados 100 mL de cada amostra em chapa elétrica (Fotografia 9), com o resíduo processado de mesma forma que as amostras de rocha nos passos seguintes.

Fotografia 9 – Chapa elétrica utilizada na preparação de amostras isotópicas de Pb



Fonte – Acervo do autor.

Na sequência, colocaram-se 2 mL de HNO_3 mais 5 mL de HF concentrados nos frascos, posicionando-os, destampados, em chapa elétrica até secagem total. A fase conseguinte foi a adição de 2 mL de HNO_3 mais 6 mL de HF concentrados, nas amostras ainda aquecidas, a fim de melhorar a dissolução da fase residual. Os frascos, então, foram tampados e postos na chapa elétrica por 3 dias. Posteriormente, foram adicionadas algumas gotas de HNO_3 concentrado nas tampas para a remoção de quaisquer gotas condensadas, sendo devolvida aos frascos. Os frascos, abertos, foram novamente colocados na chapa elétrica. Continuando, foram adicionados 5 mL de HCl concentrado com os frascos ainda aquecidos, agitando-os para a dissolução do resíduo. Os frascos foram fechados e postos na chapa elétrica por 1 dia. Por fim, adicionaram-se algumas gotas de HCl concentrado nas tampas para a remoção de quaisquer gotas condensadas, devolvendo-as aos frascos, e aguardando-se a secagem total dos frascos.

Com o final do processo de digestão, as amostras solubilizadas foram posicionadas em colunas de separação isotópica, preenchidas com 0,2 mL de resina de troca iônica. As colunas foram lavadas 4 vezes pela adição sucessiva de 2 mL de HBr 0,6N. Para completar o processo, foi adicionada uma solução de 1 mL de HCl 6N por duas vezes, que permitiu a coleta de Pb em soluções armazenadas em frascos de teflon.

Após a digestão e separação de Pb, as amostras foram depositadas em filamentos de Re juntamente à H_3PO_4 e sílica gel. Os filamentos foram posicionados em torretes que foram acoplados à entrada do TIMS. Aqueceram-se os filamentos pela passagem de corrente elétrica, com temperaturas em torno de 1500°C , causando a ionização da amostra. Os íons resultantes foram processados pelo espectrômetro de massa, com os resultados obtidos como valores de razões isotópicas.

3.3.3 Integração de dados isotópicos e estatísticos

Os dados isotópicos foram utilizados para a geração de gráficos de dispersão no *software* Excel, com valores de razões isotópicas em ambos os eixos, para a visualização da variabilidade de assinaturas isotópicas, reconhecendo a existência de padrões específicos para os diferentes aquíferos.

Os valores isotópicos de H e O foram plotados em gráficos juntos à demarcação da Linha de Água Meteórica Local (LAML), com os poços identificados pelos agrupamentos da AAH, para permitir identificar processos atuantes nos aquíferos, verificando relações de misturas entre águas, caminhos de fluxo e condições de recarga.

Os valores isotópicos de Pb em rocha e água foram plotados em conjunto para possibilitar a identificação de assinaturas correlatas. A existência de correlações mostra a influência da interação água-rocha nos aquíferos. A não correlação das assinaturas pode estar relacionada a contaminações antrópicas, típicas de meios urbanos, afetando a qualidade da água.

3.4 Vulnerabilidade dos métodos

Os diferentes métodos analíticos possuem vulnerabilidades específicas e contramedidas realizadas que estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Listagem das vulnerabilidades dos métodos utilizados

Método	Vulnerabilidade	Contramedidas adotadas
Levantamento de poços de água subterrânea	Desconhecimento das condições de coleta, análise e cadastro dos dados disponíveis em bancos de dados, como também das informações construtivas dos poços	Cálculo de balanço iônico, coleta <i>in situ</i> de parâmetros hidrogeoquímicos de controle (pH, condutividade elétrica e temperatura) e tratamento estatístico dos dados, correlacionando-os com dados geológicos
Estatística e correlação dos dados hidrogeoquímicos e morfo-estruturais	Decisão subjetiva das variáveis analisadas na ACP e na delimitação dos agrupamentos pela AAH	Verificação da existência de um significado geológico para os resultados
Amostragem de rochas	Falta de representatividade das unidades, em razão de malha de amostragem insuficiente para as variabilidades geológicas da área	Reconhecimento da geologia da área pela literatura disponível e coleta de amostras representativas
Preparação/leitura de amostras	Risco de contaminação nos diferentes processos de preparação e leitura de amostras.	Limpeza prévia de materiais e utilização de ambientes limpos para o desenvolvimento dos procedimentos

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

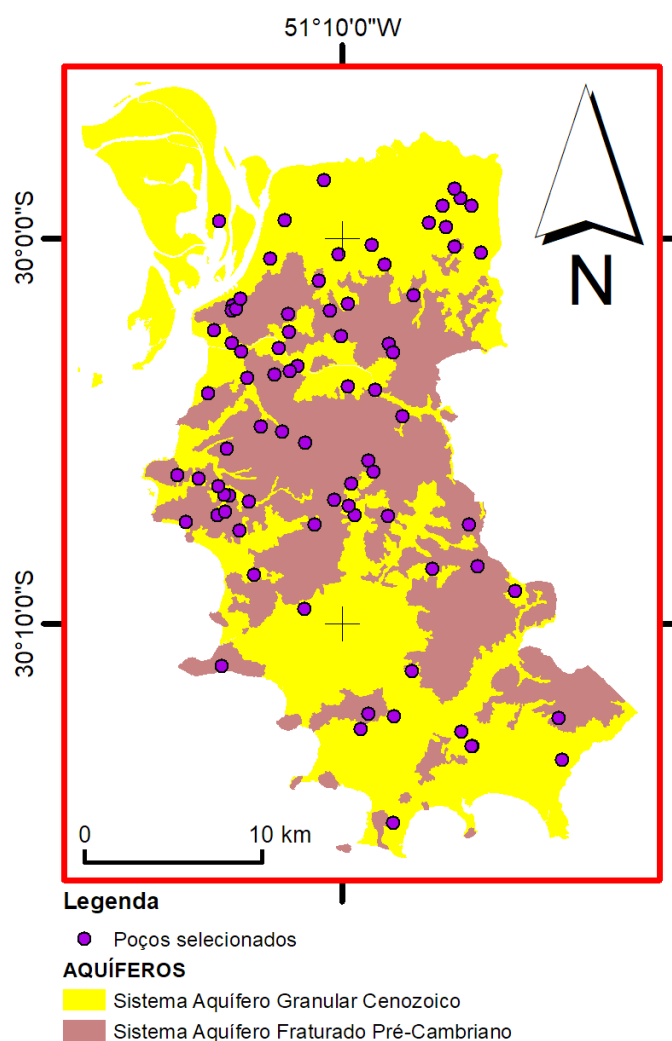
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo aborda os resultados encontrados nas diferentes etapas do trabalho, com a finalidade de interpretar a hidrogeoquímica e a hidrogeologia dos aquíferos.

4.1 Hidrogeoquímica estatística

As informações disponíveis nos bancos de dados do SIAGAS e DMAE totalizaram 327 poços, dos quais, após exclusão daqueles com dados insuficientes e erros de balanço iônico superiores à 10%, 80 foram selecionados para o desenvolvimento da pesquisa (Figura 5 e Anexos A e B).

Figura 5 – Poços selecionados para o desenvolvimento da pesquisa



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e mapa geológico de Hasenack et al. (2008).

4.1.1 Análise de Componentes Principais

A ACP foi processada com as concentrações de bicarbonato (HCO_3^-), cloreto (Cl^-), sódio (Na^+), sílica (SiO_2), cálcio (Ca^{++}), sulfato (SO_4^{--}), magnésio (Mg^{++}), nitrato (NO_3^-), potássio (K^+) e fluoreto (F^-), por corresponderem a variáveis de mesma natureza e serem os principais constituintes das águas subterrâneas dos aquíferos do MPA, em ordem decrescente de concentrações médias. O processo identificou três componentes para explicar mais de 70% da variância dos dados (Tabela 4 e Apêndice A), sendo um valor estatisticamente adequado para representar o conjunto amostral.

Tabela 4 – Resultado da Análise de Componentes Principais, mostrando os valores referentes à porcentagem de variância simples e acumulada de cada componente

Componente	Valores próprios iniciais			Somadas rotativas de carregamentos ao quadrado		
	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa
1	4,27	42,73	42,73	3,94	39,4	39,4
2	1,93	19,34	62,07	2,16	21,56	60,96
3	1,02	10,17	72,25	1,13	11,29	72,25
4	0,77	7,66	79,91			
5	0,58	5,81	85,72			
6	0,56	5,61	91,33			
7	0,41	4,10	95,43			
8	0,26	2,64	98,07			
9	0,18	1,80	99,87			
10	0,01	0,13	100,00			

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Os componentes identificados relacionam-se às diferentes variáveis utilizadas na ACP, mostrando correlações de Pearson positivas ou negativas entre si (Tabela 5). Estas correspondências podem ser interpretadas como resultantes de cenários hidrogeoquímicos específicos atuantes no meio subterrâneo.

Tabela 5 – Correlação de Pearson dos diferentes constituintes com os componentes

Constituinte	Componente		
	1	2	3
Cl ⁻	0,898	0,122	-0,011
Mg ⁺⁺	0,877	-0,029	0,025
Na ⁺	0,845	0,286	-0,011
Ca ⁺⁺	0,786	0,344	0,110
SO ₄ ⁻	0,695	0,192	0,107
K ⁺	0,670	-0,445	0,226
F ⁻	0,141	0,846	0,146
HCO ₃ ⁻	0,262	0,784	0,05
NO ₃ ⁻	-0,014	-0,609	0,434
SiO ₂	-0,104	-0,063	-0,917

Legenda – As principais correlações estão destacadas em negrito.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

O Componente 1 possui forte correlação positiva com o Cl⁻, Mg⁺⁺, Na⁺, Ca⁺⁺, SO₄⁻ e K⁺, íons de alta concentração no SAGC, relacionados à dissolução de diferentes constituintes dos depósitos sedimentares (RAMAGE, 2005): o cloreto deve ter como gênese os sedimentos relacionados a eventos de transgressão marinha; o sulfato está provavelmente ligado à dissolução parcial de gipso; o sódio e o cálcio têm relação com a dissolução do material com influência marinha, com a dissolução de gipso também liberando cálcio; o magnésio provém possivelmente da dissolução parcial de dolomita.

O Componente 2 possui correlação positiva com o F⁻ e HCO₃⁻, e negativa com o NO₃⁻. Nos poços em que o Componente 1 é elevado, o fluoreto e o bicarbonato podem ser explicados pela dissolução parcial de minerais que compõem os sedimentos (RAMAGE, 2005). Por outro lado, nos poços em que o Componente 1 é baixo, o fluoreto e bicarbonato estão ligados às mineralizações secundárias, pela dissolução de fluorita e calcita, respectivamente, que ocorrem nas discontinuidades das formações geológicas (ROISENBERG, 2001; ROISENBERG *et al.*, 2002; VIERO *et al.*, 2009). O nitrato nos aquíferos de Porto Alegre, por outro lado, segundo Roisenberg *et al.* (2003) e Ramage (2005), é proveniente de contaminação antrópica, decomposição de matéria orgânica e água meteórica. Concentrações acima de 13,3

mg/L (NO_3^-) são relacionadas às atividades humanas (BOUCHARD; WILLIAMS; SURAMPALLI, 1992). Apenas quatro poços (PDU39, PDU47, PDU69 e PDU72) possuem valores acima de 44,3 mg/L de nitrato como NO_3^- (valor máximo permitido para consumo humano pela Portaria 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde), representando 5% dos poços.

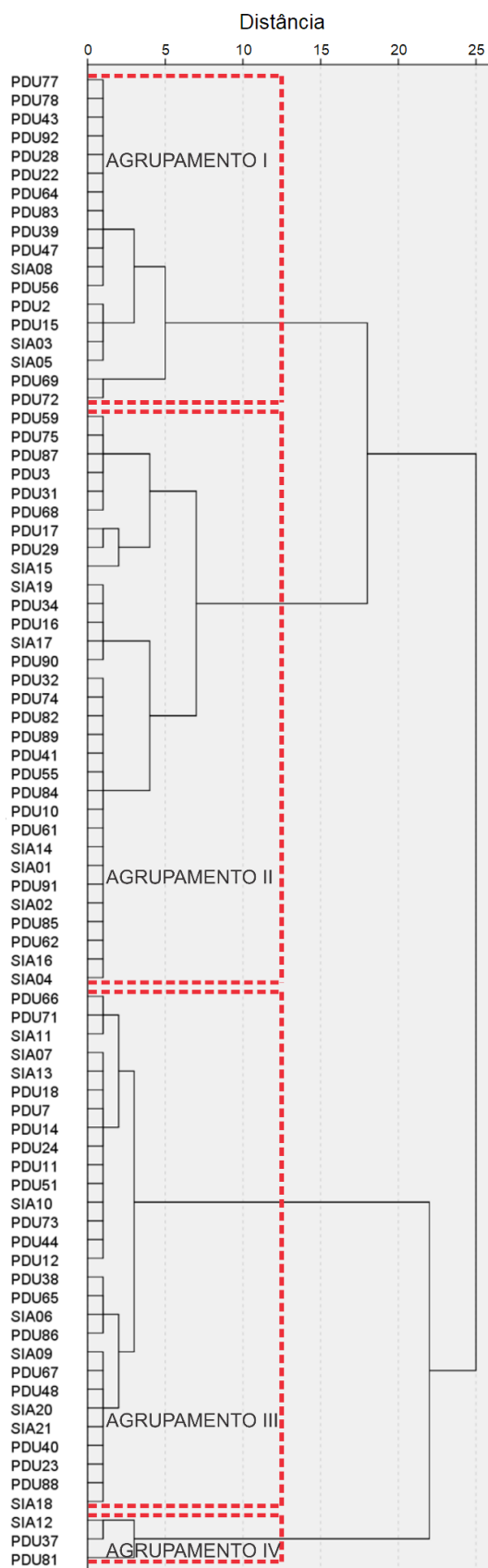
A relação inversa de fluoreto e nitrato com o Componente 2 mostra uma dependência entre os dois íons. O coeficiente de correlação é significativo (-0,319). Segundo Kim, Kim e Kim (2011), o fluoreto pode ter relação com águas de maior tempo de residência, ligado à interação água-rocha mais prolongada, enquanto o nitrato deve estar associado às águas mais recentes ou águas controladas por processos superficiais, vinculados à contaminação antrópica.

O Componente 3 apresenta forte correlação negativa apenas com o SiO_2 . Pode estar ligado a material coloidal que não foi retido na filtração, ou a sílica dissolvida resultante de processos de hidrólise, com liberação a partir de minerais silicatados.

4.1.2 Análise de Agrupamentos Hierárquicos

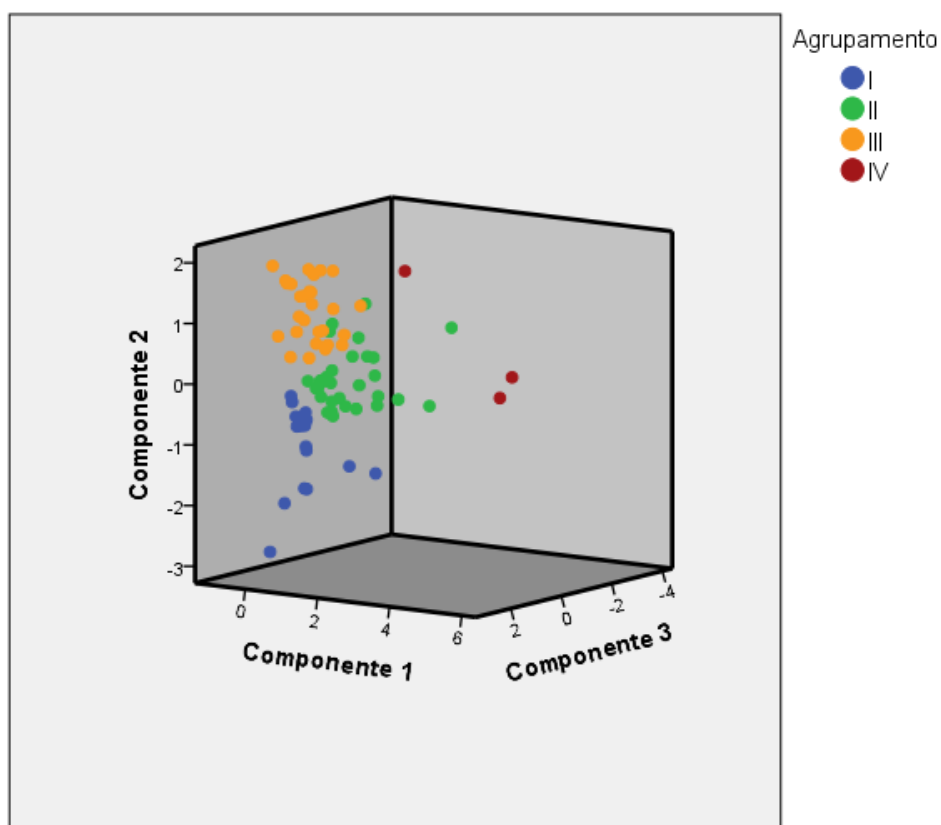
Os componentes encontrados na ACP foram aplicados para a AAH, permitindo a distinção de quatro agrupamentos (Figura 6 e Apêndice A). A distribuição de poços pelos valores dos componentes foi plotada em gráfico tridimensional para conferir a representatividade da classificação da AAH (Figura 7), verificando-se que os resultados são adequados, com a junção dos principais aglomerados de poços. Os dados, separados por grupos, foram plotados em um diagrama de Piper (PIPER, 1944) (Figura 8 e Apêndice A). Foram calculados os valores médios, desvios padrões, valores máximos e mínimos de cada agrupamento (Tabela 6). Além disso, os poços foram situados no mapa geológico georreferenciado (Figura 9).

