



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL**

**PADRÕES HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA  
GERAL NO MUNICÍPIO DE CARLOS BARBOSA, REGIÃO NORDESTE DO  
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

TAISON ANDERSON BORTOLIN

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre, Março de 2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL**

**PADRÕES HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA  
GERAL NO MUNICÍPIO DE CARLOS BARBOSA, REGIÃO NORDESTE DO  
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

TAISON ANDERSON BORTOLIN

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador (a): Prof. Dr. Pedro Antonio Roehé Reginato

**TAISON ANDERSON BORTOLIN**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Aprovado em        de        de 2014

**BANCA EXAMINADORA**

---

Pós Dr. Luiz Fernando de Abreu Cybis  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS

---

Dr. Nelson Amoretti Lisboa  
Instituto de Geociências - IGEO/UFRGS

---

Dr. Ricardo Giumelli Markezan  
Universidade Federal de Pelotas - UFPel

## APRESENTAÇÃO E AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Pedro Antonio Roehe Reginato da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Esta pesquisa está vinculada ao projeto Hidrofrat - Hidrogeologia de Aquíferos Fraturados: Entendimento da Circulação da Água e de Contaminantes Para Uma Melhor Gestão dos Recursos Hídricos, realizado em parceria entre UFRGS/IPH, USP, UnB e UFES.

A seguir, meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma colaboraram para a jornada realizada nesse trabalho:

A Deus, pelo infinito amor, misericórdia e sabedoria que nos tem concedido.

Ao professor, amigo e quase um segundo pai, Pedro Antonio Roehe Reginato, pela acolhida ao chegar no IPH, por todo apoio, incentivo, pelas horas dedicadas na orientação para execução deste trabalho e por não ter desistido do seu orientado.

À professora Vania Elisabete Schneider, que como uma "mãe intelectual" tem me acompanhado todos esses anos, dando apoio nas horas fáceis e difíceis e também não me permitindo desistir. Agradeço também o apoio financeiro por parte da pesquisa, através do Instituto de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul.

Ao professor Luis Mancini, pela sua excelência no trabalho de análise de isótopos e por ter apoiado com seu conhecimento agregando a análise de resultados.

Aos meus pais, Valdir Lucio Bortolin e Marinês Savegnago Bortolin, que me auxiliaram nesta jornada e tiveram participação essencial desde o início dos estudos, bem como durante a execução deste mestrado.

Aos amigos que dividem espaço do trabalho por terem contribuído com sua dedicação, dando suporte nas demais atividades nos momentos em que estava me dedicando a esta dissertação. Além disso, cito agradecimento especial à Gisele Bacarim, a quem importanei com minhas centenas de frascos utilizados nas amostragens e de quem recebi ajuda na organização dos materiais de coleta. Também ao professor Ludmilson Abritta Mendes, grande amigo de tão pouco tempo, mas a quem era gratificante "perder" umas boas horas de conversa. À Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), pela disponibilização de dados e pessoal que participaram no acompanhamento em campo e auxílio nas coletas. Enfim, a todos que de alguma forma fizeram deste rapaz que vos escreve um aprendiz de mestre.

## **RESUMO**

Este trabalho buscou avaliar a existência de diferentes padrões hidroquímicos e isotópicos dos aquíferos fraturados do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), relacionando esses padrões com as profundidades das entradas de água. O estudo foi desenvolvido a partir do inventário e cadastramento de poços tubulares existentes na região do município de Carlos Barbosa - RS, do levantamento e interpretação de dados geológicos e hidrogeológicos, além da coleta e análise de amostras de água de poços tubulares que estão em operação e são utilizados pela companhia de abastecimento CORSAN. Para este trabalho foram utilizadas informações hidroquímicas e isotópicas da água de 12 poços tubulares e 3 fontes, além de análise isotópica mensal da água da chuva. A análise dos resultados foi realizada através dos diagramas de Piper, Schoeller e Stiff, além de análise estatística de agrupamento a fim de verificar padrões semelhantes entre os pontos amostrados. Os resultados obtidos permitiram evidenciar que a maioria dos poços apresentam profundidade de até 150 metros com vazões médias que variam de 5 a 20 m<sup>3</sup>/h, localizados em zonas de média e alta densidade de fraturas, as quais possuem orientação preferencial para noroeste. Quanto à hidroquímica, as águas que circulam por esses aquíferos são do tipo bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, predominando as águas bicarbonatadas mistas e cálcicas, com pequenas variações em relação à concentração dos íons e suas razões iônicas. Essas características hidroquímicas são típicas de águas que circulam por estruturas de rochas vulcânicas ácidas e indicam um baixo tempo de residência, sendo as concentrações variáveis com as profundidades das entradas da água. A avaliação entre a correlação de padrões hidroquímicos com a profundidade das entradas de água permitiu a identificação de dois grupos. O primeiro grupo é caracterizado por poços que apresentam entradas de água localizadas em profundidades inferiores a 30 metros e águas com baixa concentração de íons. No segundo grupo estão inseridos poços cujas entradas de água estão localizadas entre 50 e 112 metros e apresentam águas com uma maior concentração de íons como cálcio, sódio, bicarbonatos e maiores valores de condutividade e sólidos totais dissolvidos. A explicação dessas diferenças está relacionada com a circulação de água e com tempo de interação água-rocha que ocorre de forma diferente dependendo da profundidade das entradas de água. A análise de isótopos das águas de poços, fontes e da água da chuva apresentam semelhanças isotópicas indicando que água subterrânea pode ser caracterizada como originada por infiltração da precipitação nas áreas de recarga. Por fim, a caracterização hidroquímica e isotópica indicam que as águas subterrâneas dessa região apresentam baixo grau de mineralização e baixo tempo de residência, sendo que as exceções foram encontradas em poços que possuíam entradas de água mais profundas.