Figura 6 – Dendrograma da Análise de Agrupamentos Hierárquicos, com os quatro agrupamentos discriminados



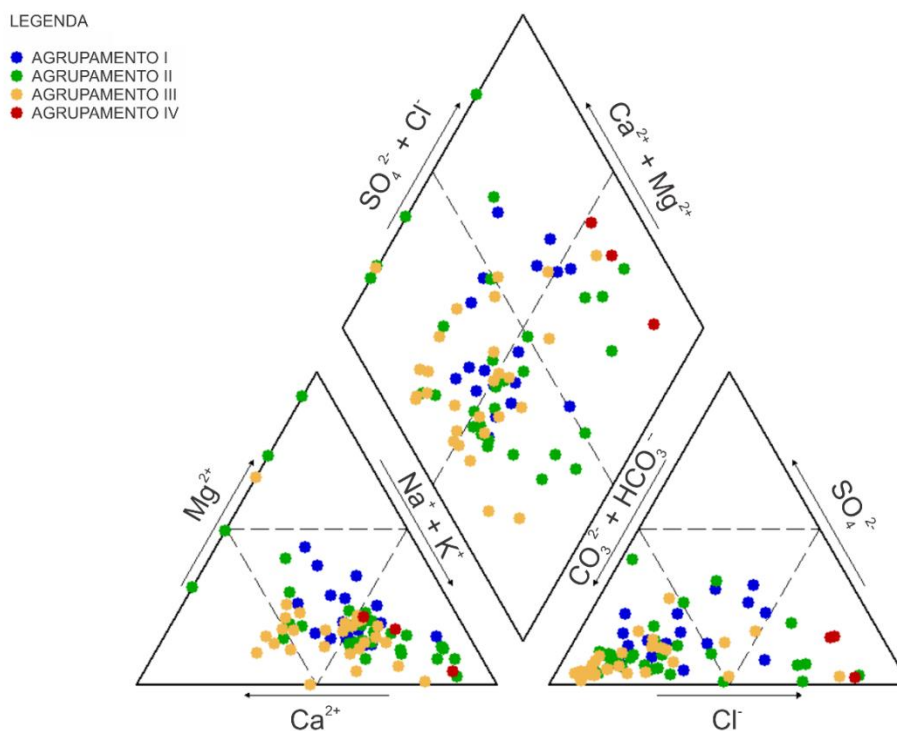
Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 7 – Gráfico tridimensional dos três componentes, mostrando a distribuição de poços separados por agrupamento



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 8 – Diagrama de Piper com os poços identificados por agrupamento



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

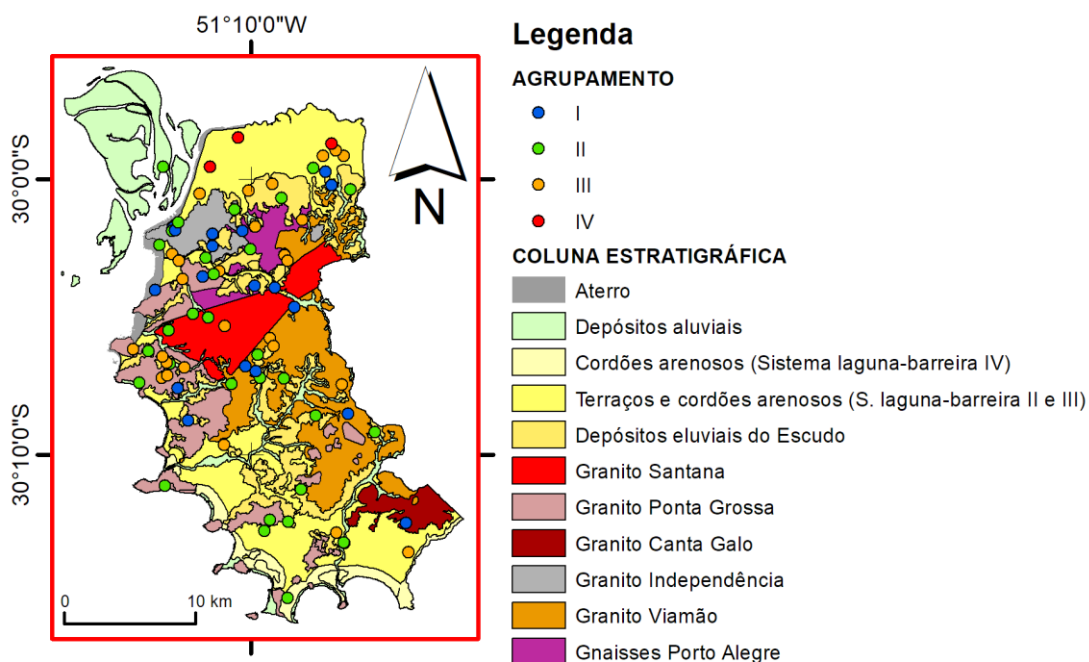
Tabela 6 – Dados estatísticos dos parâmetros hidrogeoquímicos e das concentrações dos principais íons de cada agrupamento

Agrupamento	Estatística	pH	CE*	Dureza	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	F ⁻	Mg ⁺⁺	NO ₃ ⁻	SiO ₂	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻
I	Média	6,69	187,67	58,91	11,84	16,96	0,51	6,23	21,69	28,11	14,79	16,73	4,87	53,27
	Desvio padrão	0,42	97,62	41,81	8,04	13,41	0,54	6,15	21,97	16,13	16,21	10,00	2,87	27,54
	Mínimo	6,10	72,00	12,00	1,58	4,70	0,10	0,99	0,03	5,68	5,00	3,99	1,71	20,85
	Máximo	7,56	414,00	175,87	28,53	46,11	2,05	24,36	72,90	56,00	60,64	47,00	12,00	113,81
II	Média	6,97	305,07	72,69	15,91	42,22	1,04	6,81	3,49	65,03	15,91	38,12	2,82	94,81
	Desvio padrão	0,40	266,01	63,66	15,44	78,90	1,09	5,59	4,72	25,65	21,89	43,26	1,67	39,91
	Mínimo	6,40	95,00	21,00	2,40	4,50	0,00	0,92	0,01	26,00	1,06	9,81	1,19	27,57
	Máximo	8,07	1445,00	350,00	76,00	406,60	4,43	20,70	16,65	156,00	110,00	204,00	6,97	197,62
III	Média	7,66	405,38	102,02	29,43	38,47	3,03	7,10	2,43	32,94	16,36	43,83	2,07	153,85
	Desvio padrão	0,45	232,67	34,42	15,59	62,20	1,18	4,33	4,34	12,42	17,13	28,48	0,89	36,13
	Mínimo	6,70	162,00	42,00	9,78	5,50	1,01	0,00	0,03	10,00	1,80	16,50	0,01	66,51
	Máximo	8,50	1324,00	168,00	76,70	327,50	4,80	20,50	19,26	51,30	74,00	137,80	4,30	222,72
IV	Média	7,62	2332,67	365,17	82,53	488,42	3,58	39,84	0,12	10,00	97,55	321,67	7,49	154,18
	Desvio padrão	0,62	785,11	222,13	43,60	39,72	1,57	27,25	0,16	0,00	66,96	50,12	3,84	16,68
	Mínimo	6,97	1598,00	126,00	38,60	445,60	2,55	10,10	0,03	10,00	20,66	282,00	3,07	140,23
	Máximo	8,20	3160,00	565,00	125,80	524,07	5,39	63,60	0,30	10,00	143,00	378,00	10,00	172,66

Legenda – *Condutividade elétrica. As médias estão destacadas em negrito. A condutividade elétrica está em $\mu\text{S/cm}$. A dureza está em mg/L de CaCO_3 . As concentrações iônicas estão em mg/L .

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 9 – Localização dos poços no mapa geológico identificados por agrupamento



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e mapa geológico de Hasenack et al. (2008).

As características dos agrupamentos encontrados são:

- Agrupamento I (18 poços) – predominam águas bicarbonatadas sódicas e mistas, com pH médio de 6,69, condutividade elétrica média de 188 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e dureza média de 59 mg/L de CaCO_3 , com ocorrência preferencial nas unidades granito-gnáissicas que compõem o SAFPC;
- Agrupamento II (31 poços) – dominam águas bicarbonatadas sódicas e mistas com média de pH de 6,97, média de condutividade elétrica de 305 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e dureza média da ordem de 73 mg/L de CaCO_3 , localizado tanto nas rochas do aquífero fraturado quanto nos depósitos do aquífero granular;
- Agrupamento III (28 poços) – prevalecem águas bicarbonatadas sódicas, cálcicas e mistas, com pH médio igual a 7,66, condutividade elétrica média de 405 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e dureza média de 102 mg/L de CaCO_3 , situado nas unidades do SAFPC e SAGC;
- Agrupamento IV (3 poços) – águas exclusivamente cloretadas sódicas, com valor médio de pH igual a 7,62, condutividade elétrica média de 2.333 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e dureza média de 365 mg/L de CaCO_3 , com posicionamento restrito na região Norte da área, localizando-se em terraços e cordões arenosos do SAGC.

É possível observar que as variáveis não utilizadas na ACP (pH, condutividade elétrica e dureza) possuem um aumento progressivo de seus valores do Agrupamento I ao IV. Esta gradação é interpretada como sendo o possível reflexo de diferentes intensidades de misturas de águas entre o SAFPC e o SAGC nos agrupamentos.

Os agrupamentos, plotados no mapa geológico, sugerem que não há relação entre o resultado da AAH e as diferentes litologias que compõem o SAFPC, o que pode ser resultado do pequeno tempo de residência e pelo fluxo relativamente rápido nas fraturas, acarretando em reduzida interação água-rocha.

Os componentes identificados na ACP, ao serem interpretados juntamente aos agrupamentos encontrados (Tabela 7 e Figuras 10, 11 e 12), permitem reconhecer:

- a elevada relação dos poços do Agrupamento IV com o aquífero sedimentar, pelo alto valor do Componente 1;
- o vínculo dos Agrupamentos I, II e III, pelo baixo valor do Componente 1, demonstrando uma relação distanciada do aquífero sedimentar;
- o aumento progressivo dos valores do Componente 2 nos Agrupamentos I ao III, exibindo aumento na concentração de fluoreto e bicarbonato, ligada a ocorrência de fluorita e calcita;
- os valores mais baixos do Componente 2 no Agrupamento I, relacionado a teores mais elevados de nitrato (os quatro poços com valores acima de 44,3 mg/L, valor máximo permitido para consumo humano pela Portaria 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde, pertencem a este grupo);
- o baixo valor do Componente 3 no Agrupamento II, correlacionado com alta concentração de sílica, sinalizando a hidrólise de silicatos;
- a inexistência de componentes que representem de maneira evidente a mistura de águas do SAFPC e do SAGC.

O Componente 1, embora possua elevada correlação positiva com íons típicos do SAGC, não caracteriza misturas de águas com este sistema. Este fato indica que os Agrupamentos I, II e III têm suas concentrações iônicas controladas principalmente pelo SAFPC, com uma contribuição atenuada do aquífero granular. As misturas são salientadas principalmente pelos valores médios de condutividade elétrica, pH e dureza de cada agrupamento, que se aproximam aos valores do Agrupamento IV.

Integrando os dados, é possível observar dois *endmembers*: o Agrupamento I, que possui uma assinatura química mais demonstrativa do SAFPC, e o Agrupamento IV, que é mais indicativo do SAGC. Os Agrupamentos II e III, de valores intermediários, sugerem misturas entre os sistemas, com o Agrupamento III tendo maior influência do SAGC, por possuir os valores de parâmetros hidrogeoquímicos mais próximos a ele (Tabela 6).

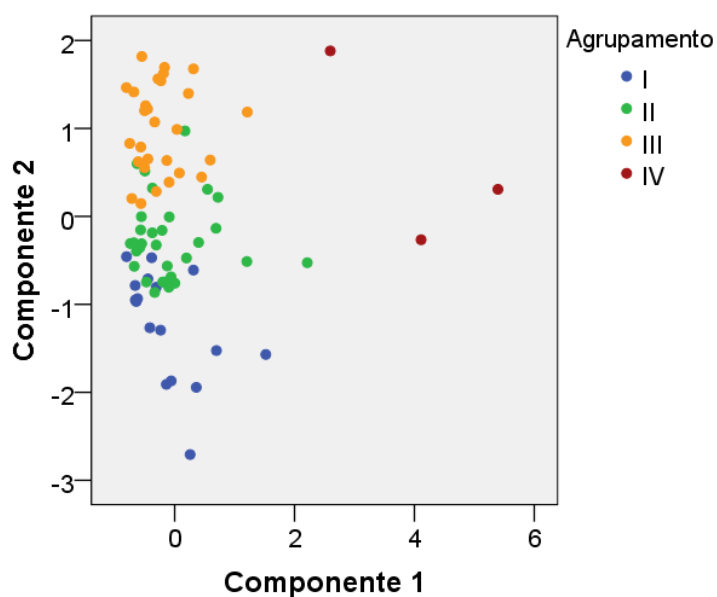
Tabela 7 – Valores estatísticos dos componentes por agrupamento

Agrupamento	Estatística	Componente		
		1	2	3
I	Média	-0,16	-1,21	0,77
	Desvio padrão	0,60	0,61	0,75
II	Média	-0,09	-0,26	-0,86
	Desvio padrão	0,64	0,45	0,88
III	Média	-0,23	0,99	0,44
	Desvio padrão	0,46	0,51	0,45
IV	Média	4,03	0,64	0,16
	Desvio padrão	1,40	1,11	0,85

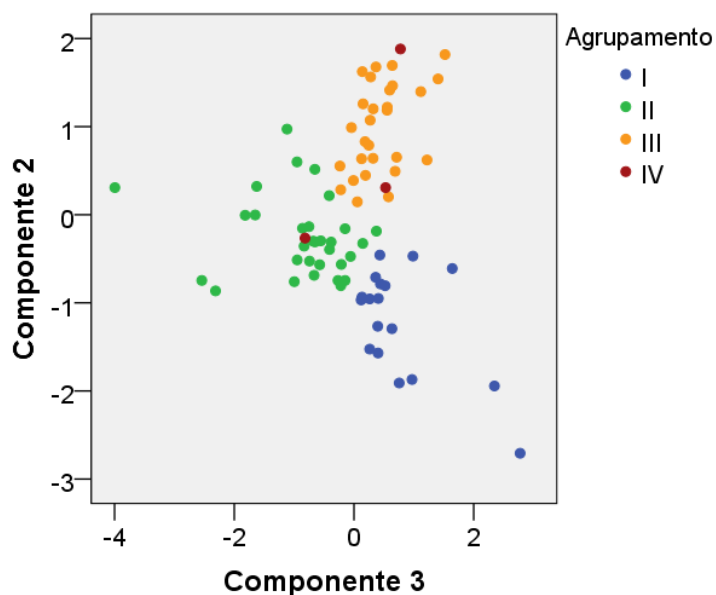
Legenda – Valores destacados em negrito apresentam os valores mais significativos.

Fonte – Elaborada pelo autor.

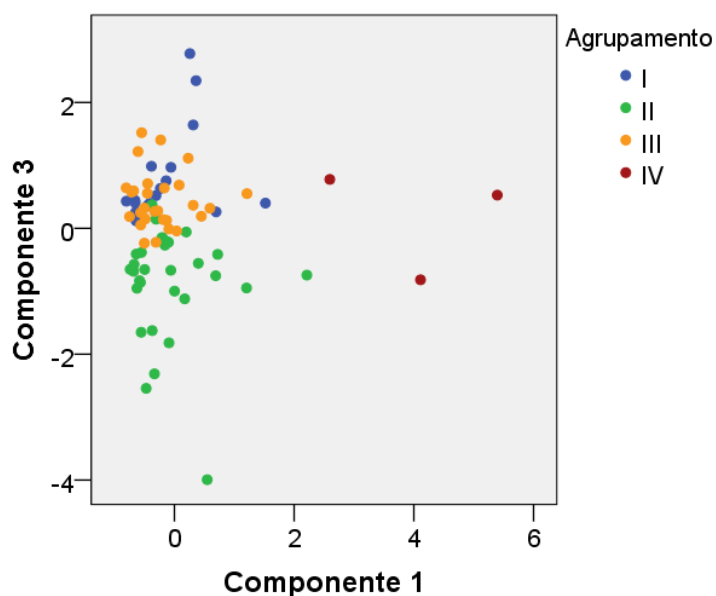
Figura 10 – Componente 1 vs. Componente 2 por agrupamento



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 11 – Componente 3 vs. Componente 2 por agrupamento

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

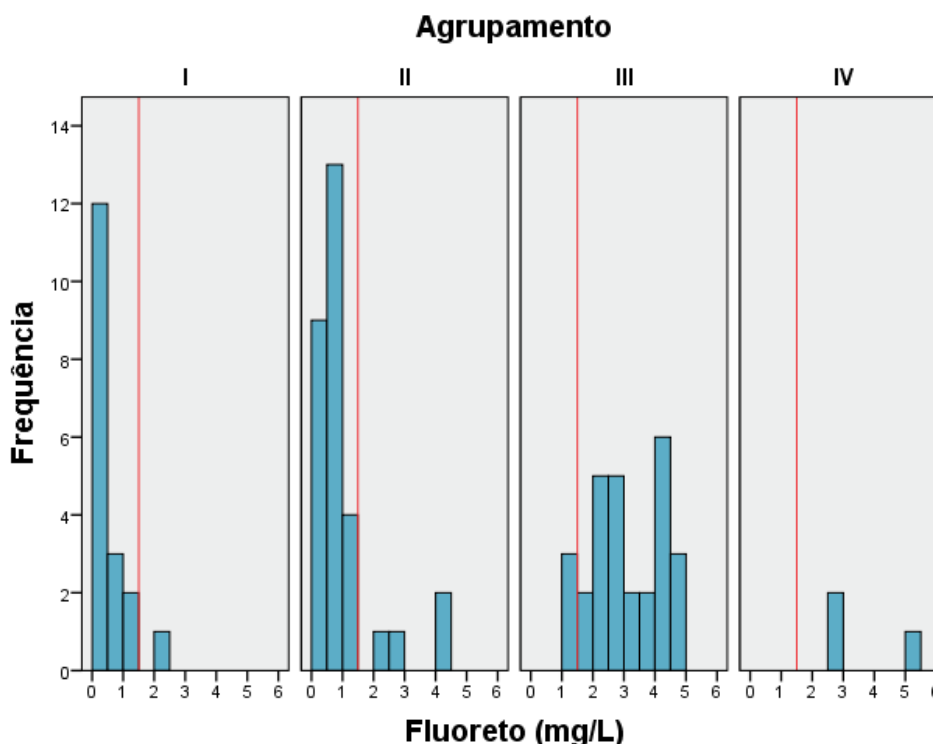
Figura 12 – Componente 1 vs. Componente 3 por agrupamento

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Os resultados da ACP e AAH mostraram a importância do fluoreto na composição das águas do MPA. O íon possui forte correlação positiva com o Componente 2 e apresenta um aumento progressivo de valores do Agrupamento I ao III, constituindo-se num dos principais problemas restritivos à qualidade da água subterrânea na região (VIERO *et al.*, 2009), o que motivou a abordagem mais detalhada neste trabalho.

Com a finalidade de investigar as concentrações de fluoreto, foi produzido um gráfico de frequência de valores, separados por agrupamentos (Figura 13). Também foi feita uma relação do íon com a ocorrência de fluorita, pela correlação dos íons cálcio e fluoreto, constituintes do mineral, nos diferentes agrupamentos (Tabela 8).

Figura 13 – Gráfico de frequência das concentrações de fluoreto por agrupamento



Legenda – As linhas em vermelho marcam o valor de 1,5 mg/L.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Tabela 8 – Correlação de Pearson de cálcio com fluoreto por agrupamento

Agrupamento	Correlação $\text{Ca}^{++} \times \text{F}^{-}$
I	0,490
II	-0,178
III	-0,090
IV	-0,831

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

O gráfico de frequência das concentrações de fluoreto nos diversos agrupamentos demonstra que há um aumento substancial do número de poços com valores superiores a 1,5 mg/L (valor máximo permitido para consumo humano pela

Portaria 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde) do Agrupamento I ao Agrupamento III, este constituído quase que exclusivamente por poços com concentrações de fluoreto superiores a 1,5 mg/L.