**Palavras-chave:** hidroquímica, isótopos, aquíferos fraturados

## **ABSTRACT**

This study aimed to evaluate the existence of different hydrochemical and isotopic patterns of fractured aquifers of Serra Geral Aquifer System (SGAS), relating these patterns with depths of water intakes. The study was developed from the inventory and registration of wells in the region of Carlos Barbosa - RS, the survey and interpretation of geological and hydrogeological data, and the collection and analysis of samples of water from wells that are in operation and are used by the supply company CORSAN. Hydrochemical and isotopic information from 12 wells and 3 water sources were used for this work, in addition to monthly isotopic analysis of rainwater. The analysis was performed using diagrams as Piper, Schoeller and Stiff, and statistical cluster analysis to verify similar patterns between the sampling points. The results have highlighted that most wells have depths up to 150 meters with average flow rates ranging from 5 to 20 m<sup>3</sup>/h, located in areas of medium and high density of fractures, which have preferential orientation to the northwest. As for hydrochemistry, water circulating through these aquifers are the calcic or magnesian bicarbonate type, predominantly mixed and calcic bicarbonate waters, with minor variations in the concentration of ions and their ionic reasons. These hydrochemical characteristics are typical of waters that circulate structures and acidic volcanic rocks indicate a low residence time, and the varying concentrations with depths of water inputs. The evaluation of the correlation between patterns hydrochemical with water entry's depth allowed the identification of two groups. The first group is characterized by wells that have water intakes located below than 30 meters and waters with low concentration of ions. In the second group are inserted into wells whose water inlets are located between 50 and 112 meters and water present in a higher concentration of ions such as calcium, sodium, bicarbonates and higher values of conductivity and dissolved solids. The explanation of these differences are related to the circulating water and water - time interaction rock occurs differently depending of water entry's depth. Analysis of isotopes of water wells and sources of rainwater present isotopic similarities indicating that groundwater can be characterized as caused by infiltration of rainfall areas recharging. Finally, the hydrochemical and isotopic characterization indicate that the groundwater in this region have low grade mineralization and low residence time, with the exceptions were found in wells that had water intakes deeper.