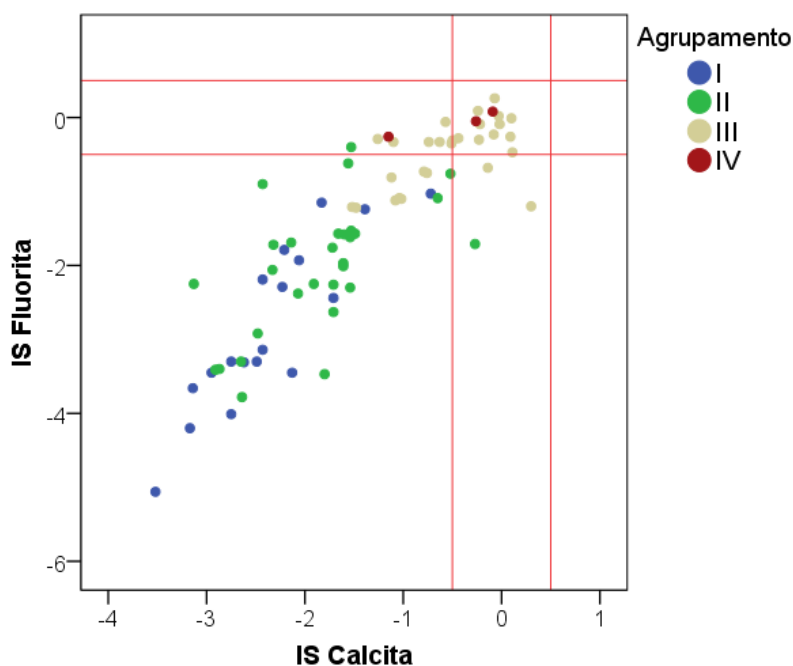
As correlações de cálcio e fluoreto sugerem que no Agrupamento I, em que há uma correlação positiva entre os dois íons, as concentrações destes elementos decorrem da dissolução de fluorita. Nos Agrupamentos II e III, a falta de correlação aponta mais de uma origem para o cálcio, que é liberado da fluorita, e, também, de outros minerais, podendo refletir misturas entre os aquíferos fraturado e granular. O Agrupamento IV, por fim, apresenta uma forte correlação negativa entre os íons cálcio e fluoreto, apontando que grande parte da concentração de cálcio resulta da dissolução de minerais dos sedimentos, enquanto o fluoreto provém de misturas de águas do SAGC com águas do SAFPC, no qual o cálcio possui baixas concentrações.

4.1.3 Modelamento hidrogeoquímico

O modelamento hidrogeoquímico, para cálculo dos IS, foi feito para os minerais fluorita, calcita, dolomita e gipso (Apêndice B), que foram escolhidos pela influência destes minerais nas concentrações iônicas das águas subterrâneas do MPA (ROISENBERG, 2001; RAMAGE, 2005).

Os IS calculados para fluorita e calcita (Figura 14) mostram que o Agrupamentos III e IV estão saturados, apontando uma maior influência das mineralizações secundárias na química de suas águas, enquanto os Agrupamentos I e II se mostram subsaturados, sendo menos influenciados.

Figura 14 – Gráfico de dispersão dos índices de saturação de calcita vs. fluorita por agrupamento

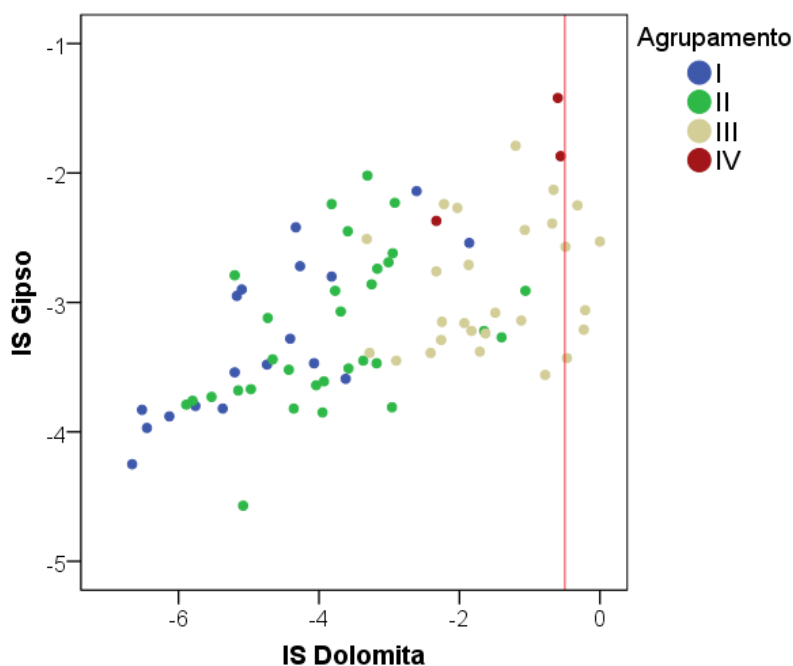


Legenda – As linhas em vermelho marcam os valores -0,5 e 0,5 do Índice de Saturação (IS) indicando poços saturados ($-0,5 < IS < 0,5$), e poços subsaturados ($IS < -0,5$). Inexistem poços com supersaturação ($IS > 0,5$).

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Os IS para gipso e dolomita (Figura 15) mostram subsaturação em quase todos os poços, com exceção de gipso em poços do Agrupamento III. Embora majoritariamente subsaturados, os Agrupamentos III e IV apresentam os maiores valores dos IS, refletindo maior relação das mineralizações destes minerais, resultado condizente com a mineralogia dos depósitos sedimentares (RAMAGE, 2005), reforçando as características do SAGC neles. Os Agrupamentos I e II mostram IS mais baixos, relacionados à inexistência destes minerais nas rochas do SAFPC.

Figura 15 – Gráfico de dispersão dos índices de saturação de dolomita vs. gipso por agrupamento



Legenda – A linha vertical em vermelho marca os valores -0,5 do Índice de Saturação, indicando poços saturados à direita dela, e subsaturados à esquerda.

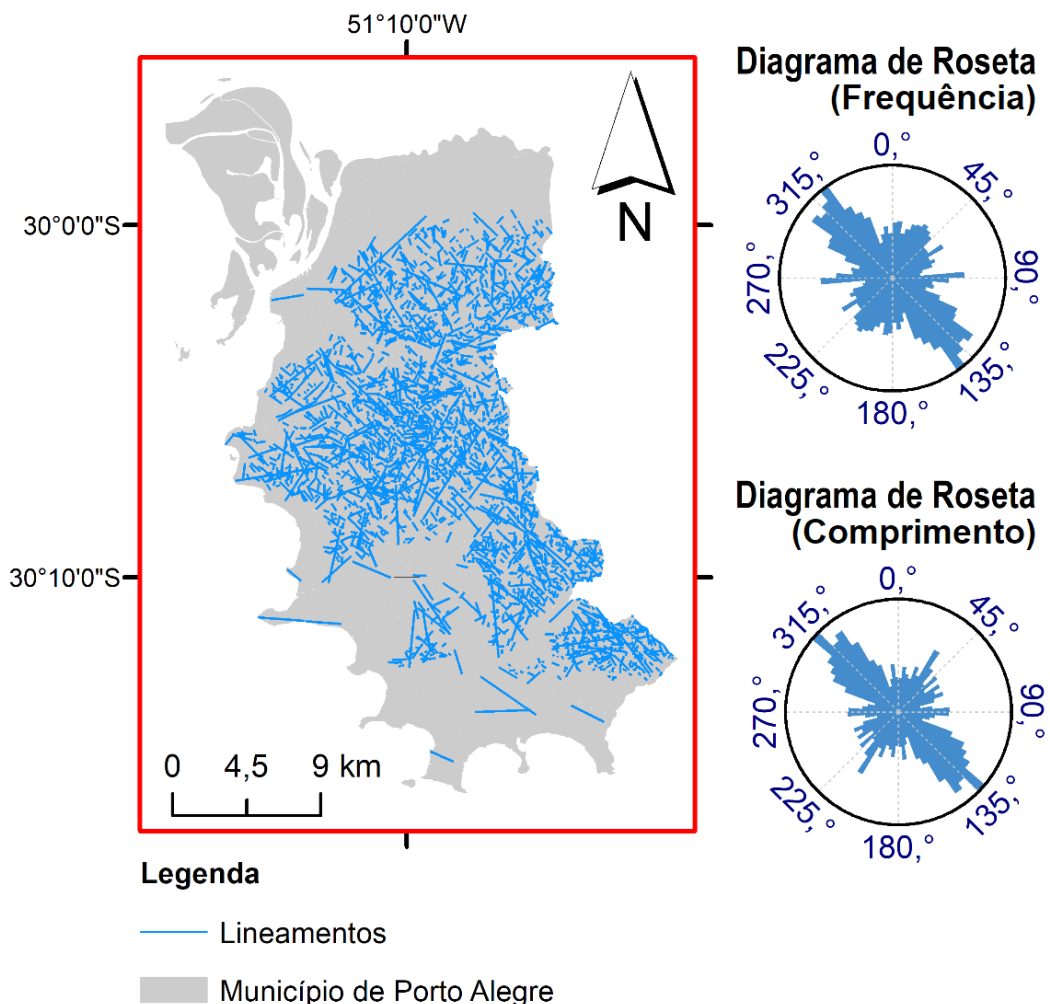
Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

4.1.4 Demarcação de lineamentos

A etapa de demarcação de lineamentos resultou na identificação de 4.652 lineamentos (Figura 16). As estruturas possuem direção dominante NO-SE, condizendo com dados de Kuznetsov *et al.* (2014) para a região do Município de Porto Alegre, sendo os lineamentos NE-SO, N-S e E-O menos expressivos.

A ocorrência de lineamentos é restrita na área de exposição do SAGC, onde ocorrem os poços do Agrupamento IV. Isto está relacionado à origem mais precoce das estruturas e às características próprias das formações sedimentares pouco coesas ou inconsolidadas, como as que ocorrem na área em estudo, que podem não apresentar ou mascarar a expressão morfológica das estruturas no terreno. Vale ressaltar que, por outro lado, as formações sedimentares de maior coesão, diferentemente das que ocorrem na área, resultantes de diagênese progressiva, podem apresentar lineamentos bem definidos.

Figura 16 – Lineamentos identificados no Município de Porto Alegre.

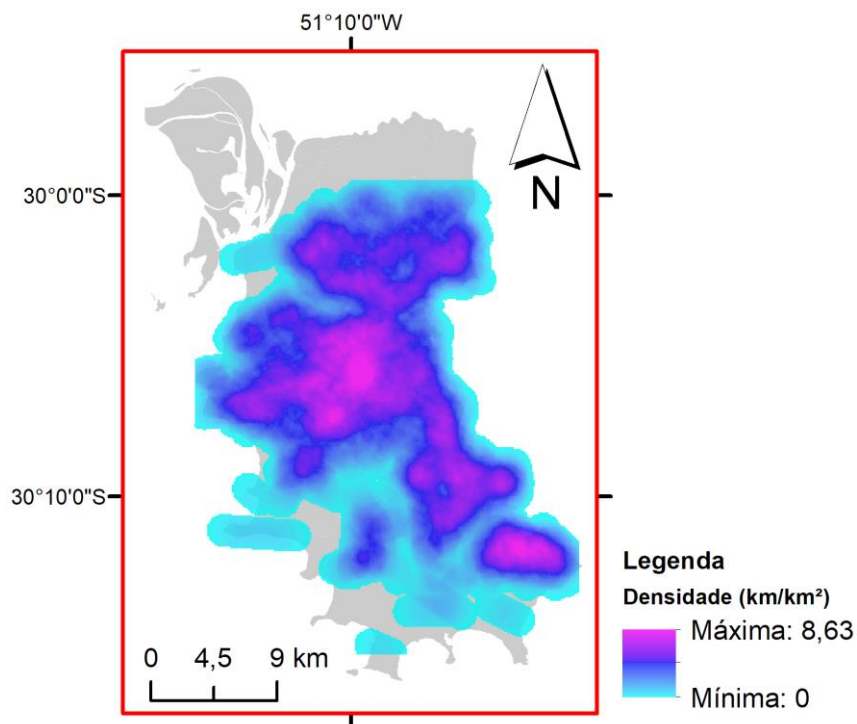


Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e dados de Roisenberg (2001).

Nas áreas de exposição do SAFPC, onde há a maior ocorrência dos Agrupamentos I, II e III, os lineamentos são densamente distribuídos. A alta concentração reflete a intensa tectônica rúptil que afetou as litologias, gerando a estruturação interna que permite o armazenamento e transporte de água nas rochas.

O mapa de lineamentos foi correlacionado com os dados hidrogeoquímicos e estatísticos da ACP e AAH. Os atributos de densidade foram identificados para a população total (Figura 17) e segmentados por direções (NO-SE, NE-SO, N-S, E-O). Para observar a distribuição dos valores quantificados (Apêndice A), foram gerados diagramas de caixa, com a distribuição de lineamentos totais e divididos por agrupamento (Figuras 18 e 19).

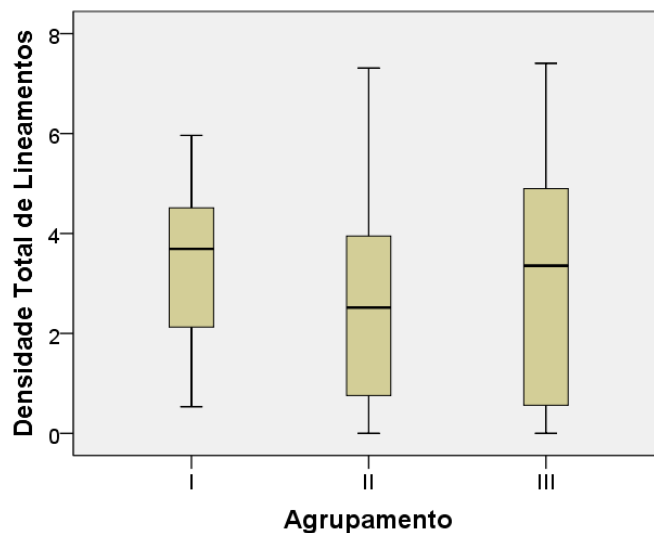
Figura 17 – Mapa da densidade total de lineamentos no Município de Porto Alegre



Nota – A unidade de densidade de lineamentos é referente à soma do comprimento de lineamentos por área.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

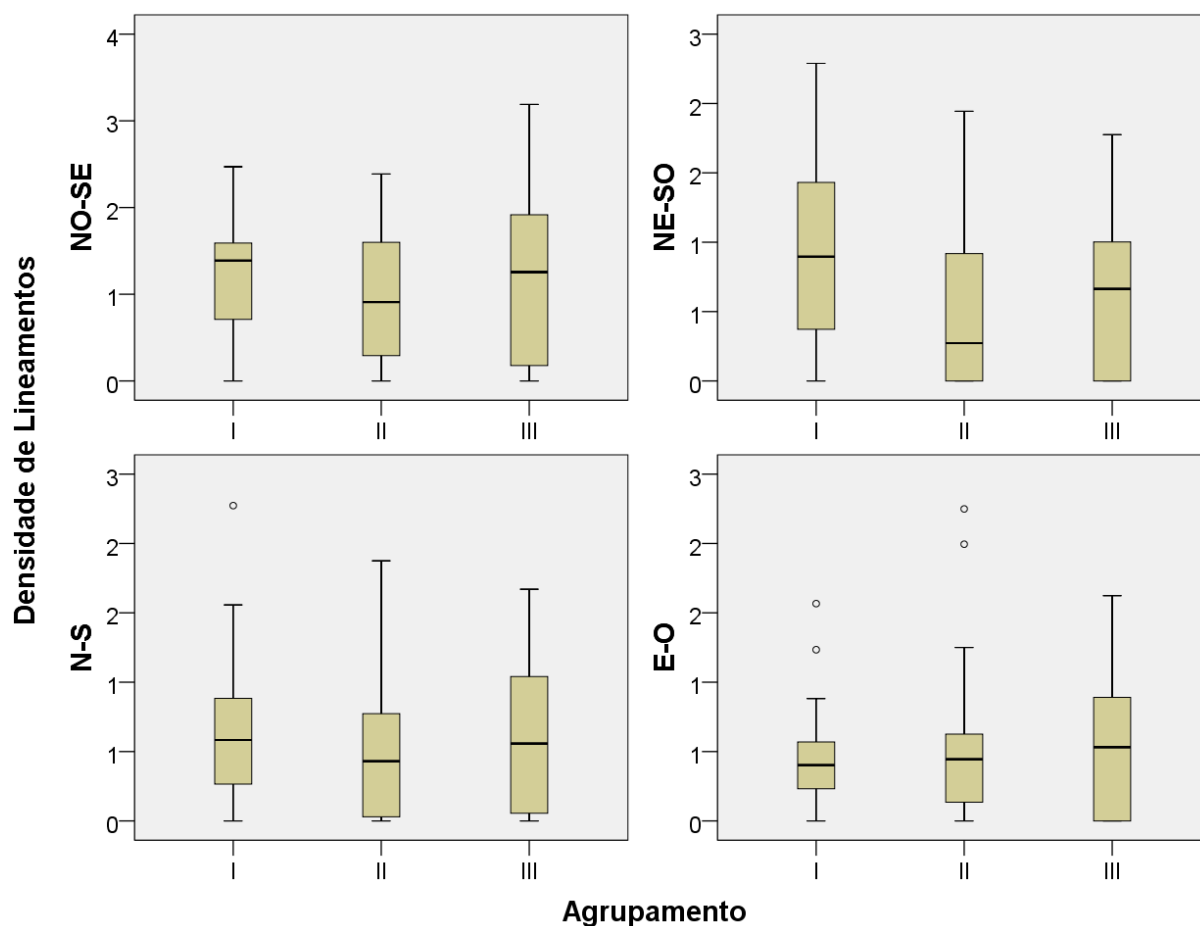
Figura 18 – Diagrama de caixa da densidade total de lineamentos por agrupamento



Legenda – Os traços horizontais nas barras representam, de baixo para cima: valor mínimo, quartil inferior, mediana, quartil superior e valor máximo.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 19 – Diagramas de caixa da densidade de lineamentos NO-SE, NE-SO, N-S e E-O por agrupamento



Legenda – Os traços horizontais nas barras representam, de baixo para cima: valor mínimo, quartil inferior, mediana, quartil superior e valor máximo. Os pontos são *outliers*.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Os diagramas de caixa permitiram a filtragem de valores. *Outliers* para diferentes direções de lineamentos foram identificados. Por serem valores anômalos em relação à população, eles foram desconsiderados para a subsequente integração de dados. Também foram descartadas as densidades nulas relacionadas às áreas do SAGC, tendo em vista que não refletem a estruturação em subsuperfície. Os valores médios e desvios padrões dos lineamentos filtrados foram tabelados (Tabela 9).

Para verificar a influência das diferentes famílias de direções de lineamentos nas características químicas das águas subterrâneas, foi feita a correlação dos valores de densidade filtrados com os parâmetros hidrogeológicos dos poços separados por agrupamentos (Tabelas 10 e 11).

Pela correlação foi possível observar que a direção de lineamentos E-O é a com maior importância hidrogeoquímica, por apresentar um aumento contínuo no valor de densidade do Agrupamento I ao III, mostrando correspondência à progressão que ocorre nos valores do Componente 2 (que possui correlação positiva com fluoreto e bicarbonato). Esta relação pode indicar que lineamentos E-O são as estruturas que promovem o principal aporte dos íons resultantes da dissolução de fluorita e calcita existentes em fraturas das litologias que compõem o SAFPC.

Tabela 9 – Valores médios e desvios padrões de lineamentos por agrupamento

Densidade de lineamentos	Agrupamento	Estatística	Valor
NO-SE	I	Média	1,32
		Desvio padrão	0,63
	II	Média	1,14
		Desvio padrão	0,69
	III	Média	1,54
		Desvio padrão	0,82
NE-SO	I	Média	1,09
		Desvio padrão	0,66
	II	Média	0,75
		Desvio padrão	0,54
	III	Média	0,89
		Desvio padrão	0,42
N-S	I	Média	0,72
		Desvio padrão	0,38
	II	Média	0,65
		Desvio padrão	0,44
	III	Média	0,82
		Desvio padrão	0,47
E-O	I	Média	0,39
		Desvio padrão	0,20
	II	Média	0,50
		Desvio padrão	0,29
	III	Média	0,79
		Desvio padrão	0,48
Total	I	Média	3,34
		Desvio padrão	1,75
	II	Média	2,63
		Desvio padrão	1,96
	III	Média	3,71
		Desvio padrão	1,99

Nota – Foram removidos valores de densidade nulos, referentes às áreas de coberturas sedimentares, e também *outliers*.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Tabela 10 – Correlação de Pearson das direções de densidade de lineamentos com fluoreto, bicarbonato, nitrato, sílica, pH, condutividade elétrica, dureza e componentes principais

Densidade de Lineamentos	F ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	pH	Condutividade elétrica	Dureza	Componente		
								1	2	3
NO-SE	-0,002	0,044	-0,073	-0,175	0,034	-0,261	-0,061	-0,277	0,100	0,117
NE-SO	-0,192	-0,074	-0,089	-0,320	0,072	-0,261	-0,043	-0,155	-0,053	0,219
N-S	0,043	0,078	-0,165	-0,003	0,148	-0,047	0,154	-0,065	0,132	-0,041
E-O	0,342	0,440	-0,286	-0,005	0,268	0,176	0,337	-0,042	0,413	-0,043
Total	-0,034	0,019	-0,136	-0,187	0,092	-0,376	-0,131	-0,391	0,103	0,106

Legenda – Valores destacados em negrito apresentam as correlações mais significativas.