**Keywords:** hydrochemistry, isotopes, fractured aquifers

## **LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS**

### **SIGLAS**

**CORSAN** - Companhia de Saneamento do Estado do Rio Grande do Sul

**SASG** - Sistema Aquífero Serra Geral

**VSMOW**- Viena Standard Mean Ocean Water

**SMOW** - Standard Mean Ocean Water

**GMWL** - Global Meteoric Water Line

**WMO** - World Meteorological Organization

**GNIP** - Global Network of Isotopes in Precipitation

**IAEA** - Internacional Atomic Energy Agency

**SIAGAS** - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

**UTM** - Universal Transversa de Mercator

**SMEWW** - Standard Methods for Examination of Water and Wastewater

**BDMEP** - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

**INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia

**CRDS** - Cavity Ringdown Spectrometer

**EALDS** - Espectroscopia de Absorção a Laser de Diodo Sintonizável

**SAG** - Sistema Aquífero Guarani

**CPRM** - Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais

**UFRGS**- Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**IPH**- Instituto de Pesquisas Hidráulicas

**USP**- Universidade de São Paulo

**UnB**- Universidade de Brasília

**UFES** - Universidade Federal do Espírito Santo

**LAIS/IG/UnB** - Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

### **SÍMBOLOS E UNIDADES**

**STD** - Sólidos Totais Dissolvidos

**COND** - Condutividade elétrica

**ALC** - Alcalinidade

**Ca** - Cálcio

**HCO<sub>3</sub>** - Bicarbonato

**Cl** - Cloro

**Mg** - Magnésio

**K** - Potássio

**Na** - Sódio

**SO<sub>4</sub>** - Sulfato

**F** - Flúor

**Fe<sub>2</sub>** - Ferro

**Mn**- Manganês

**TEMP** - Temperatura

**D** - Deutério

**$\delta^{18}O$**  - isótopo de oxigênio

**$\delta D$**  - isótopo de deutério

**$\delta$**  - notação delta

**r** - razão iônica

**$X_{iv}$**  - característica do indivíduo i

**$X_{jv}$**  - característica do indivíduo j

**v** - número indivíduo na amostra

**p** - número de parcelas na amostra

**$d_{ij}$** - distância de similaridade

**m** - metros

**m<sup>2</sup>** - metros quadrados

**m<sup>3</sup>** - metros cúbicos

**h** - hora

**seg**- segundos

**‰** - partes por mil

**%** - por cento

**meq/L** - miliequivalente por Litro

**mg/L** - miligrama por Litro

**NE** - Nível Estático

**T** - Transmissividade

**q** - Capacidade específica

**Q** - Vazão



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo .....	14
Figura 2- Esboço geológico da província do Paraná .....	15
Figura 3 - Mapa geológico com a distribuição das sequências de rochas vulcânicas ácidas e básicas no Planalto .....	16
Figura 4- Estruturação de um derrame de lavas .....	17
Figura 5 - Seção esquemática representando a formação do relevo em escarpas em função da ocorrência de diferentes tipos de derrames e das diferentes estruturas primárias associadas a esses derrames .....	18
Figura 6 - Contexto geológico da área de estudo .....	19
Figura 7 - Composição química média dos diferentes grupos de rochas da Formação Serra Geral.....	20
Figura 8 - Classificação das províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral.....	22
Figura 9- Províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral .....	23
Figura 10 - Contexto hidrogeológico da área de estudo .....	24
Figura 11 - Modelo conceitual de circulação de água subterrânea no Sistema aquífero Fraturado Serra Geral.....	26
Figura 12 - Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas coletadas do aquífero livre, localizado em solos de alteração das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.....	29
Figura 13 - Classificação das águas subterrâneas da região nordeste.....	30
Figura 14 - Reta meteórica mundial mostrando a relação entre $\delta^{18}O$ e $\delta^2H$ na chuva. Os...	34
Figura 15 - Perfis Construtivos dos poços tubulares .....	39
Figura 16 - Exemplos dos poços utilizados para amostragem em campo.....	40
Figura 17 - Fonte de encosta utilizada para amostragem de água .....	41
Figura 18. Cavidade de medida do CRDS .....	43
Figura 19 - Poços e seções utilizadas para caracterização geológica da área de estudo.....	48
Figura 20 - Seção geológica A-A'.....	49
Figura 21 - Seção geológica B-B' .....	50
Figura 22 - Seção geológica C-C' .....	51
Figura 23 - Vista de um afloramento do primeiro derrame vulcânico básico .....	52
Figura 24 - Vista de basaltos, brechas e geôdos nos contatos entre os derrames 1 e 2 .....	52
Figura 25 - Vista das rochas do derrame ácido 1.....	53

Figura 26- Contato entre derrames de rochas ácidas .....	54
Figura 27 - Riodacitos do derrame ácido 2 e 3.....	54
Figura 28 - Dacitos do derrame ácido 4.....	55
Figura 29 - Vista de um afloramento do derrame ácido 5.....	55
Figura 30 - Mapa de densidade e diagrama de roseta com as direções dos lineamentos.....	57
Figura 31 – Diagrama de roseta dos planos de fraturas medidos em campo .....	58
Figura 32 - Circulação de água no riodacito com disjunção horizontal.....	58
Figura 33 - Localização dos poços tubulares em Carlos Barbosa .....	59
Figura 34 - Profundidade dos poços perfurados na região de Carlos Barbosa.....	60
Figura 35 - Nível estático dos poços analisados.....	60
Figura 36 - Número de entradas de água dos poços analisados .....	61
Figura 37 - Profundidade das entradas de água dos poços.....	61
Figura 38 - Transmissividade dos poços analisados .....	62
Figura 39 - Capacidade específica dos poços analisados.....	62
Figura 40 - Vazão dos poços analisados .....	63
Figura 41 - Poços e fontes selecionados para amostragem de água .....	65
Figura 42 - Gráfico relacionando os valores de erro com a condutividade elétrica das amostras .....	66
Figura 43 - Gráfico de correlação entre a condutividade e a quantidade de sólidos totais dissolvidos nas águas do SASG em Carlos Barbosa .....	69
Figura 44 - Diagrama Piper das amostras de água subterrânea do SASG. ....	70
Figura 45 - Diagrama de Schoeller das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo .....	71
Figura 46 - Gráficos box-plot de parâmetros e íons que possuem diferença significativa nos poços e fontes analisados .....	73
Figura 47 - Dendograma das amostras de águas subterrâneas do SASG na área de estudo ....	74
Figura 48 - Relação entre condutividade e pH nas amostras analisadas.....	77
Figura 49 - Gráfico de correlação entre condutividade e cálcio.....	78
Figura 50 - Correlação entre HCO <sub>3</sub> e condutividade nas amostras analisadas.....	78
Figura 51 - Correlação entre cálcio e HCO <sub>3</sub> nas amostras analisadas .....	79
Figura 52 - Correlação entre sódio e HCO <sub>3</sub> nas amostras analisadas .....	79
Figura 53 - Geometrias observadas no Diagrama de Stiff referente ao grupo 1 das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo. ....	80

Figura 54 - Geometrias observadas no Diagrama de Stiff referente ao grupo 2 das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo. ....	81
Figura 55 - Geometrias observadas no Diagrama de Stiff referente ao grupo 3 das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo. ....	83
Figura 56 - Modelo conceitual hidroquímico preliminar do SASG para a área de estudo .....	86
Figura 57 - Reta meteórica de Carlos Barbosa.....	87
Figura 58 - Variação do sinal isotópico em relação à quantidade de chuva .....	89
Figura 59 - Variação do sinal isotópico de $\delta^{18}O$ e $\delta D$ nos meses monitorados.....	90
Figura 60 - Gráficos boxplot de comparação de isótopos entre os pontos amostrados .....	90
Figura 61 - Comparações entre a linha de água meteórica global, linha de água meteórica local (IAEA - WMO estação Porto Alegre) e sinal de razão isotópica dos poços analisados .	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados hidrogeológicos para os aquíferos pertencentes à divisão hidrogeológica da Bacia do Paraná .....	21
Tabela 2 - Condicionantes do aquífero livre .....	25
Tabela 3 – Características hidrogeológicas do aquífero fraturado .....	26
Tabela 4 - Metodologias analíticas utilizadas na análise das amostras de água.....	42
Tabela 5 - Métodos a serem empregados na análise de dados hidroquímicos .....	44
Tabela 6 - Tipos de Rochas e Derrames identificados na área e suas altitudes aproximadas ..	47
Tabela 7 - Características dos pontos analisados e respectivas entradas de água .....	64
Tabela 8 - Valores obtidos na primeira amostragem (Abril 2013) .....	66
Tabela 9 - Valores obtidos na segunda amostragem (Julho 2013) .....	67
Tabela 10 - Estatísticas descritivas dos parâmetros analisados .....	67
Tabela 11 - Resultados do teste de Kruskal-Wallis .....	72
Tabela 12 - Correlação entre os principais parâmetros hidroquímicos.....	77
Tabela 13 - Razões iônicas calculadas em meq/L .....	84
Tabela 14 - Principais estatísticas descritivas de $\delta^{18}O$ e $\delta D$ .....	91