Nota – Foram removidos valores de densidade nulos, referentes às áreas de coberturas sedimentares, e também *outliers*.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Tabela 11 – Correlação de Pearson das direções de densidade de lineamentos com cálcio, cloreto, magnésio, sulfato, sódio e potássio

Densidade de Lineamentos	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺
NO-SE	0,049	-0,209	-0,092	-0,291	-0,307	-0,186
NE-SO	0,087	-0,257	-0,228	-0,092	-0,294	0,103
N-S	0,229	-0,194	0,004	0,022	-0,318	-0,111
E-O	0,253	-0,084	0,255	-0,134	0,036	-0,169
Total	-0,005	-0,328	-0,192	-0,359	-0,417	-0,220

Legenda – Valores destacados em negrito apresentam as correlações mais significativas.

Nota – Foram removidos valores de densidade nulos, referentes às áreas de coberturas sedimentares, e também *outliers*.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Outra correlação observada se refere às misturas do SAFPC e do SAGC. Elas são marcadas por concentrações intermediárias de íons resultantes do aquífero granular, acompanhadas pelo aumento progressivo de pH, condutividade elétrica e dureza, e também estão associadas com os lineamentos E-O, conforme mostram as Tabelas 10 e 11. Esta direção de estruturas apresenta os maiores valores de correlação positiva para os parâmetros hidrogeoquímicos acima citados, assim como as correlações mais positivas para as concentrações iônicas de cálcio e magnésio.

Os lineamentos E-O também mostram vinculação ao nitrato, exibindo a correlação mais negativa entre os diferentes grupos de direções de lineamentos, embora todas as direções apresentem correlação negativa, revelando que a menor densidade de estruturas tectônicas se relaciona às maiores concentrações de nitrato. Pauwels, Foucher e Kloppmann (2000) propõem a relação do decréscimo de nitrato em subsuperfície com a diluição por águas subterrâneas mais antigas não contaminadas, como também por reações de desnitrificação, ambas relacionadas a maiores tempos de residência. Tais processos podem ser facilitados pela ocorrência de lineamentos, por permitirem conexões hidráulicas.

4.2 Isótopos ambientais

A partir da análise estatística, foi planejada a amostragem de poços com maior influência do SAFPC, ou seja, dos Agrupamentos I e II. Em muitos locais não foi possível amostrar, seja por desativação do poço ou por falta de autorização do proprietário (Tabela 12). Assim, para se obter um número representativo de pontos, foram também amostrados poços de outros agrupamentos, bem como um poço adicional que não constava nos bancos de dados inicialmente utilizados (EXT01), localizado na área do Granito Viamão (Fotografias 10 e 11).

Tabela 12 – Poços em que houve reconhecimento presencial sem possibilidade de amostragem

Código	Estabelecimento	Agrupamento	Motivo
PDU10	Motel dos Alpes	II	Poço desativado
PDU15	Colégio Maria Imaculada	I	Poço desativado
PDU16	Edifício residencial	II	Poço desativado
PDU31	Metalúrgica Emílio Cioba	II	Poço desativado
PDU32	Hospital Belém	II	Poço desativado
PDU34	Hotel Umbu	II	Poço desativado
PDU39	Sudeste Transportes	I	Não houve permissão de coleta
PDU47	Residência particular	I	Não houve permissão de coleta
PDU72	Escritório	I	Poço desativado
PDU83	Sítio Taquaral	I	Não houve permissão de coleta
SIA3, SIA4, SIA5	Hospital Santa Casa	I, II, I	Não houve permissão de coleta
SIA12	FIERGS	IV	Poço desativado
SIA13	Tintas Kresil	III	Não houve permissão de coleta
SIA14	Condomínio Century Square	II	Não houve permissão de coleta

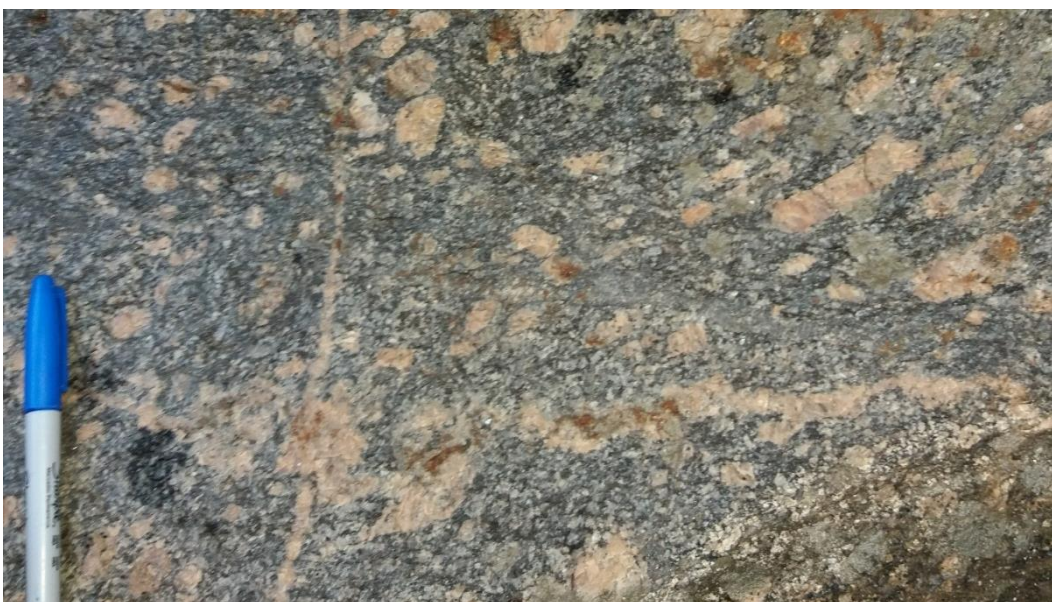
Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Fotografia 10 – Coleta de água no poço EXT01 ao lado de afloramento do Granito Viamão



Fonte – Acervo do autor.

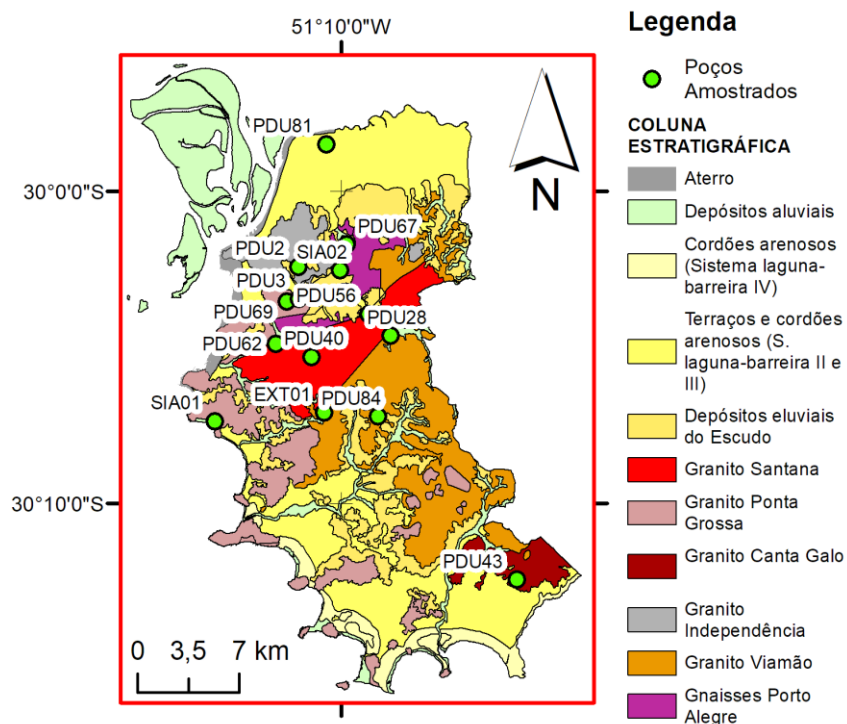
Fotografia 11 – Detalhe do afloramento do Granito Viamão ao lado do poço EXT01



Fonte – Acervo do autor.

Ao todo, 14 poços foram amostrados (Figura 20): 5 poços do Agrupamento I, 5 poços do Agrupamento II, 2 poços do Agrupamento III, 1 poço do Agrupamento IV e 1 poço sem controle estatístico. Os parâmetros de pH, temperatura e condutividade elétrica foram obtidos *in situ* (Tabela 13).

Figura 20 – Localização dos poços amostrados no mapa geológico



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e mapa geológico de Hasenack et al. (2008).

Tabela 13 – Poços amostrados, com a identificação dos estabelecimentos, os valores de pH, temperatura e condutividade elétrica medidos *in situ*, a data de amostragem, o agrupamento e a litologia da entrada de água.

Código	Estabelecimento	pH	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica (µS/cm)	Data	Agrupamento	Litologia da entrada de água
EXT01	Fontes de Belém	5,8	19,7	161	04/08/2016	*	Granito Viamão
PDU2	Churrascaria Barranco	6,0	23,9	276	10/07/2017	I	Granito Independência
PDU3	Partenon Tênis Clube	5,5	23,5	248	24/07/2017	II	Granito Ponta Grossa
PDU28	Casa de Portugal	5,9	19,0	71	04/08/2017	I	Granito Viamão
PDU40	Casa de Oração São João da Cruz	6,1	20,6	205	14/07/2017	III	Granito Santana
PDU43	Sítio Santa Paula	5,6	21,9	85	15/07/2017	I	Granito Canta Galo
PDU56	Lar Santo Antônio dos Excepcionais	7,6	22,0	340	04/08/2017	I	Granito Santana
PDU62	Teresópolis Tênis Clube	6,9	22,8	228	14/07/2017	II	Granito Santana
PDU67	Posto Nonemacher	5,7	21,5	235	25/07/2017	III	Gnaisses Porto Alegre
PDU69	Associação Literária São Boaventura	5,5	22,6	237	25/07/2017	I	Granito Ponta Grossa
PDU81	Savar Veículos	7,8	23,6	3090	21/07/2017	IV	Sedimentos
PDU84	Sítio Leoni	6,4	21,8	99	19/07/2017	II	Granito Viamão
SIA01	Associação Atlética Banco do Brasil	6,1	21,0	214	11/07/2017	II	Granito Ponta Grossa
SIA02	Fonte Jordão	6,2	21,6	301	13/07/2017	II	Gnaisses Porto Alegre

Legenda – *Sem agrupamento estatístico.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e dados de litologia da entrada de água obtidos nos bancos de dados do Departamento Municipal de Água e Esgotos e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, bem como pela utilização do mapa geológico extraído de Hasenack *et al.* (2008).

4.2.1 Isótopos de H e O

Os valores isotópicos de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ dos poços amostrados são apresentados na Tabela 14. Os poços PDU3 e PDU62 tiveram resultados de $\delta^2\text{H}$ com incertezas analíticas superiores a 0,4 ‰, valor de referência máximo do LGI para a confiabilidade dos dados. O poço PDU40 não apresentou leitura de $\delta^2\text{H}$. Para estes casos, foi considerado o valor de $\delta^2\text{H}$ calculado pela LAML, obtida a partir de dados da Global Network of Isotopes in Precipitation, com equação linear definida pela Equação 4. Se as águas subterrâneas são representativas da recarga meteórica, este cálculo é uma aproximação válida para as interpretações desta pesquisa.

$$\delta^{18}\text{O} = 7,6692 \times \delta^2\text{H} + 10,592 \quad (4)$$

Tabela 14 – Valores isotópicos de oxigênio e hidrogênio dos poços amostrados, identificados por agrupamento e litologia da entrada de água

Código	Agrupamento	Litologia da entrada de água	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW)	$\delta^2\text{H}$ (‰ VSMOW)
EXT01	*	Granito Viamão	-4,80	-28,52
PDU2	I	Granito Independência	-4,26	-24,55
PDU28	I	Granito Viamão	-4,83	-26,55
PDU3	II	Granito Ponta Grossa	-4,66	**
PDU40	III	Granito Santana	-4,74	***
PDU43	I	Granito Canta Galo	-4,69	-26,43
PDU56	I	Granito Santana	-4,80	-28,71
PDU62	II	Granito Santana	-4,62	**
PDU67	III	Gnaisses Porto Alegre	-4,74	-27,25
PDU69	I	Granito Ponta Grossa	-4,46	-26,40
PDU81	IV	Sedimentos	-5,01	-29,85
PDU84	II	Granito Viamão	-4,58	-22,91
SIA01	II	Granito Ponta Grossa	-4,53	-23,05
SIA02	II	Gnaisses Porto Alegre	-4,41	-25,21

Legenda – *Sem agrupamento estatístico. **Incerteza analítica alta. ***Sem leitura analítica.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e com as informações referentes às litologias da entrada de água obtidas nos bancos de dados do Departamento Municipal de Água e Esgotos e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, bem como pela utilização do mapa geológico extraído de Hasenack *et al.* (2008).

Os dados utilizados para gerar a LAML também foram usados para a elaboração de uma tabela com as médias mensais dos valores isotópicos das águas meteóricas no MPA (Tabela 15), possibilitando reconhecer a variabilidade mensal da área.

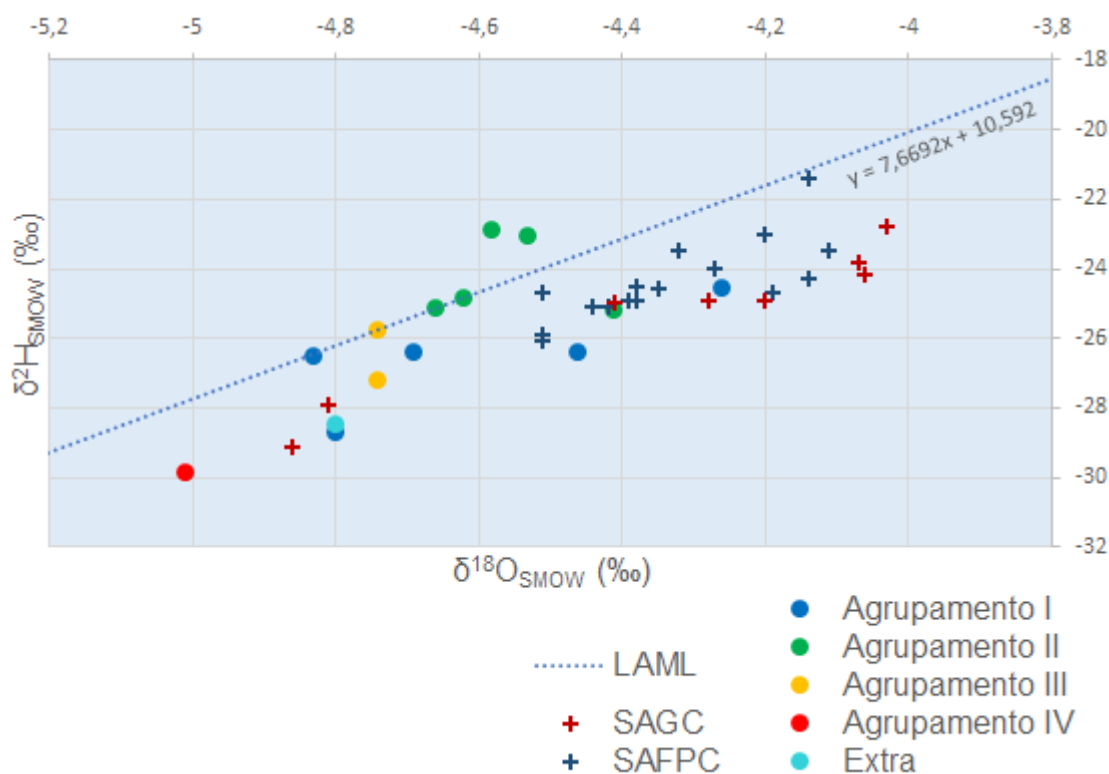
Tabela 15 – Precipitação média, temperatura média e valores isotópicos médios mensais de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ no período de 1965 a 1983

Mês	Precipitação média (mm)	Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$)	$\delta^{18}\text{O}$ médio (‰ VSMOW)	$\delta^2\text{H}$ médio (‰ VSMOW)
Janeiro	95,3	24,5	$-4,94 \pm 1,35$	$-29,8 \pm 11,4$
Fevereiro	108,9	24,4	$-6,07 \pm 1,86$	$-33,8 \pm 10,9$
Março	95,1	23,1	$-6,24 \pm 1,76$	$-37,3 \pm 13,6$
Abril	73,4	19,8	$-6,05 \pm 1,72$	$-34,9 \pm 10,9$
Mai	84,6	17,0	$-6,84 \pm 1,60$	$-42,9 \pm 12,8$
Junho	129,8	14,5	$-4,57 \pm 1,84$	$-23,7 \pm 15,7$
Julho	121,4	14,7	$-4,34 \pm 1,36$	$-21,1 \pm 10,1$
Agosto	146,4	15,4	$-3,28 \pm 1,10$	$-13,4 \pm 10,1$
Setembro	136	16,9	$-2,46 \pm 1,04$	$-7,6 \pm 7,9$
Outubro	116	19,3	$-3,58 \pm 1,43$	$-16,6 \pm 11,7$
Novembro	89,9	21,2	$-3,64 \pm 1,41$	$-19,2 \pm 11,0$
Dezembro	103,6	23,4	$-4,87 \pm 2,44$	$-28,9 \pm 19,8$

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da Global Network for Isotopes in Precipitation.

Para observar a dispersão dos valores foi gerado o diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ em relação à LMAL (Figura 21), sendo os poços separados pelos agrupamentos da AAH. O poço EXT01 foi identificado como “Extra”. Valores isotópicos obtidos por Ramage (Inédito) dos aquíferos do MPA foram plotados para fins de comparação.

Figura 21. Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ dos poços amostrados, plotados juntamente a valores de referência da Linha de Água Meteórica Local (LAML) e dados do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC) e Sistema Aquífero Granular Cenozoico (SAGC)



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa, dados da Linha de Água Meteórica Local (LAML) extraídos da Global Network of Isotopes in Precipitation e dados do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano (SAFPC) e Sistema Aquífero Granular Cenozoico (SAGC) obtidos de Ramage (Inédito).

Todos os valores estão próximos à LAML, semelhantes aos valores e incertezas históricos (Tabela 15), sem a ocorrência de tendências para além da reta. Isto aponta à possibilidade de que o cálculo de $\delta^2\text{H}$ dos poços que apresentaram problemas analíticos possa ser representativo do valor real. A distribuição dos dados indica que a principal fonte de recarga dos aquíferos é a água meteórica, com condições de recarga rápida, sem importantes processos de evaporação.