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
2	OBJETIVOS .....	13
3	ÁREA DE ESTUDO.....	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
	4.1 Contexto geológico .....	15
	4.2 Contexto Hidrogeológico.....	21
	4.3 Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral .....	27
	4.4 Isótopos estáveis .....	32
5	METODOLOGIA .....	37
	5.1 Levantamento de dados existentes, inventário e cadastramento de pontos de captação .....	37
	5.2 Seleção de Poços Tubulares .....	37
	5.3 Caracterização Geológica e Estrutural.....	38
	5.4 Caracterização Hidrogeológica .....	38
	5.5 Caracterização Hidroquímica e Avaliação Isotópica.....	40
	5.5.1 Amostragem e análises laboratoriais.....	40
	5.5.2 Métodos de análises dos resultados.....	44
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	47
	6.1 Caracterização geológica da área de estudo.....	47
	6.2 Caracterização hidrogeológica da área de estudo.....	59
	6.3 Hidroquímica da área de estudo .....	63
	6.3.1 Caracterização hidroquímica .....	63
	6.3.2 Padrões Isotópicos.....	87
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	93
	REFERÊNCIAS .....	95

## 1 INTRODUÇÃO

A hidrogeologia de aquíferos fraturados é um importante campo de estudo principalmente devido ao abundante e crescente uso de suas águas para o abastecimento público.

Em resposta ao aumento da procura de água e degradação da qualidade de águas superficiais, tem-se aumentado a exploração de água subterrânea (GLYNN E PLUMMER, 2005; AYRAUD et al, 2008). Em contraposição, há crescente preocupação quanto ao mau aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos, deficiência na construção de poços e muitas vezes ausência de estudos técnicos para o aproveitamento dessas águas.

A retirada de águas subterrâneas ocorre principalmente por poços tubulares que podem ser utilizados na avaliação das características hidráulicas e hidroquímicas dos sistemas aquíferos. Assim, o monitoramento e a avaliação criteriosa destas características nos poços de captação são necessários, a fim de possibilitar a utilização sustentável deste sistema.

Na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, os recursos hídricos subterrâneos têm grande importância, pois na maioria das situações correspondem à única fonte de água disponível para abastecimento humano ou uso no desenvolvimento de atividades industriais ou agrícolas.

Nessa região, os recursos hídricos subterrâneos estão associados às rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Conforme Reginato (2003), predominam dois tipos principais de aquíferos: o livre ou freático e o fraturado. O primeiro aquífero fornece volumes reduzidos de água, sendo mais utilizado pela população rural, que capta suas águas através de poços escavados ou fontes. O segundo aquífero fornece maiores volumes e água com melhor qualidade, sendo utilizado para abastecimento da população urbana da maioria dos municípios, bem como de algumas comunidades rurais, através de poços tubulares comunitários.

As águas que circulam por esses aquíferos apresentam características hidroquímicas e qualidade variada. Essa diferenciação depende do tipo de aquífero, da litologia, da recarga, do grau de confinamento, da vulnerabilidade, do uso e ocupação do solo na área de recarga e junto ao ponto de captação (REGINATO, 2003, REGINATO et al., 2012).

A assinatura hidroquímica da água subterrânea é definida em função das características geológicas do aquífero, da solubilidade dos minerais constituintes da rocha

aquífera, dos meios por onde a água percola antes de atingir a zona saturada e do tempo de armazenamento (MIZUNO, 2012).

Outro fator condicionante da hidroquímica das águas subterrâneas é a circulação nas fraturas. Betiolo (2006) explica que a interação água-rocha é incrementada em zonas fraturadas, aumentando o grau de alteração da rocha proporcionalmente com a densidade de fraturas, o que promove maior atividade nas reações de troca iônica. Quando a fratura está mineralizada pode haver contribuição de elementos químicos diferentes para o aquífero provocando alterações nos padrões hidroquímicos ou o surgimento de concentrações anômalas. Cada fratura pode apresentar particularidades específicas, mesmo estando na mesma região hidrogeológica, podendo ocorrer diferenças químicas em função da região de recarga.

É esperada a correlação entre a composição química da água subterrânea e das rochas através das quais ela percola. Para aquíferos com recarga direta, e onde não ocorram misturas de águas provenientes de outros aquíferos, esta relação pode ser simples. Porém, se existirem relações de fluxo entre aquíferos com distintas litologias, estas relações passam a apresentar um certo grau de complexidade (GASTMANS et. al, 2005). Ressalta-se que, fraturas profundas que cortam diferentes Formações Geológicas podem colocar aquíferos distintos quimicamente em interação, gerando um tipo misto de água subterrânea.

Diante destas considerações, este trabalho busca avaliar a existência de diferentes padrões hidroquímicos e isotópicos dos aquíferos fraturados do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), relacionando esses padrões com os distintos níveis de entradas de água. A verificação da existência de diferenças no padrão hidroquímico do aquífero fraturado possibilitará um melhor entendimento das características deste sistema, facilitando a compreensão quanto aos padrões de circulação, recarga e alterações hidroquímicas.