Os dados mostram que o único poço representativo do Agrupamento IV possui os valores isotópicos mais negativos. Isto aponta para a recarga a partir de água meteórica temporalmente distinta em relação a dos outros poços. Ao mesmo tempo, a integração com os dados hidrogeoquímicos (como a alta condutividade elétrica neste agrupamento), aponta maior tempo de residência para as águas do SAGC, relacionado com o fluxo mais lento neste aquífero em relação ao fraturado. Este fato

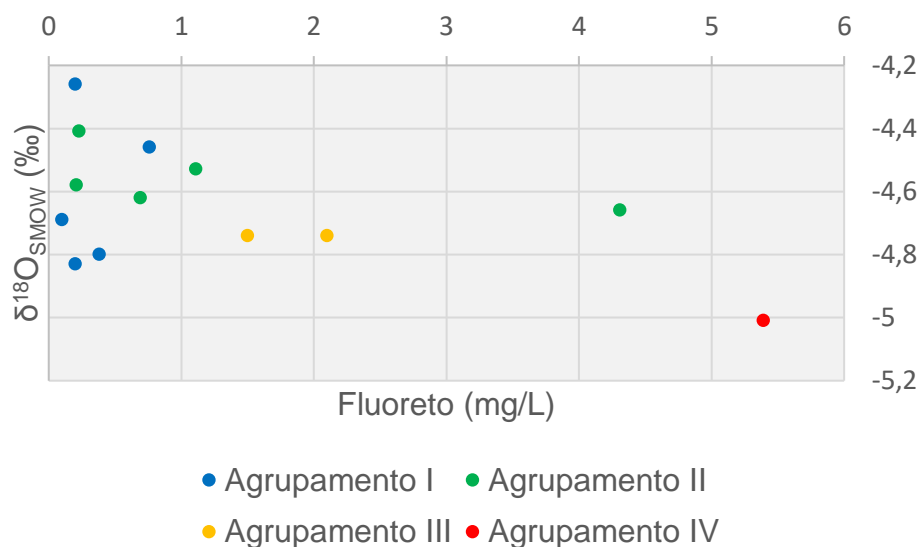
é decorrente da porosidade intergranular e da ocorrência de camadas argilosas (ROISENBERG *et al.*, 2002).

Nos agrupamentos de mistura, os poços do Agrupamento III se destacam por serem isotopicamente mais negativos em comparação ao Agrupamento II, sugerindo águas meteóricas de períodos distintos. Sendo o Agrupamento III mais influenciado pelo SAGC, pelos dados da ACP e AAH, e tendo em vista que um tempo maior de residência favorece a interação água-rocha e processos de misturas, os valores possivelmente são representativos de águas mais antigas em relação às do Agrupamento II.

O Agrupamento I possui assinaturas que abrangem os valores dos Agrupamentos II e III, o que sugere recargas meteóricas de tempos diferentes. Este fato indica que algumas de suas águas possuem um maior tempo de residência, embora não tenham características hidrogeoquímicas que apontem a misturas e interações água-rocha. Esta condição pode ser resultante da falta de conexões hidráulicas, o que é confirmado pela análise de lineamentos, já que estes poços se localizam em áreas com menor densidade de estruturas E-O (que condicionam de maneira significativa a hidrogeoquímica das águas no MPA). Por outro lado, os valores isotópicos mais elevados em relação ao Agrupamento IV sinalizam uma velocidade de fluxo mais rápida e um tempo de residência menor no SAFPC em comparação ao SAGC.

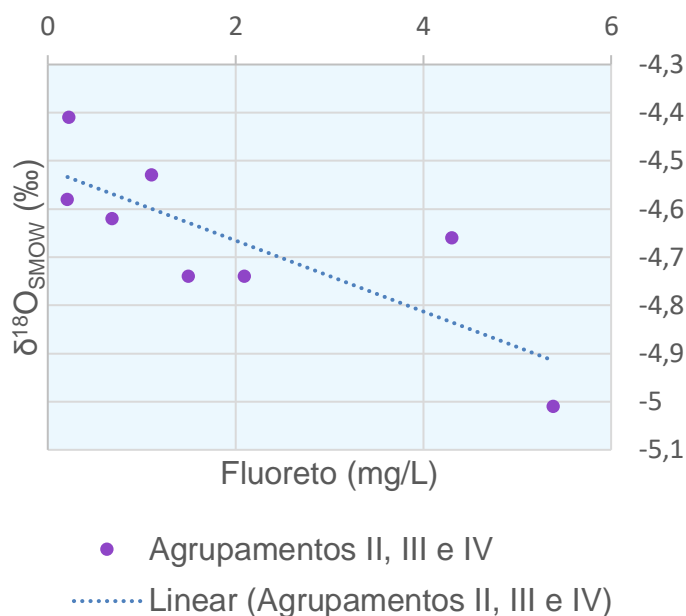
Para corroborar as interpretações sobre os tempos de residência, foi gerado um gráfico das concentrações de fluoreto vs. os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 22), baseando-se na ideia de que concentrações mais altas de fluoreto podem indicar um período mais longo de interação da água com o aquífero (RAO; DEVADAS, 2003; SAXENA; AHMED, 2003; KIM; JEONG, 2005). É possível observar que, com exceção do Agrupamento I, em que a ocorrência de estruturas correlacionadas com fluoreto é reduzida, conforme atestam os resultados hidrogeoquímicos e estruturais, existe uma tendência dos poços com valores isotópicos mais negativos possuírem as maiores concentrações de fluoreto, com um coeficiente de correlação de Pearson significativo, igual a -0,795 (Figura 23). Esta correspondência reforça a hipótese de que as diferenças nos períodos de recarga meteórica das águas subterrâneas dos Agrupamentos II, III e IV estão associadas a diferentes tempos de residência.

Figura 22 – Gráfico de fluoreto vs. $\delta^{18}\text{O}$ com os poços separados por agrupamento



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 23 – Gráfico de fluoreto vs. $\delta^{18}\text{O}$ nos Agrupamentos II, III e IV



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

4.2.2 Isótopos de Pb

A revisão bibliográfica realizada sobre isótopos de Pb em águas subterrâneas demonstrou que são escassos os trabalhos disponíveis sobre o assunto, não obstante a relevância que a questão possui, principalmente na caracterização de áreas contaminadas. Nos últimos anos, este tema tem sido objeto de crescente interesse, pois permite a caracterização da persistência de contaminantes, inclusive orgânicos,

nos vários compartimentos ambientais, denotando um importante papel do Pb como traçador de vários tipos de atividades antrópicas.

As análises de isótopos estáveis de Pb foram realizadas em 6 amostras de litologias do SAFPC e 12 amostras de água subterrânea, excluindo-se a amostra representativa do SAGC (PDU81) e a amostra sem o controle estatístico (EXT01). Não foi possível analisar todas as amostras, como inicialmente planejado, em razão de problemas no funcionamento do equipamento TIMS no LGI, acarretando tempo hábil para apenas uma rodada analítica. A capacidade do VG Sector 54 é de 20 amostras por vez, sendo que 2 foram padrões específicos para garantir a qualidade dos dados, e por isso, apenas 18 amostras puderam ser lidas.

Os resultados obtidos, mostrados na Tabela 16, foram utilizados para a geração de gráficos $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Figuras 24, 25 e 26), possibilitando a distinção de diferentes assinaturas isotópicas. As unidades granito-gnáissicas não foram individualizadas nos gráficos, tendo em vista que não foi observada uma relação específica de cada litologia com os agrupamentos.

Tabela 16 – Valores isotópicos de Pb nas diferentes litologias granito-gnáissicas da região de Porto Alegre, com as imprecisões analíticas

Código	Unidade	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
GP-1	Gnaisses Porto Alegre	40,3794	15,7870	20,0503	2,0141	0,7871
	Erro 2σ	0,01046	0,00415	0,00503	0,00005	0,00000
I-1	Granito Independência	39,5024	15,6911	19,3726	2,0391	0,8099
	Erro 2σ	0,00328	0,00133	0,00161	0,00002	0,00001
CG-1	Granito Canta Galo	38,1719	15,6312	19,6412	1,9434	0,7958
	Erro 2σ	0,00214	0,00091	0,00112	0,00002	0,00001
V-3	Granito Viamão	39,0911	15,7764	20,7152	1,8871	0,7616
	Erro 2σ	0,00469	0,00185	0,00244	0,00002	0,00001
S-1	Granito Santana	38,8460	15,6033	18,9342	2,0516	0,8241
	Erro 2σ	0,00276	0,00111	0,00127	0,00002	0,00001
PG-1	Granito Ponta Grossa	39,9616	15,7218	20,5847	1,9413	0,7677
	Erro 2σ	0,00364	0,00140	0,00167	0,00005	0,00001

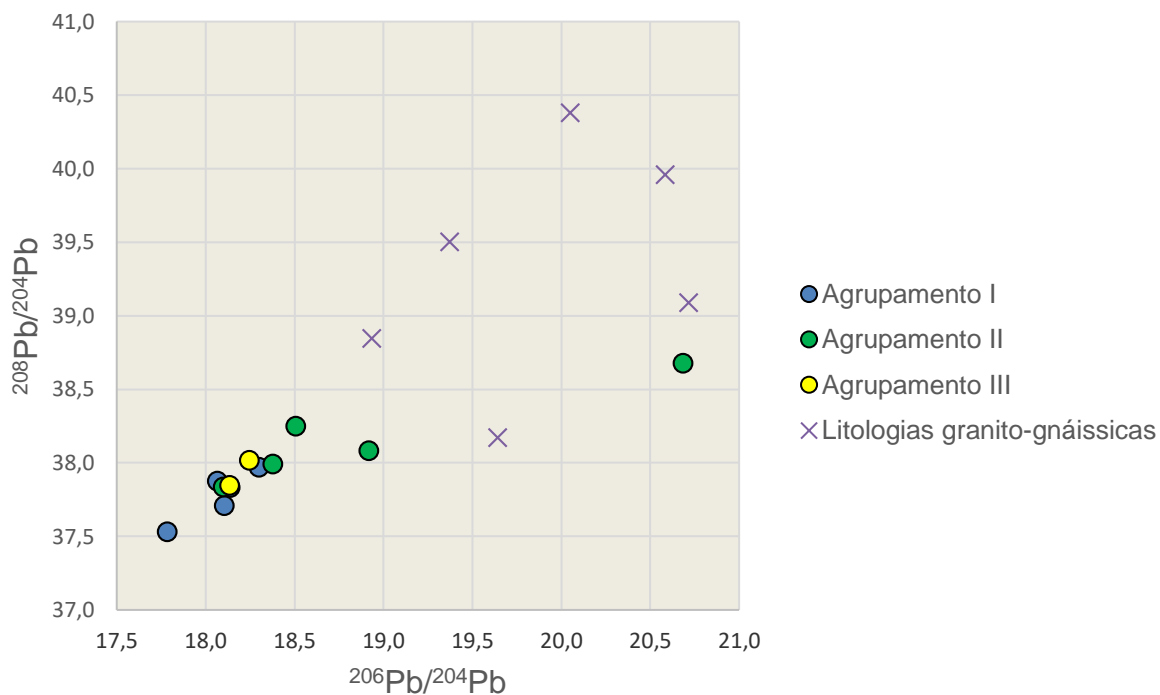
Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Tabela 17 – Valores isotópicos de Pb das amostras de água subterrânea identificadas por agrupamento e litologia da entrada de água, com as imprecisões analíticas

Código	Agrupamento	Litologia da entrada de água	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
PDU2	I	Granito Independência	37,9683	15,5632	18,2991	2,0748	0,8503
Erro 2σ			0,01773	0,00755	0,00869	0,00013	0,00006
PDU3	II	Granito Ponta Grossa	38,6753	15,7613	20,6863	1,8695	0,7619
Erro 2σ			0,01250	0,00511	0,00662	0,00008	0,00003
PDU28	I	Granito Viamão	37,8318	15,5446	18,1371	2,0861	0,8572
Erro 2σ			0,01340	0,00558	0,00649	0,00008	0,00003
PDU40	III	Granito Santana	38,0144	15,5733	18,2455	2,0835	0,8536
Erro 2σ			0,00688	0,00280	0,00328	0,00006	0,00002
PDU43	I	Granito Canta Galo	37,5312	15,5258	17,7850	2,1100	0,8729
Erro 2σ			0,01050	0,00421	0,00471	0,00007	0,00003
PDU56	I	Granito Santana	37,8749	15,5512	18,0663	2,0928	0,8609
Erro 2σ			0,01170	0,00477	0,00569	0,00007	0,00003
PDU62	II	Granito Santana	37,8343	15,5405	18,0997	2,0907	0,8589
Erro 2σ			0,01470	0,00623	0,00746	0,00009	0,00005
PDU67	III	Gnaisses Porto Alegre	37,8466	15,5481	18,1350	2,0870	0,8574
Erro 2σ			0,01290	0,00508	0,00611	0,00010	0,00005
PDU69	I	Granito Ponta Grossa	37,7084	15,5178	18,1062	2,0826	0,8570
Erro 2σ			0,01140	0,00455	0,00505	0,00013	0,00003
PDU84	II	Granito Viamão	37,9910	15,5329	18,3774	2,0673	0,8452
Erro 2σ			0,01420	0,00576	0,00662	0,00012	0,00004
SIA01	II	Granito Ponta Grossa	38,2465	15,6102	18,5062	2,0668	0,8435
Erro 2σ			0,00845	0,00331	0,00378	0,00012	0,00003
SIA02	II	Gnaisses Porto Alegre	38,0807	15,6223	18,9195	2,0126	0,8257
Erro 2σ			0,00617	0,00253	0,00274	0,00007	0,00002

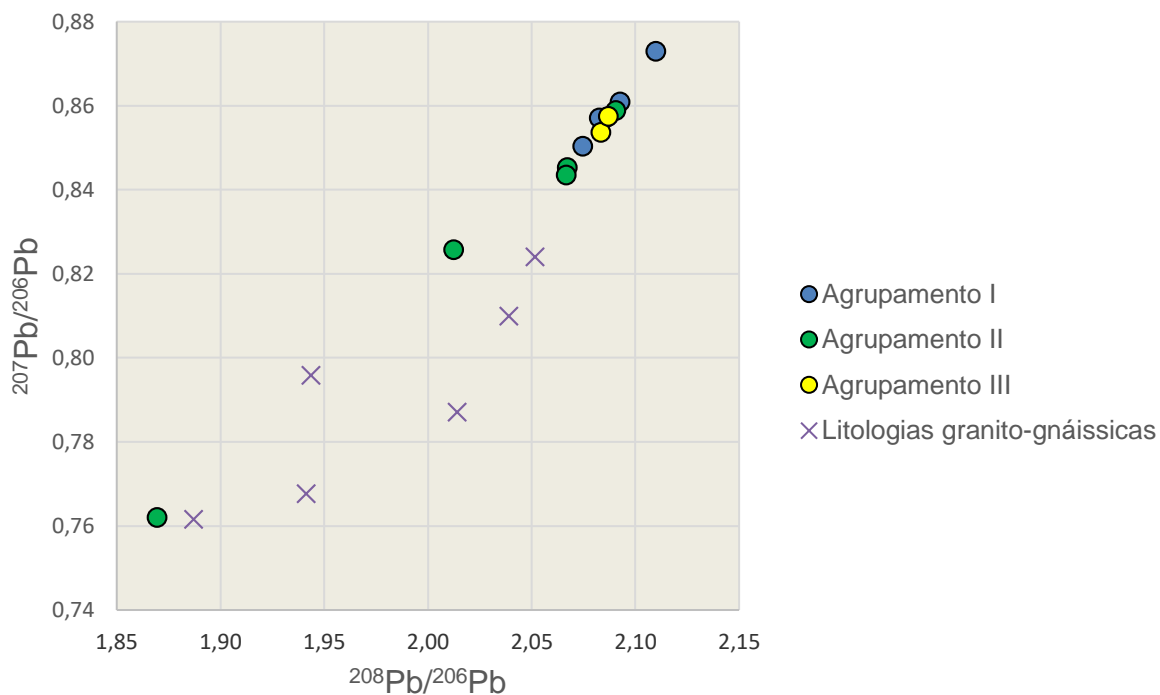
Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e com as informações referentes às litologias da entrada de água obtidas nos bancos de dados do Departamento Municipal de Água e Esgotos e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, bem como pela utilização do mapa geológico extraído de Hasenack *et al.* (2008).

Figura 24 – Gráfico $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas



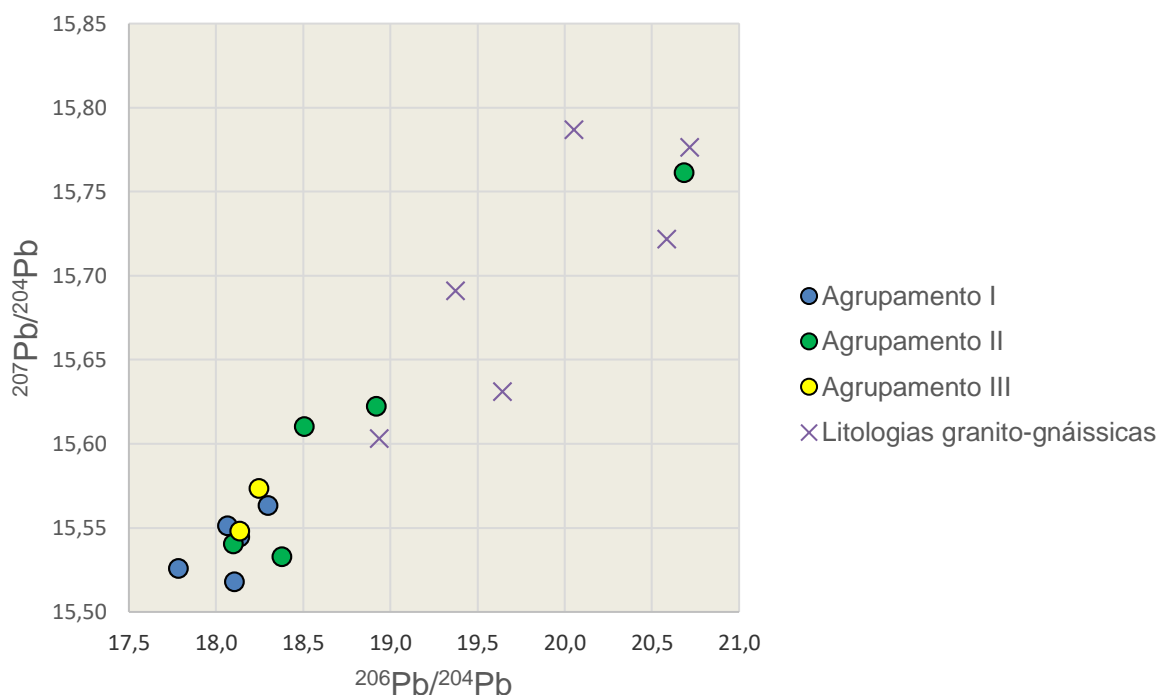
Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 25 – Gráfico $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Figura 26 – Gráfico $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

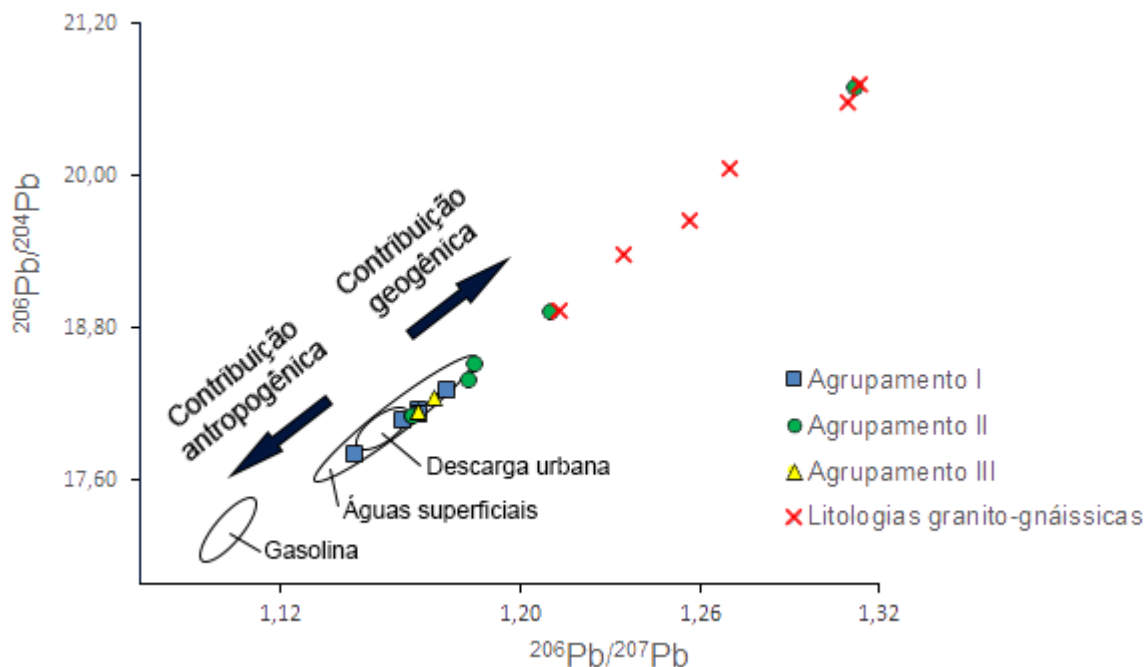
Os valores isotópicos variaram, nas amostras litológicas, de 38,17 a 40,38, de 15,60 a 15,79, de 18,93 a 20,71, de 1,89 a 2,05 e de 0,76 a 0,82, para $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, respectivamente. Já nas amostras de água subterrânea, as assinaturas variaram de 37,53 a 38,67, de 15,52 a 15,76, de 17,78 a 20,69, de 1,87 a 2,11 e de 0,76 a 0,87, para $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, respectivamente.

Em todos os gráficos, é possível observar a maior relação do Agrupamento II com as assinaturas das litologias granito-gnáissicas do SAFPC, enquanto o Agrupamento I apresenta os valores mais distanciados, e o Agrupamento III possui valores intermediários entre ambos.

De forma a correlacionar os valores isotópicos, foi utilizado o diagrama de Monna, Othman e Luck (1995), que mostra a distribuição isotópica de Pb ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) em vários compartimentos ambientais (Figura 27). Os valores de $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ foram calculados a partir dos resultados analíticos (Tabela 18). Neste gráfico, pode-se observar que, enquanto o Agrupamento II possui valores correspondentes ao Pb geogênico das litologias granito-gnáissicas, o Agrupamento I

apresenta relação com águas ligadas a processos superficiais, podendo estar influenciado por descargas urbanas, caracterizando a interferência antrópica.

Figura 27 – Diagrama $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dos agrupamentos e litologias granito-gnáissicas, com campos de compartimentos ambientais



Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e campos de compartimentos ambientais extraídos de Monna, Othman e Luck (1995).

Tabela 18 – Valores de $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ das amostras de rocha e água subterrânea.

Código	GP-1	I-1	CG-1	V-3	S-1	PG-1
$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	1,2700	1,2346	1,2565	1,3130	1,2135	1,3093
Código	PDU2	PDU3	PDU28	PDU40	PDU43	PDU56
$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	1,1758	1,3125	1,1668	1,1716	1,1455	1,1617
Código	PDU62	PDU67	PDU69	PDU84	SIA01	SIA02
$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	1,1647	1,1664	1,1668	1,1831	1,1855	1,2110

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

Os resultados do estudo estatístico de dados hidrogeoquímicos e da análise de isótopos de H e O demonstram que as águas subterrâneas dos Agrupamentos II e III devem apresentar maior interação água-rocha em comparação ao Agrupamento I, resultando em assinaturas de Pb mais geogênicas. Os resultados do Agrupamento II são condizentes com esta hipótese. O Agrupamento III, por outro lado, apresenta valores intermediários, podendo refletir uma maior relação com o SAGC, o que só

pode ser confirmado com análises mais detalhadas deste sistema, o que não foi contemplado nesta pesquisa por razões operacionais.

Os resultados do Agrupamento I, que possuem menor relação com as assinaturas geogênicas referentes às litologias do SAFPC, corroboram com os valores mais altos de nitrato encontrados na análise estatística para este grupo, como também a menor densidade de lineamentos E-O (que aparentam consistir nas conexões hidráulicas de maior relevância hidrogeoquímica do sistema), apontando à contribuição isotópica por processos superficiais com maior influência de atividades antropogênicas.

Variações de valores isotópicos de Pb nas águas subterrâneas, em particular de aquíferos graníticos, têm sido geralmente relacionadas com o intemperismo diferencial dos minerais que contém U e Th (MILLOT; NÉGREL, 2015). Esta causa pode explicar as variações nas observações em poços do Agrupamento II, com evidente controle geogênico. No restante dos poços, por outro lado, as variabilidades devem refletir a mistura de contribuições geogênicas e antropogênicas, em que mais de duas fontes são necessárias para explicar a variação dos dados (MILLOT; NÉGREL, 2015). De mesma forma, Lepitre *et al.* (2003) salienta que a assinatura isotópica de uma contaminação de Pb pode resultar da mistura de valores referentes a contaminantes de diversas origens.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise estatística processada a partir das informações hidrogeoquímicas cadastradas nos bancos de dados do DMAE e SIAGAS propiciaram um aprofundamento no entendimento dos controles litológicos e estruturais atuantes no meio hídrico subterrâneo do MPA. De maneira complementar, os isótopos ambientais, pela distinção de assinaturas isotópicas, possibilitaram reconhecer condições de recarga, tempos de residência relativos e consequentes intensidades de interação água-rocha, como também a observação de controles geogênicos e antropogênicos na água subterrânea.

Os componentes encontrados na ACP exibem as relações dos íons de maior concentração nas águas subterrâneas do MPA. As correlações mostram a influência dos constituintes minerais das formações sedimentares no SAGC, definidas pelas maiores concentrações de cloreto, magnésio, sódio, cálcio, sulfato e potássio. Também foi possível observar a interferência de minerais de origem secundária na química das águas, pelas concentrações de fluoreto e bicarbonato, que devem resultar da dissolução de fluorita e calcita em estruturas tectônicas.

Os agrupamentos hidrogeoquímicos definidos pela AAH são representativos dos diferentes aquíferos da área, como também às misturas entre eles. Enquanto o Agrupamento I indica águas relacionadas ao SAFPC, o Agrupamento IV é caracterizado por águas do SAGC. Os agrupamentos II e III correspondem a misturas entre os dois tipos de aquíferos, apresentando parâmetros hidrogeoquímicos intermediários.

O cálculo dos IS no modelamento hidrogeoquímico reforçou a hipótese da influência de diferentes compostos mineralógicos nas características químicas da água subterrânea do MPA. Fluorita e calcita mostram relação crescente do Agrupamento I ao III, apontando à influência de mineralizações destes minerais, enquanto dolomita e gipso possuem maior ligação com o Agrupamento IV, refletindo a mineralogia que compõem as formações sedimentares.

O estudo estatístico dos lineamentos tectônicos apontou à existência de controle estrutural nos valores dos parâmetros hidrogeoquímicos da água subterrânea. Os resultados sinalizaram que lineamentos E-O são os mais relevantes

em termos hidrogeoquímicos, por consistirem em conexões hidráulicas que promovem misturas entre o SAFPC e o SAGC, e também o aporte de fluoreto e bicarbonato a partir da dissolução de fluorita e calcita, respectivamente, presentes nestas estruturas. A densidade de estruturas E-O é crescente do Agrupamento I ao III, refletindo a possibilidade de maior controle geogênico nos Agrupamentos II e III, definido pelo enriquecimento em fluoreto, enquanto o Agrupamento I deve possuir maior influência dos processos superficiais, indicado pela presença de teores maiores de nitrato.

Os isótopos de H e O mostram variabilidades que podem estar ligadas a diferenças temporais na recarga, implicando em tempos de residência distintos. Estas variações temporais são associadas a diferentes intensidades de interação água-rocha, pela correlação com concentrações de fluoreto (resultante de processos de dissolução ligados a interações mais prolongadas), e a misturas entre os sistemas aquíferos (atestadas pela progressão de parâmetros hidrogeoquímicos), conforme observado nos Agrupamentos II, III e IV.

Os isótopos de Pb sugerem que o Agrupamento I possui as assinaturas isotópicas com menor controle geogênico em relação aos granitos e gnaisses que compõem o SAFPC, tendo maior influência de processos superficiais, em que contribuições antropogênicas são mais expressivas. O Agrupamento II, em contrapartida, possui valores condizentes com os valores das litologias do aquífero fraturado, denotando maior contribuição geogênica. O Agrupamento III, por fim, apresenta valores intermediários, que podem estar relacionados às misturas com o SAGC, faltando dados para desenvolver esta hipótese.

Os resultados indicam que as diferentes unidades granito-gnáissicas do SAFPC não imprimem características hidrogeoquímicas ou isotópicas específicas na água subterrânea, razão que justifica ser considerado como um conjunto heterogêneo. Esta falta de especificidade pode estar relacionada com a escassez de estudos de transporte/fluxo das águas subterrâneas em subsuperfície, isto é, as amostras tomadas dentro de uma litologia não necessariamente representam esta litologia, mas sim o conjunto de litologias atravessadas pelas águas durante seu percurso no aquífero.

Em relação ao comportamento químico, foi possível constatar diferenças nos diferentes agrupamentos. O Agrupamento I representa um conjunto mais sensível às atividades antropogênicas, como demonstram as maiores concentrações de nitrato, bem como as assinaturas isotópicas de Pb mais diferenciadas em relação às litologias que constituem o aquífero. Por outro lado, os poços dos Agrupamentos II, III e IV são mais susceptíveis a processos geogênicos mais profundos, apresentando enriquecimento em fluoreto, refletindo interação água-rocha mais prolongada, ligado ao maior tempo de residência.

A integração dos tratamentos estatísticos de dados hidrogeoquímicos com as análises de assinaturas isotópicas demonstrou que estes elementos podem constituir eficientes ferramentas para melhorar o conhecimento do SAFPC no MPA, contribuindo para os aspectos relacionados com sua gestão. Para diminuir o grau de incerteza dos resultados, recomenda-se a continuidade dos estudos, ampliando a base analítica de dados.

6. REFERÊNCIAS

- Abbott, M. D.; Lini, A.; Bierman, P. R. $\delta^{18}\text{O}$, δD and ^3H measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA. **Journal of Hydrology**, v. 228, n. 1, p. 101-112, 2000.
- Bouchard, D. C; Williams, M. K.; Surampalli, R. Y. Nitrate contamination of groundwater: sources and potential health effects. **Journal – American Water Works Association**, v. 84, n. 9, p. 85-90, 1992.
- Caxito, F. A.; Silva, A. V. Isótopos estáveis: fundamentos e técnicas aplicadas à caracterização e proveniência geográfica de produtos alimentícios. **Revista Geonomos**, v. 23, n. 1, 2015.
- Chihi, H.; De Marsily, G.; Belayouni, H.; Yahyaoui, H. Relationship between tectonic structures and hydrogeochemical compartmentalization in aquifers: Example of the “Jeffara de Medenine” system, south–east Tunisia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 410-430, 2015.
- Clark, I. D.; Fritz, P. **Environmental isotopes in hydrogeology**. CRC press, 1997.
- Cloutier, V.; Lefebvre, R.; Therrien, R.; Savard, M. M. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. **Journal of Hydrology**, v. 353, n. 3, p. 294-313, 2008.
- Craig, H. Isotopic variations in meteoric waters. **Science**, v. 133, n. 3465, p. 1702-1703, 1961.
- Cunha, G. G.; Roisenberg, A.; Pulgati, F. H.; Freitas, M. A. Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Noroeste do Rio Grande do Sul e sua relação espacial com a tectônica rúptil. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 1, p. 55-67, 2016
- Delaney, P. J. V. Fisiografia e geologia da superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul. 1965. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1965.
- Deutsch, W. J.; Siegel, R. **Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination**. CRC press, 1997.
- Faure, G. **Principles of Isotope Geology**. New York: John Wiley, 2. ed., 1986.
- Fernández, I.; Olías, M.; Cerón, J. C.; De la Rosa, J. Application of lead stable isotopes to the Guadiamar aquifer study after the mine tailings spill in Aznalcóllar (SW Spain). **Environmental Geology**, v. 47, n. 2, p. 197-204, 2005.
- Field, A. **Discovering Statistics Using SPSS (Introducing Statistical Methods)**. London: Sage Publications, 3. ed., 2005.
- Gat, J. R. **Isotope hydrology: a study of the water cycle**. World Scientific, 2010.

Gioia, S. M. C. L.; Pimentel, M. M.; Tessler, M.; Dantas, E. L.; Campos, J. E. G.; Guimarães, E. M.; Maruoka, M. T.; Nascimento, E. L. C. Sources of anthropogenic lead in sediments from an artificial lake in Brasília—central Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 356, n. 1, p. 125-142, 2006.

Hamouda, M. F. B.; Mamou, A.; Bejaoui, J.; Froehlich, K. Hydrochemical and isotopic study of groundwater in the North Djefara Aquifer, Gulf of Gabès, Southern Tunisia. **International Journal of Geosciences**, v. 4, n. 08, p. 1, 2013.

Hamzaoui-Azaza, F.; Bouhlila, R.; Gueddari, M. Geochemistry of fluoride and major ion in the groundwater samples of triassic aquifer (South Eastern Tunisia), through multivariate and hydrochemical techniques. **Journal of Applied Sciences Research**, v. 5, n. 11, p. 1941-1951, 2009.

Hasenack, H. *et al.* (Coord.). **Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Ambiente**, 84 p., 2008.

IBGE. **Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação com data de referência em 1º de Julho de 2006**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2016/estimativa_dou_2016_20160913.pdf>. Acesso em 28 out. 2016.

Jenness, J. 2014. **Polar plots for ArcGIS**. Jenness Enterprises. Disponível em: <http://www.jennessent.com/arcgis/polar_plots.htm>. Acesso em 10 jul. 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.

Kim, Y.; Kim, J. Y.; Kim, K. Geochemical characteristics of fluoride in groundwater of Gimcheon, Korea: lithogenic and agricultural origins. **Environmental Earth Sciences**, v. 63, n. 5, p. 1139-1148, 2011.

Kuhn, I. A.; Roisenberg, A. Combining lead isotopes and cluster analysis to distinguish the Guarani and Serra Geral Aquifer Systems and contaminated waters in a highly industrialized area in Southern Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 177, p. 24-31, 2017.

Kuznetsov, M.; Viero, A. P.; Sorek, S.; Roisenberg, A.; Ronen, D. Modeling the Flow Pattern at the Fractured Granites in Porto Alegre, Brazil. **Transport in Porous Media**, v. 01, p. 01-24, 2014.

Landmeyer, J. E.; Bradley, P. M.; Bullen, T. D. Stable lead isotopes reveal a natural source of high lead concentrations to gasoline-contaminated groundwater. **Environmental Geology**, v. 45, n. 1, p. 12-22, 2003.

Lepitre, M. E., Allen, D. M., Mortensen, J. K., Gabites, J. E. Differentiating sources of dissolved lead in mine waters using lead isotope techniques, Sullivan Mine, British Columbia. **Water resources research**, v. 39, n. 1, 2003.

Menegat, R.; Fernandes, L. A. D.; Koester, E.; Scherer, C. M. S. Porto Alegre antes do Homem: evolução geológica. In: **Atlas ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1998. p.11-24.

Midugno, R. **Análise geoquímica comparativa entre arroios do município de Porto Alegre e corpos d'água da bacia hidrográfica do Lago Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Millot, R.; Négrel, P. Lead Isotope Systematics in Groundwater: Implications for Source Tracing in Different Aquifer Types. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 13, p. 7-10, 2015.

Möbus, G. 2017. **QualiGraf v.1.17**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Fortaleza. Disponível em: <<http://www3.funceme.br/qualigraf/>>. Acesso em 06 nov. 2017.

Monna, F.; Othman, D. B.; Luck, J. M. Pb isotopes and Pb, Zn and Cd concentrations in the rivers feeding a coastal pond (Thau, southern France): constraints on the origin (s) and flux (es) of metals. **Science of the total environment**, v. 166, n. 1-3, p. 19-34, 1995.

Norrström, A. C.; Knutsson, G. Stable lead isotopes as tracers of groundwater pollution in the water supply for a small village. **Environmental Earth Sciences**, v. 67, n. 4, p. 1085-1095, 2012.

Parkhurst, D. L.; Appelo, C. A. J. 2013. **Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations**. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>>. Acesso em 06 nov. 2017.

Pauwels, H.; Foucher, J. C.; Kloppmann, W. Denitrification and mixing in a schist aquifer: influence on water chemistry and isotopes. **Chemical Geology**, v. 168, n. 3, p. 307-324, 2000.

Piper, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 25, n. 6, p. 914-928, 1944.

Philipp, R. P. **A Evolução Geológica e Tectônica do Batólito Pelotas, RS**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

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.; Nardi, L. V. S.; Machado, R. O magmatismo granítico Neoproterozóico tardi a pós-colisional da região de Porto Alegre, RS. **Contribuição ao Estudo de Granitos e Rochas Correlatas**, v.5, 1998.

Philipp, R. P.; Rêgo, I. T. S. F.; Siviero, R. S. Geologia das rochas granitóides da região de Porto Alegre, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Camburiú, **Boletim de resumos...** Camburiú: SBG, v. 2, p. 98-99, 1994.

Ramage, L. **Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Granular Cenozóico do Município de Porto Alegre, RS.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Ramage, L. **Stable isotopes of oxygen and hydrogen in groundwater of Porto Alegre region, southern Brazil.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, em andamento.

Rao, N. S.; Devadas, D. J. Fluoride incidence in groundwater in an area of Peninsular India. **Environmental Geology**, v. 45, n. 2, p. 243-251, 2003.

Révész, K.; Coplen, T. B. **Determination of the delta (18O/16O) of water: RSIL Lab Code 489.** US Geological Survey, 2008a.

Révész, K.; Coplen, T. B. **Determination of the delta (2H/1H) of water: RSIL Lab Code 1574.** US Geological Survey, 2008b.

Roisenberg, A. *et al.* (Coord). **Caracterização da qualidade das águas subterrâneas de Porto Alegre.** Relatório Final. Departamento Municipal de Água e Esgotos; Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.

Roisenberg, C. **Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Fraturado Pré-cambriano e qualidade das águas subterrâneas do Município de Porto Alegre, RS.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Roisenberg, C.; Viero, A. P.; Roisenberg, A.; Schwarzbach, M. S.; Morante, I. C. Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas Subterrâneas de Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 4, p. 137-147, 2003.

Sawatzky, D. L.; Raines, G. L.; Bonham-Carter, G. F.; Looney, C. G. 2009. **Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks.** Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/sdm/>>. Acesso em 05 jul. 2017.

Saxena, V.; 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.; Loss, E. L.; Pinto, J. F. 1974. **Mapa Geológico da Folha de Porto Alegre, RS.** Porto Alegre. 1 mapa. Escala 1:50.000.

Scozzari, A.; Dotsika, E. (Ed.). **Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control.** Springer, 2015.