O estudo proposto foi realizado na área abrangida pelo município de Carlos Barbosa (região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul), sendo que a escolha dessa área justificou-se pelo fato da existência e qualidade das informações hidrogeológicas e por ser uma região onde a captação de água subterrânea tem grande importância para o abastecimento público. Além disso, essa área é objeto de estudo do projeto Hidrofrat (Hidrogeologia de Aquíferos Fraturados: Entendimento da Circulação da Água e de Contaminantes Para Uma Melhor Gestão dos Recursos Hídricos, desenvolvido pela UFRGS/IPH, USP, UnB e UFES), no qual esse projeto está vinculado.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a existência de padrões hidroquímicos e isotópicos associados a diferentes níveis de entradas de água nos aquíferos fraturados do Sistema Aquífero Serra Geral.

Dentre os objetivos específicos, citam-se:

- realizar a caracterização hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na região de Carlos Barbosa, inserida na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul;

- avaliar a circulação da água subterrânea com base na interpretação de características hidroquímicas e isotópicas da água subterrânea;

- analisar a existência de relação entre o padrão hidroquímico e isotópico e as entradas de água localizadas em diferentes níveis de profundidade.



### 3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente no município de Carlos Barbosa, inserida na região do planalto do estado, conforme o mapa da Figura 1.

O município está localizado a 676 m acima do nível do mar, sendo a altitude da sede de 618 m. Encontra-se entre as coordenadas geográficas 29°18' de Latitude Sul e 51° 30' de Longitude Oeste. Carlos Barbosa faz divisa com os municípios de Garibaldi, Farroupilha, São Vendelino, Alto Feliz, Barão e Boa Vista do Sul, inserido em duas bacias hidrográficas: Taquari-Antas e Caí. A área de estudo compreende a zona urbana de Carlos Barbosa, que é abastecida em sua totalidade por água subterrânea oriunda de poços tubulares profundos.

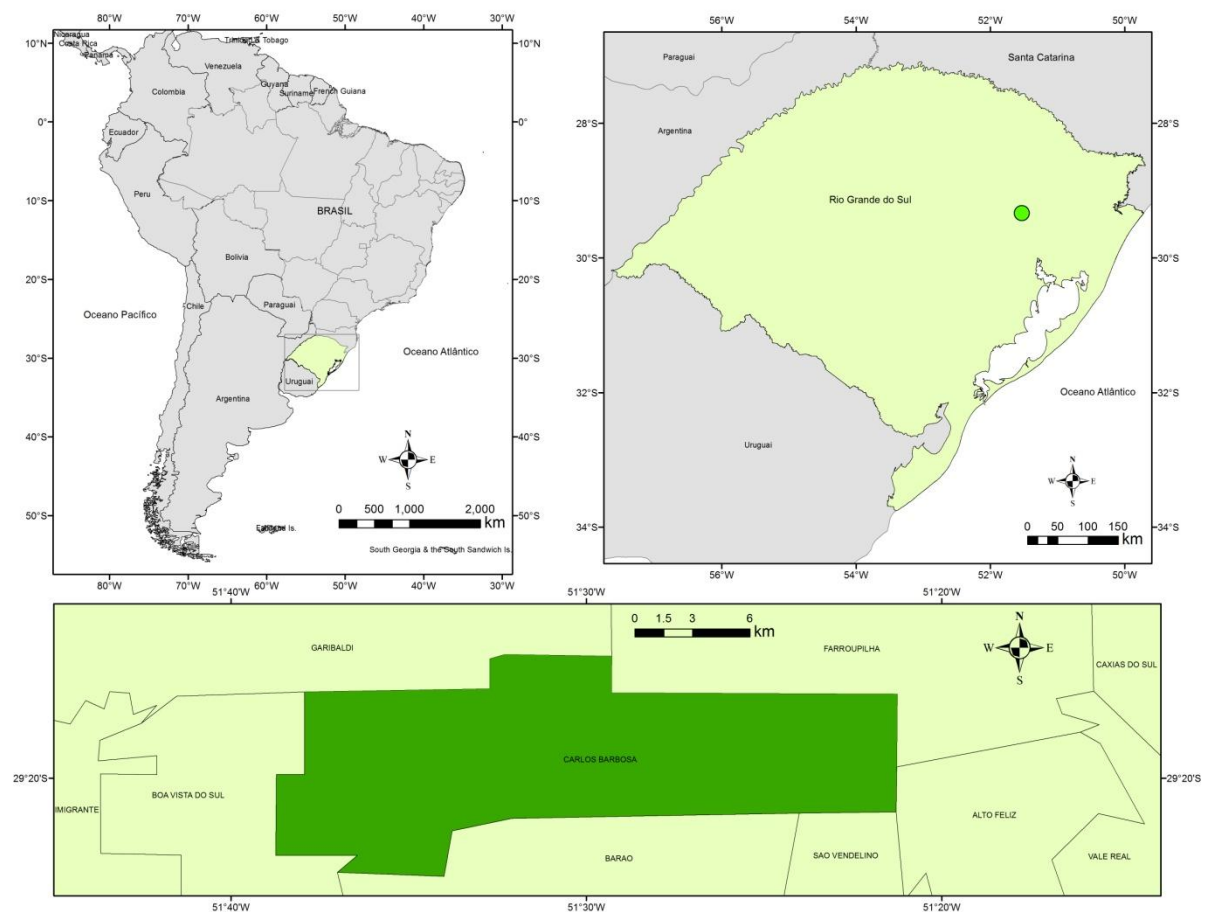
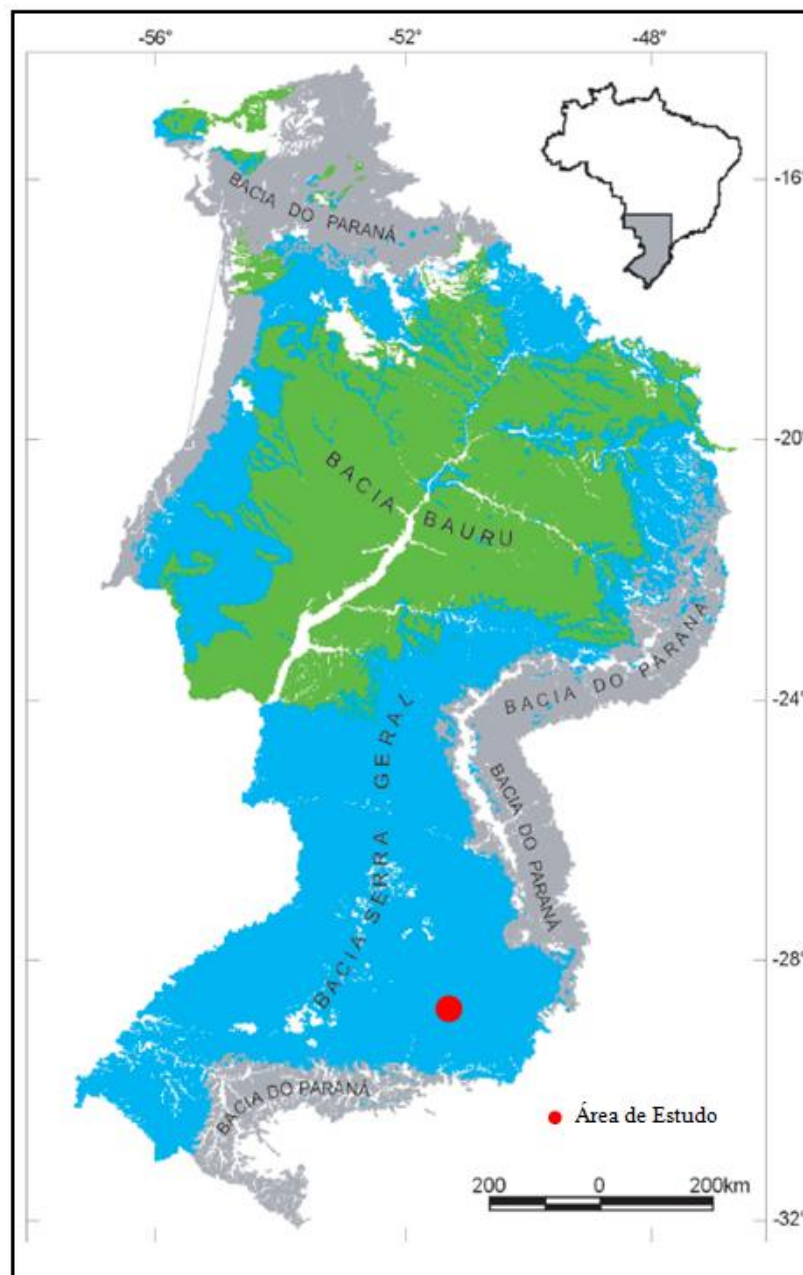