Siegel, D. I.; Bickford, M. E.; Orrell, S. E. The use of strontium and lead isotopes to identify sources of water beneath the Fresh Kills landfill, Staten Island, New York, USA. **Applied geochemistry**, v. 15, n. 4, p. 493-500, 2000.

Stradioto, M. R.; Chang, H. K. Composição isotópica – $\delta^{18}\text{O}$ e δD – das águas do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo. **Geociências (São Paulo)**, v. 34, n. 3, p. 411-422, 2016.

Suk, H.; Lee, K. K. Characterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into ground water zones. **Groundwater**, v. 37, n. 3, p. 358-366, 1999.

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.

Toner, R.; Frost, C.; Chamberlain, K. Isotopic identification of natural vs. anthropogenic sources of Pb in Laramie basin groundwaters, Wyoming, USA. **Environmental Geology**, v. 43, n. 5, p. 580-591, 2003.

Vicini, L.; Souza, A. M. Análise multivariada da teoria à prática. **Santa Maria: UFSM, CCNE**, 2005.

Viero, A. P.; Roisenberg, C.; Roisenberg, A.; Vigo, A. 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**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1972.

Villwock, J. A. Geology of the coastal province of Rio Grande do Sul, southern Brazil. A synthesis. **Pesquisas**, v.16, p. 5-49, 1984.

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, n. 8, p. 1-45, 1995.

Villwock, J. A.; Tomazelli, L. J.; Loss, E. L.; Dehnhardt, E. A.; Horn Filho, N. O.; Bachi, F. A.; Dehnhardt, B. A. Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. In: **International symposium on sea-level changes and quaternary shorelines**, p. 79-97, 1986.

Werner, R. A.; Brand, W. A. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, v. 15, n. 7, p. 501-519, 2001.

Winston, R. B. 2000. **Graphical User Interface for MODFLOW, Version 4**. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-315, 27 p. Disponível em: <https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/GW_Chart/GW_Chart.html>. Acesso em 06 nov. 2017.

APÊNDICE A – Valor dos componentes principais, identificação dos agrupamentos, classificação de Piper e valor da densidade de lineamentos resultantes do tratamento estatístico dos poços selecionados

Código	Componente			Agrupamento	Fácies de Piper	Densidade de lineamentos (km/km ²)				
	1	2	3			Total	NO-SE	NE-SO	N-S	E-O
SIA01	-0,06090	-0,68686	-0,66764	II	Bicarbonatada magnesiana	2,77	0,91	0,62	0,32	0,85
SIA02	-0,09826	-0,80527	-0,22106	II	Bicarbonatada cálcica	4,00	1,73	1,18	0,43	0,58
SIA03	0,69572	-1,52581	0,26204	I	Mista sódica	0,53	0,00	0,00	0,00	0,53
SIA04	0,19686	-0,47281	-0,05768	II	Mista	0,57	0,00	0,00	0,00	0,57
SIA05	1,52116	-1,56988	0,40130	I	Mista	0,61	0,00	0,00	0,00	0,57
SIA06	0,07793	0,49288	0,68717	III	Bicarbonatada mista	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SIA07	-0,27827	1,56422	0,27819	III	Bicarbonatada sódica	2,05	0,83	0,64	0,31	0,26
SIA08	0,31374	-0,61049	1,64193	I	Bicarbonatada mista	5,69	2,26	2,29	0,69	0,40
SIA09	-0,44794	0,65294	0,71095	III	Bicarbonatada cálcica	5,54	1,42	1,56	1,45	1,11
SIA10	-0,48633	1,25824	0,15074	III	Bicarbonatada cálcica	4,57	2,37	0,97	0,62	0,63
SIA11	0,22861	1,39738	1,11492	III	Mista sódica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SIA12	4,11110	-0,26556	-0,81738	IV	Cloretada sódica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SIA13	-0,18820	1,62475	0,13806	III	Bicarbonatada cálcica	3,97	1,40	1,06	0,96	0,44
SIA14	-0,20961	-0,15833	-0,14975	II	Bicarbonatada sódica	3,89	1,42	1,22	1,00	0,15
SIA15	0,54780	0,30829	-3,99483	II	Bicarbonatada cálcica	5,09	2,23	0,51	0,92	1,25
SIA16	-0,12491	-0,56456	-0,21342	II	Bicarbonatada magnesiana	0,76	0,18	0,17	0,08	0,29
SIA17	1,20381	-0,51335	-0,94863	II	Cloretada cálcica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

SIA18	0,03644	0,98868	-0,04300	III	Bicarbonatada magnesiana	5,23	2,10	0,58	1,30	1,26
SIA19	0,69021	-0,13570	-0,75343	II	Cloretada sódica	0,50	0,00	0,00	0,00	0,49
SIA20	-0,50255	0,55244	-0,23581	III	Bicarbonatada sódica	4,19	1,67	0,82	0,69	0,87
SIA21	-0,30815	0,28321	-0,22129	III	Bicarbonatada sódica	4,19	1,67	0,93	0,69	0,87
PDU2	-0,05829	-1,87078	0,96860	I	Cloretada mista	3,74	1,84	0,89	0,56	0,46
PDU3	-0,62751	0,59985	-0,95259	II	Bicarbonatada sódica	1,68	0,91	0,38	0,34	0,11
PDU7	0,31220	1,67767	0,36713	III	Bicarbonatada cálcica	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
PDU10	-0,30788	-0,32566	0,14577	II	Bicarbonatada mista	4,34	2,39	0,27	0,69	0,99
PDU11	-0,56537	0,78860	0,24816	III	Bicarbonatada sódica	4,45	1,48	0,82	0,49	1,40
PDU12	-0,45265	1,22092	0,55615	III	Bicarbonatada mista	7,40	2,99	1,17	1,54	1,62
PDU14	-0,68118	1,41480	0,59551	III	Bicarbonatada cálcica	5,74	1,86	1,42	1,37	0,89
PDU15	-0,13808	-1,91019	0,75573	I	Bicarbonatada sódica	1,73	0,59	0,67	0,27	0,23
PDU16	0,72162	0,21734	-0,41457	II	Bicarbonatada sódica	2,78	1,05	0,54	0,91	0,26
PDU17	-0,33454	-0,86396	-2,31285	II	Cloretada sódica	2,13	1,23	0,21	0,45	0,19
PDU18	-0,17062	1,69425	0,63936	III	Bicarbonatada sódica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PDU22	-0,30777	-0,80516	0,52016	I	Mista sódica	4,51	2,47	0,37	1,56	0,12
PDU23	-0,09389	0,38877	-0,01067	III	Bicarbonatada mista	5,29	1,77	1,00	1,67	0,79
PDU24	-0,80702	1,46382	0,64256	III	Bicarbonatada sódica	1,52	0,34	0,19	0,36	0,62
PDU28	-0,65976	-0,78492	0,44229	I	Bicarbonatada sódica	4,42	1,54	1,18	0,48	1,23
PDU29	-0,47137	-0,74548	-2,54248	II	Bicarbonatada sódica	3,81	1,68	1,16	0,49	0,48
PDU31	-0,49715	0,51605	-0,65460	II	Bicarbonatada mista	3,11	1,27	1,21	0,06	0,58
PDU32	-0,68094	-0,29923	-0,68269	II	Bicarbonatada sódica	7,17	2,05	1,71	1,27	1,99
PDU34	0,39798	-0,29627	-0,55546	II	Bicarbonatada sódica	0,76	0,06	0,13	0,14	0,44
PDU37	5,39269	0,30754	0,52729	IV	Cloretada sódica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PDU38	0,59320	0,64004	0,31772	III	Mista	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

PDU39	-0,41469	-1,26539	0,39640	I	Bicarbonatada mista	2,66	1,57	0,48	0,47	0,14
PDU40	-0,56389	0,14629	0,05459	III	Bicarbonatada mista	5,72	3,19	1,00	0,70	0,82
PDU41	-0,63836	-0,39485	-0,40832	II	Bicarbonatada sódica	2,52	0,87	0,82	0,32	0,52
PDU43	-0,65564	-0,95068	0,40747	I	Mista sódica	4,29	1,22	0,91	0,58	1,57
PDU44	-0,33438	1,07233	0,26930	III	Bicarbonatada mista	4,18	1,97	0,27	1,14	0,90
PDU47	-0,23522	-1,29379	0,63310	I	Bicarbonatada mista	4,25	1,39	1,63	0,98	0,25
PDU48	-0,71477	0,20332	0,57501	III	Bicarbonatada sódica	2,53	0,87	0,69	0,91	0,07
PDU51	-0,74971	0,83010	0,18529	III	Bicarbonatada sódica	2,74	1,00	0,61	1,12	0,06
PDU55	-0,55195	-0,31049	-0,38246	II	Bicarbonatada mista	1,42	0,69	0,15	0,38	0,22
PDU56	-0,38322	-0,46937	0,98534	I	Bicarbonatada mista	4,53	1,80	1,43	0,88	0,58
PDU59	-0,37235	0,32177	-1,62543	II	Bicarbonatada mista	4,66	1,52	1,02	1,87	0,24
PDU61	-0,37366	-0,18609	0,37427	II	Bicarbonatada mista	4,31	2,09	0,58	0,80	0,88
PDU62	-0,19869	-0,74590	-0,14976	II	Bicarbonatada sódica	3,02	0,91	0,78	0,79	0,63
PDU64	-0,44772	-0,71073	0,36070	I	Bicarbonatada sódica	2,15	0,65	0,13	0,77	0,50
PDU65	0,44901	0,44754	0,19236	III	Bicarbonatada sódica	2,02	0,62	1,13	0,25	0,00
PDU66	-0,54727	1,81866	1,52063	III	Bicarbonatada sódica	2,37	1,11	0,00	0,11	1,19
PDU67	-0,60949	0,62131	1,22022	III	Bicarbonatada mista	4,18	2,44	0,97	0,49	0,28
PDU68	0,17124	0,97227	-1,11967	II	Mista sódica	0,67	0,50	0,00	0,00	0,00
PDU69	0,36023	-1,94295	2,34690	I	Bicarbonatada mista	2,13	0,76	0,44	0,67	0,22
PDU71	-0,23053	1,54082	1,40377	III	Bicarbonatada sódica	0,10	0,00	0,00	0,11	0,00
PDU72	0,25848	-2,70789	2,77551	I	Mista	3,64	1,59	1,18	0,59	0,28
PDU73	-0,50368	1,20155	0,32086	III	Bicarbonatada cálcica	6,28	2,03	1,78	0,94	1,58
PDU74	-0,74101	-0,30847	-0,65256	II	Bicarbonatada sódica	7,31	1,72	1,94	1,34	2,25
PDU75	-0,55689	-0,00262	-1,65073	II	Bicarbonatada sódica	0,96	0,27	0,22	0,51	0,00
PDU77	-0,62004	-0,93465	0,13252	I	Bicarbonatada sódica	2,64	1,21	0,91	0,25	0,34
PDU78	-0,64238	-0,96738	0,11944	I	Bicarbonatada sódica	0,88	0,71	0,00	0,00	0,00

PDU81	2,59587	1,88101	0,77632	IV	Cloretada sódica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PDU82	-0,56758	-0,15454	-0,86011	II	Bicarbonatada sódica	2,70	1,16	0,17	0,75	0,63
PDU83	-0,80302	-0,45789	0,43173	I	Bicarbonatada mista	5,78	1,43	1,62	2,27	0,40
PDU84	-0,67567	-0,56732	-0,57299	II	Bicarbonatada sódica	4,64	2,18	1,41	0,58	0,44
PDU85	-0,15985	-0,74561	-0,26800	II	Mista sódica	0,61	0,00	0,00	0,00	0,62
PDU86	1,21197	1,18586	0,55205	III	Cloretada sódica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PDU87	-0,09133	-0,00546	-1,81911	II	Bicarbonatada sódica	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00
PDU88	-0,13226	0,63506	0,12726	III	Mista	1,03	0,67	0,22	0,00	0,09
PDU89	-0,58316	-0,35638	-0,83311	II	Bicarbonatada sódica	0,75	0,20	0,00	0,44	0,12
PDU90	2,21281	-0,52691	-0,74369	II	Cloretada sódica	0,84	0,61	0,00	0,00	0,00
PDU91	0,00263	-0,75922	-0,99852	II	Cloretada sódica	0,97	0,73	0,00	0,00	0,00
PDU92	-0,64575	-0,95571	0,26151	I	Bicarbonatada sódica	5,96	1,38	2,28	1,38	0,88

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

APÊNDICE B – Valores dos índices de saturação para fluorita, calcita, dolomita e gipso dos poços selecionados para a pesquisa

Código	Índice de Saturação			
	Fluorita	Calcita	Dolomita	Gipso
SIA01	-2,25	-3,13	-5,08	-4,57
SIA02	-2,63	-1,71	-3,95	-3,85
SIA03	-2,29	-2,23	-4,33	-2,42
SIA04	-1,57	-1,49	-2,92	-2,23
SIA05	-1,24	-1,39	-2,61	-2,14
SIA06	-1,20	0,30	0,00	-2,53
SIA07	-0,31	-0,50	-2,33	-2,76
SIA08	-1,03	-0,72	-1,86	-2,54
SIA09	-0,68	-0,14	-0,78	-3,56
SIA10	-0,35	-0,51	*	-2,74
SIA11	-0,09	-0,02	-0,32	-2,25
SIA12	-0,26	-1,15	-2,33	-2,37
SIA13	-0,06	-0,57	-2,03	-2,27
SIA14	-1,71	-0,27	-1,06	-2,91
SIA15	-0,40	-1,53	-2,95	-2,62
SIA16	-2,26	-1,71	-2,96	-3,81
SIA17	*	-1,80	-3,82	-2,24
SIA18	-0,33	-1,10	-1,93	-3,16
SIA19	*	-2,09	-3,93	-3,61
SIA20	-0,81	-1,12	-2,41	-3,39
SIA21	-1,12	-1,08	-2,26	-3,29
PDU2	-3,14	-2,43	-4,74	-3,48
PDU3	-0,90	-2,43	-4,66	-3,44
PDU7	0,09	-0,24	-1,20	-1,79
PDU10	-1,58	-1,60	-3,25	-2,86
PDU11	-0,73	-0,79	-1,71	-3,38
PDU12	-0,33	-0,63	-1,63	-3,24
PDU14	-0,09	-0,22	-1,12	-3,14
PDU15	-3,30	-2,49	-5,20	-3,54
PDU16	-2,30	-1,54	-3,31	-2,02
PDU17	-3,41	-2,91	-5,80	-3,76
PDU18	0,02	-0,03	-0,68	-2,39
PDU22	-2,19	-2,43	-5,10	-2,90
PDU23	-1,21	-1,52	-3,32	-2,51
PDU24	-0,26	0,09	-0,47	-3,43

Código	Índice de Saturação			
	Fluorita	Calcita	Dolomita	Gipso
PDU28	-3,66	-3,14	-6,52	-3,83
PDU29	-3,40	-2,87	-5,89	-3,79
PDU31	-0,76	-0,52	-1,40	-3,27
PDU32	-2,25	-1,91	-4,04	-3,64
PDU34	-1,62	-1,54	-3,17	-2,74
PDU37	-0,05	-0,26	-0,60	-1,42
PDU38	-0,30	-0,23	-0,66	-2,13
PDU39	-1,93	-2,06	-4,07	-3,47
PDU40	-1,22	-1,48	-3,28	-3,39
PDU41	-2,92	-2,48	-4,97	-3,67
PDU43	-5,06	-3,52	-6,66	-4,25
PDU44	-0,33	-0,74	-1,87	-2,71
PDU47	-3,45	-2,13	-4,41	-3,28
PDU48	-1,09	-1,04	-2,25	-3,15
PDU51	-0,29	-1,26	-2,90	-3,45
PDU55	-1,76	-1,72	-3,58	-3,51
PDU56	-2,44	-1,71	-3,82	-2,80
PDU59	-1,09	-0,65	-1,65	-3,22
PDU61	-3,47	-1,80	-3,77	-2,91
PDU62	-1,97	-1,61	-3,18	-3,47
PDU64	-1,15	-1,83	-3,62	-3,59
PDU65	-1,10	-1,02	-2,22	-2,24
PDU66	-0,01	0,10	-0,23	-3,21
PDU67	-0,75	-0,76	-1,83	-3,22
PDU68	-0,62	-1,56	-3,01	-2,69
PDU69	-1,79	-2,21	-4,27	-2,72
PDU71	-0,23	-0,08	-0,49	-2,57
PDU72	-3,30	-2,75	-5,17	-2,95
PDU73	-0,28	-0,44	-1,49	-3,08
PDU74	-2,06	-2,33	-5,15	-3,68
PDU75	-1,69	-2,14	-4,36	-3,82
PDU77	-4,01	-2,75	-5,76	-3,80
PDU78	-3,45	-2,95	-6,13	-3,88
PDU81	0,08	-0,09	-0,56	-1,87
PDU82	-1,53	-1,53	-3,37	-3,45
PDU83	-3,31	-2,62	-5,37	-3,82
PDU84	-3,30	-2,65	-5,53	-3,73
PDU85	-1,72	-2,32	-4,73	-3,12

Código	Índice de Saturação			
	Fluorita	Calcita	Dolomita	Gipso
PDU86	0,26	-0,07	-1,07	-2,44
PDU87	-2,01	-1,61	-3,69	-3,07
PDU88	-0,47	0,11	-0,21	-3,06
PDU89	-2,38	-2,07	-4,43	-3,52
PDU90	-1,57	-1,66	-3,59	-2,45
PDU91	-3,78	-2,64	-5,20	-2,79
PDU92	-4,20	-3,17	-6,45	-3,97

Legenda – *Dados hidrogeoquímicos insuficientes para o cálculo.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa.