Figura 1 - Localização da área de estudo

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Contexto geológico

A região abrangida pelo estudo, apresentada na Figura 2, está inserida na Província Geológica do Paraná, que é uma bacia intracratônica de idade Paleozóica-Mesozóica caracterizada pela presença de seqüências de rochas sedimentares e rochas ígneas vulcânicas (DA SILVA et al., 2003).



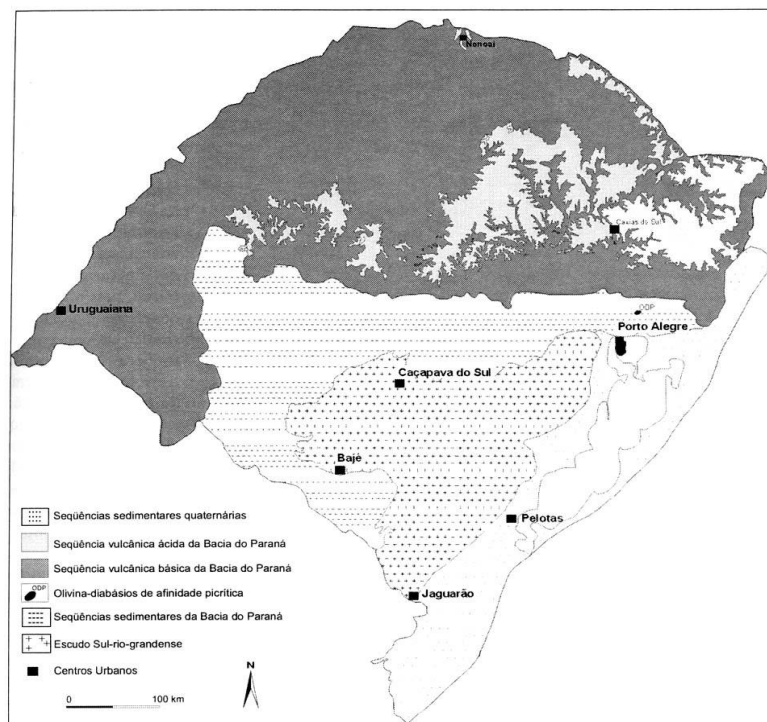
**Figura 2- Esboço geológico da província do Paraná**

Fonte: Da Silva et al. (2003)

A área de estudo é marcada pela ocorrência de rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral, cuja origem esteve relacionada a atividades geológicas, de natureza tensional que ligadas à separação continental possibilitaram o extravasamento de enormes quantidades de lava ocorridas no final do Jurássico e início do Cretáceo

A Formação Serra Geral é caracterizada pela ocorrência de derrames de rochas vulcânicas que deram origem a uma das maiores províncias vulcânicas do mundo (SAUNDERS et al. 1992). Essa formação geológica é marcada pela presença de sequências de rochas vulcânicas básicas, intermediárias e ácidas que juntas atingem espessuras médias de 800 metros e máxima de 1500 metros (ROISEMBERG e VIERO, 2002).