ANEXO A – Dados de identificação e localização dos poços de água subterrânea selecionados para a pesquisa

Fonte	Número SIAGAS	Código	UTM N-S	UTM E-O
SIAGAS	4300001442	SIA01	6.667.559	476.445
SIAGAS	4300016787	SIA02	6.676.509	483.895
SIAGAS	4300017157	SIA03	6.677.955	478.698
SIAGAS	4300017330	SIA04	6.677.734	478.657
SIAGAS	4300017331	SIA05	6.677.788	478.840
SIAGAS	4300018100	SIA06	6.682.769	490.199
SIAGAS	4300018108	SIA07	6.675.045	481.807
SIAGAS	4300018110	SIA08	6.677.548	481.359
SIAGAS	4300018112	SIA09	6.667.883	477.974
SIAGAS	4300018118	SIA10	6.668.575	479.470
SIAGAS	4300018119	SIA11	6.683.134	489.650
SIAGAS	4300018124	SIA12	6.683.580	489.353
SIAGAS	4300021968	SIA13	6.678.466	487.409
SIAGAS	4300021974	SIA14	6.679.160	482.844
SIAGAS	4300023520	SIA15	6.668.828	478.520
SIAGAS	4300024573	SIA16	6.657.650	484.885
SIAGAS	4300024576	SIA17	6.682.025	478.020
SIAGAS	4300024603	SIA18	6.668.900	478.300
SIAGAS	4300025283	SIA19	6.676.770	477.800
SIAGAS	4300025284	SIA20	6.676.129	486.207

Fonte	Número SIAGAS	Código	UTM N-S	UTM E-O
SIAGAS	4300025323	SIA21	6.676.124	486.207
DMAE	*	PDU2	6.676.706	481.383
DMAE	*	PDU3	6.674.814	481.442
DMAE	*	PDU7	6.680.215	480.490
DMAE	*	PDU10	6.671.920	481.089
DMAE	*	PDU11	6.675.731	486.436
DMAE	*	PDU12	6.670.531	485.217
DMAE	*	PDU14	6.668.052	478.320
DMAE	*	PDU15	6.673.751	477.514
DMAE	*	PDU16	6.679.957	485.998
DMAE	*	PDU17	6.680.535	490.658
DMAE	*	PDU18	6.682.781	488.797
DMAE	*	PDU22	6.665.476	490.489
DMAE	*	PDU23	6.667.454	490.091
DMAE	*	PDU24	6.663.395	482.166
DMAE	*	PDU28	6.672.642	486.883
DMAE	*	PDU29	6.665.352	488.330
DMAE	*	PDU31	6.671.076	478.427
DMAE	*	PDU32	6.669.428	484.421
DMAE	*	PDU34	6.678.305	479.070
DMAE	*	PDU37	6.682.045	481.178
DMAE	*	PDU38	6.676.178	478.640

Fonte	Número SIAGAS	Código	UTM N-S	UTM E-O
DMAE	*	PDU39	6.674.071	484.223
DMAE	*	PDU40	6.671.379	482.195
DMAE	*	PDU41	6.658.383	485.257
DMAE	*	PDU43	6.658.202	494.409
DMAE	*	PDU44	6.669.299	478.024
DMAE	*	PDU47	6.677.741	483.379
DMAE	*	PDU48	6.680.888	485.375
DMAE	*	PDU51	6.674.483	479.372
DMAE	*	PDU55	6.675.936	480.898
DMAE	*	PDU56	6.673.924	485.574
DMAE	*	PDU59	6.667.890	484.572
DMAE	*	PDU61	6.664.283	492.296
DMAE	*	PDU62	6.672.158	480.060
DMAE	*	PDU64	6.665.043	479.729
DMAE	*	PDU65	6.680.436	483.772
DMAE	*	PDU66	6.669.798	476.045
DMAE	*	PDU67	6.678.043	484.257
DMAE	*	PDU68	6.681.948	488.153
DMAE	*	PDU69	6.674.657	480.704
DMAE	*	PDU71	6.675.745	479.099
DMAE	*	PDU72	6.667.180	479.037
DMAE	*	PDU73	6.670.010	485.472

Fonte	Número SIAGAS	Código	UTM N-S	UTM E-O
DMAE	*	PDU74	6.667.461	482.641
DMAE	*	PDU75	6.660.426	487.354
DMAE	*	PDU77	6.680.800	489.376
DMAE	*	PDU78	6.681.730	488.967
DMAE	*	PDU81	6.683.977	483.066
DMAE	*	PDU82	6.669.674	477.063
DMAE	*	PDU83	6.668.359	484.297
DMAE	*	PDU84	6.667.853	486.165
DMAE	*	PDU85	6.660.666	478.175
DMAE	*	PDU86	6.656.207	494.578
DMAE	*	PDU87	6.653.169	486.460
DMAE	*	PDU88	6.657.521	489.727
DMAE	*	PDU89	6.658.250	486.464
DMAE	*	PDU90	6.656.836	490.251
DMAE	*	PDU91	6.656.855	490.219
DMAE	*	PDU92	6.668.651	483.607

Legenda – *Não se aplica.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e dados do Departamento Municipal de Água e Esgotos e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.

ANEXO B – Dados de condutividade elétrica, dureza, pH, concentrações iônicas e tipo de aquífero dos poços selecionados

Nome	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	pH	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	F ⁻	Mg ⁺⁺	NO ₃ ⁻	SiO ₂	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	Tipo de aquífero
SIA01	95	64	6,5	2,4	14,2	1,11	16,7	0,9	50	1,9	*	*	48,80	0,01	Fraturado
SIA02	280	78	6,7	24,0	38,1	0,23	4,2	2,9	*	1,1	15	5	69,53	0,02	Fraturado
SIA03	129	96	6,5	17,0	46,1	0,44	12,6	20,9	*	48,6	47	7	52,88	0,01	Fraturado
SIA04	323	71	7,0	25,4	34,1	0,82	16,3	13,2	*	50,7	15	2	72,05	0,04	Fraturado
SIA05	414	176	7,0	28,5	45,7	1,18	24,4	13,6	*	60,6	19	12	97,01	0,05	Fraturado
SIA06	415	128	8,3	39,4	56,1	1,01	7,0	8,8	27	17,2	50	*	187,99	1,66	*
SIA07	322	127	7,6	20,0	14,4	3,90	0,7	0,8	*	18,3	95	*	206,46	0,39	Fraturado
SIA08	232	96	7,6	27,2	11,7	1,41	6,5	6,5	6	20,9	25	10	113,81	0,19	Fraturado
SIA09	290	97	8,0	29,0	7,8	2,00	6,1	0,0	23	1,8	19	3	144,82	0,66	Fraturado
SIA10	234	57	7,5	34,9	11,4	2,73	0,0	0,7	*	10,6	36	2	184,11	0,25	Fraturado
SIA11	687	141	8,1	35,0	91,0	4,00	12,4	*	18	40,0	90	2	164,18	0,94	Fraturado
SIA12	1.598	405	7,0	83,2	524,1	2,55	45,8	0,3	*	20,7	305	10	149,66	0,06	Fraturado
SIA13	388	105	7,3	63,7	22,5	2,97	6,3	2,2	*	20,2	34	0	186,32	0,17	Fraturado
SIA14	192	67	8,1	20,0	11,3	0,74	3,9	1,7	*	11,4	33	4	116,95	0,63	Fraturado
SIA15	260	98	7,5	29,6	10,6	2,80	17,4	0,1	156	16,5	*	*	160,91	0,23	Fraturado
SIA16	*	66	7,1	8,0	7,5	0,60	13,2	*	*	3,2	*	*	91,47	0,05	Fraturado
SIA17	*	350	7,3	76,0	160,0	0,00	20,7	*	60	20,4	*	*	103,65	0,10	*
SIA18	290	114	7,2	17,2	16,3	4,00	20,5	0,3	47	8,0	*	*	163,42	0,12	Fraturado
SIA19	819	79	6,8	14,0	182,0	*	11,2	*	59	4,0	133	5	130,52	0,04	Poroso

Nome	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	Dureza (mg/L de CaCO_3)	pH	Ca^{++}	Cl^-	F^-	Mg^{++}	NO_3^-	SiO_2	SO_4^{--}	Na^+	K^+	HCO_3^-	CO_3^{--}	Tipo de aquífero
SIA20	289	76	7,2	18,0	9,0	2,20	7,5	*	51	4,2	36	1	134,15	0,10	Fraturado
SIA21	320	74	7,3	16,8	28,0	1,60	8,0	*	49	5,8	46	2	135,35	0,12	Fraturado
PDU2	239	61	6,4	12,2	26,7	0,20	7,2	36,4	33	5,0	19	5	29,52	0,00	Fraturado
PDU3	230	22	6,9	3,6	13,4	4,31	2,7	5,4	76	17,0	35	1	70,38	0,03	Fraturado
PDU7	646	168	7,7	55,8	39,3	3,91	7,2	0,0	41	74,0	45	2	178,99	0,41	Poroso
PDU10	301	86	7,0	15,6	20,3	0,98	7,7	16,7	43	17,0	28	2	97,82	0,04	Fraturado
PDU11	302	82	7,6	15,3	20,2	2,59	7,0	0,5	34	5,0	33	1	131,51	0,24	Fraturado
PDU12	361	106	7,5	22,3	11,5	3,49	6,7	1,0	33	5,0	35	3	176,27	0,26	Fraturado
PDU14	284	94	7,9	27,1	5,5	4,06	3,9	0,2	33	5,0	17	2	154,63	0,56	Fraturado
PDU15	188	39	6,2	10,0	10,2	0,20	2,7	39,6	45	5,0	14	6	48,43	0,00	Fraturado
PDU16	379	98	6,6	20,3	6,5	0,41	8,0	0,8	56	110,0	49	5	197,62	0,04	Fraturado
PDU17	194	31	6,4	5,3	38,1	0,72	2,5	0,1	97	5,0	17	2	27,57	0,00	Poroso
PDU18	632	118	8,0	35,3	46,6	4,32	5,8	0,0	32	26,0	60	2	181,33	0,83	Poroso
PDU22	182	37	6,8	10,8	22,5	0,55	2,9	0,2	20	19,0	16	4	28,67	0,01	Fraturado
PDU23	380	124	6,7	28,6	31,1	1,13	9,7	0,2	39	22,0	19	3	151,75	0,03	Fraturado
PDU24	272	43	8,5	13,2	6,3	4,78	1,9	0,2	32	5,0	42	2	133,63	1,90	Fraturado
PDU28	76	25	6,1	4,1	7,5	0,20	1,0	0,0	20	5,0	7	3	29,65	0,00	Fraturado
PDU29	109	21	6,8	4,7	7,8	0,20	1,5	0,0	103	5,0	16	2	53,43	0,02	Fraturado
PDU31	250	72	7,8	19,3	9,4	2,21	4,9	0,1	60	5,0	17	2	127,05	0,37	Fraturado
PDU32	121	27	7,1	6,9	7,1	0,63	2,0	0,0	52	5,0	16	1	63,66	0,04	Fraturado
PDU34	447	85	6,7	18,7	41,2	0,88	9,3	3,2	60	20,0	41	7	166,51	0,04	Poroso

Nome	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Dureza (mg/L de CaCO_3)	pH	Ca^{++}	Cl^-	F^-	Mg^{++}	NO_3^-	SiO_2	SO_4^{--}	Na^+	K^+	HCO_3^-	CO_3^{--}	Tipo de aquífero
PDU37	3.160	565	7,7	125,8	495,6	2,80	63,6	0,0	10	143,0	282	9	172,66	0,40	Poroso
PDU38	671	142	8,0	37,6	103,9	3,02	13,9	0,0	33	49,0	62	4	123,76	0,57	Poroso
PDU39	247	56	6,9	12,7	8,1	0,72	6,9	45,8	56	5,0	17	2	66,96	0,02	Fraturado
PDU40	238	54	7,0	14,0	11,0	1,50	3,8	2,7	39	5,0	17	2	107,58	0,05	Fraturado
PDU41	170	36	6,6	6,8	14,3	0,30	3,4	4,2	46	5,0	17	1	73,31	0,01	Fraturado
PDU43	84	15	6,3	1,6	10,6	0,10	1,7	6,5	24	5,0	14	3	24,03	0,00	Fraturado
PDU44	374	119	7,3	31,2	11,8	2,98	8,5	7,2	44	13,0	22	2	181,93	0,17	Fraturado
PDU47	240	94	6,5	21,0	28,7	0,10	7,8	44,4	47	5,0	17	2	84,54	0,01	Fraturado
PDU48	162	42	7,8	9,8	13,2	2,08	3,6	2,0	23	12,0	18	1	66,51	0,19	Poroso
PDU51	188	45	7,4	12,0	10,4	4,71	2,6	6,6	48	5,0	23	2	82,42	0,10	Fraturado
PDU55	183	47	7,0	10,4	11,7	0,93	3,8	9,8	53	5,0	18	2	87,21	0,04	Fraturado
PDU56	184	47	7,0	13,4	6,5	0,38	3,1	2,2	10	20,0	16	4	75,50	0,03	Fraturado
PDU59	230	79	7,6	21,8	7,3	1,43	5,3	0,0	85	5,0	16	2	139,67	0,26	Fraturado
PDU61	208	91	6,5	18,9	17,0	0,10	7,9	4,8	26	12,0	13	2	113,57	0,02	Fraturado
PDU62	220	70	7,1	12,2	20,1	0,69	6,8	12,9	49	5,0	27	4	82,57	0,05	Fraturado
PDU64	200	52	7,1	9,2	9,0	2,05	5,0	33,7	54	5,0	26	3	72,93	0,04	Fraturado
PDU65	526	152	7,0	31,1	32,1	1,32	14,9	19,3	50	45,0	63	3	222,72	0,10	Poroso
PDU66	358	85	8,2	25,4	14,2	4,80	7,0	1,9	10	5,0	54	2	184,46	1,33	Fraturado
PDU67	163	91	7,5	22,6	7,6	2,10	7,3	5,8	10	5,0	20	1	128,36	0,19	Fraturado
PDU68	480	51	7,2	7,8	38,6	4,43	5,1	1,4	81	56,0	98	3	133,90	0,10	Poroso
PDU69	304	99	6,5	17,5	18,4	0,76	13,3	49,2	10	23,0	16	8	67,70	0,01	Fraturado

Nome	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	pH	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	F ⁻	Mg ⁺⁺	NO ₃ ⁻	SiO ₂	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	Tipo de aquífero
PDU71	469	87	8,1	21,3	42,7	4,19	7,3	0,1	10	27,0	62	3	179,87	1,03	Fraturado
PDU72	318	81	6,1	12,6	29,9	0,20	12,2	72,9	10	19,0	25	7	29,77	0,00	Fraturado
PDU73	303	120	7,6	33,3	13,2	2,99	5,5	0,1	37	5,0	18	2	167,22	0,31	Fraturado
PDU74	101	22	6,9	6,0	4,9	0,82	0,9	0,1	52	5,0	12	1	54,65	0,02	Fraturado
PDU75	219	22	7,0	4,8	20,0	1,47	1,9	1,3	83	5,0	35	1	89,89	0,04	Fraturado
PDU77	83	24	6,7	4,5	4,7	0,10	1,2	7,3	34	5,0	8	3	36,84	0,01	Fraturado
PDU78	81	20	6,6	3,7	5,3	0,21	1,0	8,3	35	5,0	7	3	29,28	0,01	Fraturado
PDU81	2.240	126	8,2	38,6	445,6	5,39	10,1	0,0	10	129,0	378	3	140,23	1,01	Poroso
PDU82	179	42	7,2	11,5	8,1	1,13	2,7	1,7	61	5,0	19	2	78,41	0,06	Fraturado
PDU83	106	30	6,8	4,3	7,3	0,23	1,6	0,9	20	5,0	6	2	50,50	0,01	Fraturado
PDU84	96	26	6,8	5,3	4,5	0,21	1,5	0,3	48	5,0	10	2	50,74	0,01	Fraturado
PDU85	398	98	6,6	12,1	33,9	0,92	5,0	10,9	52	11,0	24	4	71,97	0,01	Fraturado
PDU86	1.324	129	8,0	76,7	327,5	4,23	5,4	0,0	25	14,0	138	4	125,83	0,57	Poroso
PDU87	423	50	7,2	6,6	41,7	0,92	1,1	2,3	90	24,0	65	3	140,98	0,10	Poroso
PDU88	462	136	8,3	37,7	72,7	2,34	8,3	0,1	36	5,0	31	2	122,24	1,11	Poroso
PDU89	160	40	6,8	9,5	9,2	0,47	2,4	2,0	58	5,0	17	2	75,51	0,02	Fraturado
PDU90	1.445	214	6,7	56,5	406,6	0,62	15,8	0,0	42	20,0	204	7	101,37	0,02	Poroso
PDU91	335	51	6,4	9,4	69,2	0,10	5,3	1,0	58	32,0	41	3	47,33	0,01	Poroso
PDU92	72	12	7,4	2,8	6,3	0,10	1,0	1,9	26	5,0	4	3	20,85	0,02	Fraturado

Legenda – *Sem dados.

Fonte – Elaborada pelo autor com dados da pesquisa e dados do Departamento Municipal de Água e Esgotos e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.

ANEXO C – Análises solicitadas aos laboratórios do Instituto de Geociências da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Leituras isotópicas – Laboratório de Geologia Isotópica:


- H em amostras de água: 14 análises solicitadas, 14 análises realizadas
- O em amostras de água: 14 análises solicitadas, 14 análises realizadas
- Pb-Pb em amostras de água: 14 análises solicitadas, 12 análises realizadas
- Pb-Pb em amostras de rocha total: 12 análises solicitadas, 6 análises realizadas

ANEXO D – Fichas de avaliação

GEO 03015 – PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia: Análise estatística de dados hidrogeoquímicos e aplicação de isótopos estáveis de H, O e Pb no estudo do sistema aquífero fraturado pré-cambriano no Município de Porto Alegre, RS	
Autor: Matheus Rossi Santos	
Orientador(es): Jaqueline Osorio Chies e Ari Roisenberg	
Nota final (1 até 10): 9,5	
Examinador:	Artur Cezar Bastos Neto
Data: 18/12/2017	

		Sim	Não	Em parte
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	x		
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?			x
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	x		
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	x		
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	x		
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	x		
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	x		
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	x		
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	x		
10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?	x		

Página	Correções obrigatórias
	Não há correções obrigatórias. Para aperfeiçoar o trabalho, sugere-se incluir no Resumo mais alguns resultados e restringir as Conclusões aos resultados de fato obtidos.
	

GEO 03015 – PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia: Análise Estatística de Dados Hidrogeoquímicos e Aplicação de Isótopos Ambientais Estáveis de H, O e Pb, no Estudo do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano no Município de Porto Alegre, RS.	
Autor: Matheus Rossi Santos	
Orientador(es): Jaqueline Osorio Chies e Ari Roisenberg	
Nota final (1 até 10): 9,5	
Examinador: Pedro Antonio Roehé Reginato	Data: 18/12/17

		Sim	Não	Em parte
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?	X		
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	X		
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	X		
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	X		
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	X		
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	X		
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	X		
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	X		
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	X		
10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?	X		

Página	Correções obrigatórias
Título	Sugiro repensar sobre o título, pois o teu trabalho envolve o estudo dos aquíferos fraturados e granulares de Porto Alegre
18	Sugiro reformular o objetivo geral e tornar ele mais objetivo e sucinto.
27	Aplicabilidade dos isótopos estáveis de H e O em estudos hidrogeológicos – na verdade em estudos hidrológicos e hidrogeológicos.
35	Informar como foi gerada a densidade de lineamentos – tamanhos das células, intervalos utilizados para definir as classes de densidade.
47	Tabela 3 – Desconhecimento das informações construtivas dos poços é uma vulnerabilidade também.

48	Informar o número total de poços na frase: “as informações disponíveis nos bancos de dados do SIAGAS e DMAE totalizaram centenas de poços” – se tu tem o valor, então o mesmo deve ser colocado.
51	Tem que informar como o nitrato está sendo medido, ou seja, como NO ₃ ou como N-NO ₃ , pois dependendo da forma os valores são diferentes. Na Portaria 2914 é informado 10mg/l de N-NO ₃ como limite de potabilidade. Se for NO ₃ então seria acima de 45mg/l. Isso é importante corrigir, pois se não confunde e passa uma informação errada para o leitor.
64	Figura 17 – adicionar na legenda da densidade as unidades dos valores de densidade. É por acaso n° de lineamentos / km ² ou o que?
70	Não se inicia uma frase com um número. Sugiro colocar, Ao todo, 14 poços foram amostrados.....

GEO 03015 – PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia:	Análise estatística de dados hidrogeoquímicos e aplicações de isótopos...	
Autor:	MATHEUS ROSSI SAÍTO	
Orientador(es):	Jaqueline Ozorio Chies Adri Boixenberg	
Nota final (1 até 10):	9,5	
Examinador:	MAREUS V. D. RENUJ	Data: 18/12/17

		Sim	Não	Em parte
1	O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia?			X
2	O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia?	X		
3	As ilustrações são úteis e adequadas?	X		
4	O manuscrito apresenta estrutura organizada?	X		
5	A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia?	X		
6	Os materiais e métodos são descritos adequadamente?	X		
7	Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente?	X		
8	As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos?	X		
9	As referências são convenientes e usadas adequadamente?	X		
10	O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)?	X		

Página	Correções obrigatórias
	A apresentação e organização foram ótimas. O manuscrito está muito bem organizado e o assunto foi exposto de maneira elegante.
	Considero que o resumo poderia conter mais conclusões e deve ser revisado.