O vulcanismo básico e intermediário no Rio Grande do Sul cobre mais da metade da área do estado, sendo caracterizado pela ocorrência de rochas basálticas e andesíticas (ROISEMBERG e VIERO, 2002). Os derrames dessa sequência são marcados por espessuras médias inferiores a 20 metros, mas variáveis entre 5 a 50 metros, dependendo da situação topográfica onde estão inseridos. No contexto geral do estado, esses derrames básicos e intermediários tornam-se mais espessos de oeste para leste, com valores alcançando cerca de 600 metros de espessura na Escarpa da região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, conforme apresentado na Figura 3.



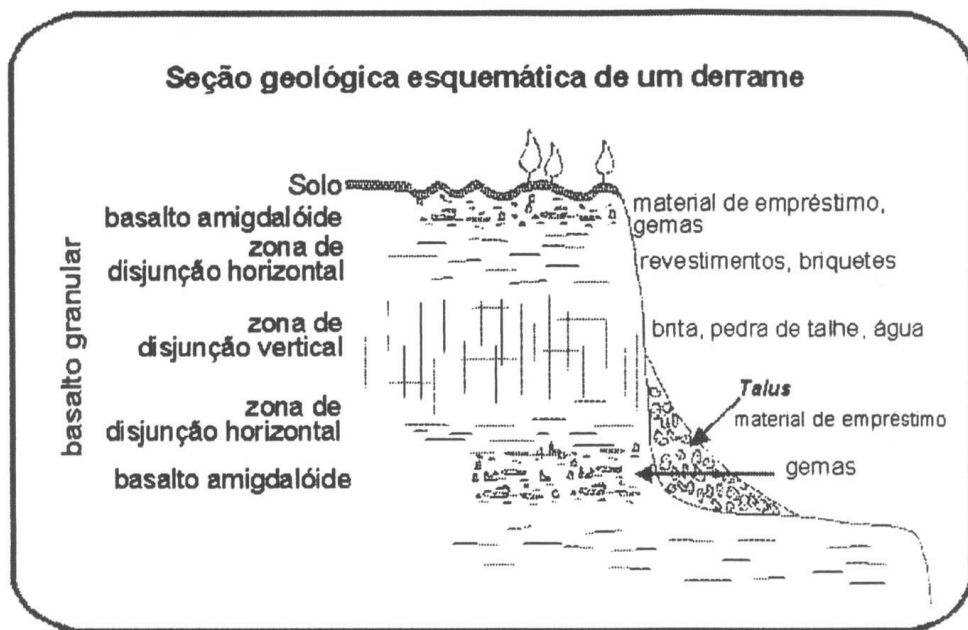
**Figura 3 - Mapa geológico com a distribuição das sequências de rochas vulcânicas ácidas e básicas no Planalto**

Fonte: Roisenberg e Viero (2002)

Os derrames básicos e intermediários apresentam uma estruturação padrão, que é bastante variável mas que é caracterizada pela formação e disposição de diferentes estruturas primárias geradas em função do resfriamento das lavas. Em geral, um derrame tende a apresentar da base para o topo a seguinte sequência (WILDNER et al., 2006):

- zona maciça vítrea ou parcialmente vitrificada na base do derrame;
- zona de diáclases horizontais de pequena espessura;
- zona de diáclases verticais ou colunar de grande espessura (maior parte do derrame);
- zona de vesículas e amígdalas no topo do derrame. As amígdalas podem estar preenchidas por minerais como zeólitas, apofilitas, ametista, calcedônia, ágata, opala, calcita, selenita, entre outros.

Na Figura 4 é apresentado um perfil esquemático da estruturação de um derrame de lavas, onde estão representadas as diferentes estruturas primárias que as rochas vulcânicas podem apresentar, bem como a relação entre as diferentes zonas e os recursos minerais.



**Figura 4- Estruturação de um derrame de lavas**

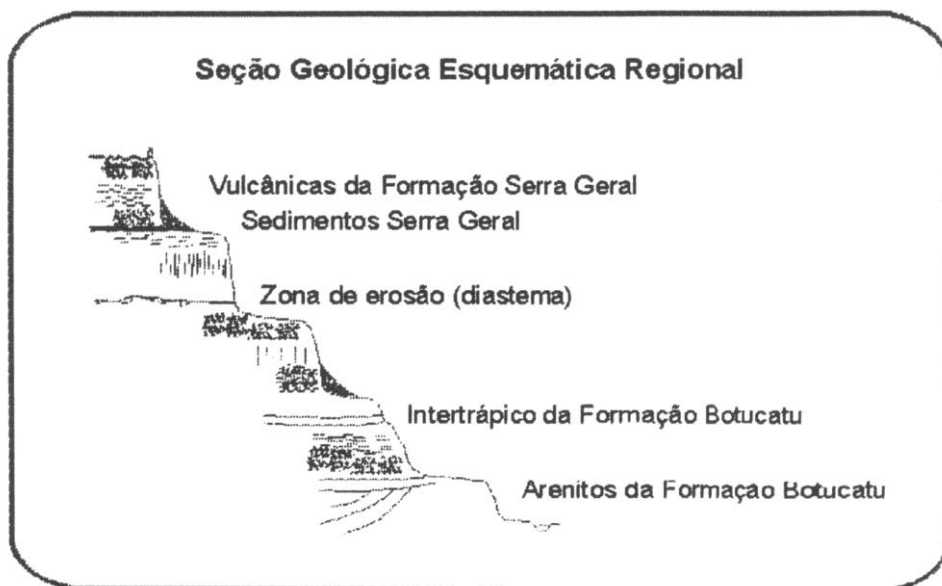
Fonte: Wildner et al. (2006)

O vulcanismo ácido, no estado do Rio Grande do Sul, é caracterizado pela presença de riolitos, riodacitos e quartzo-latitos que cobrem cerca de 50.000 km<sup>2</sup>, com uma espessura máxima da ordem de 400 metros. Os derrames têm espessuras variáveis, com média

aproximada de 40 metros sendo caracterizados pela seguinte sequência (WILDNER et al., 2006):

- zona basal maciça caracterizada pela presença de vitrófiros e brechas de fluxo dispostas sem padrão definido e sem diaclasamento.
- zona central marcada pela ocorrência de riocacitos e granófiros de coloração acinzentada com forte diaclasamento horizontal ou tabular. Essas diáclases apresentam espessuras centimétricas, mas em algumas partes do derrame podem ter espessuras decimétricas a métricas.
- zona superior, que apresenta um padrão semelhante a zona basal, mas se distingue pela presença de vesículas e amígdalas com tamanhos superiores a 10 mm que estão preenchidas, principalmente, por quartzo e calcita.

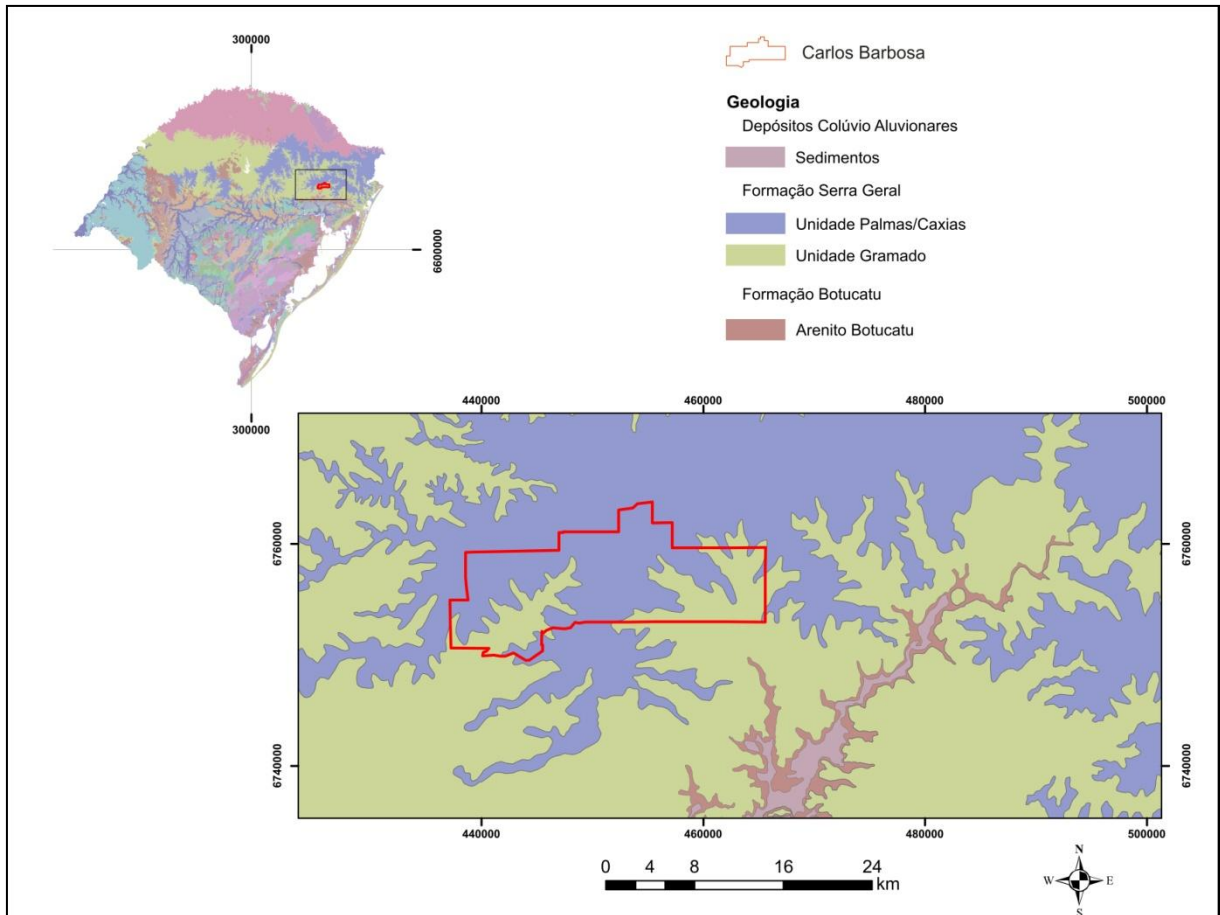
A organização dos diferentes derrames ácidos e básicos e as estruturas primárias (diáclases, vesículas e amígdalas) associadas aos mesmos, tem um papel de grande importância na modelagem do relevo, principalmente, na formação das escarpas e patamares mostrados na Figura 5.



**Figura 5 - Seção esquemática representando a formação do relevo em escarpas em função da ocorrência de diferentes tipos de derrames e das diferentes estruturas primárias associadas a esses derrames**

Fonte: Wildner et al. (2006)

Na região de estudo há ocorrência de dois tipos principais de litologias associadas a diferentes unidades que são: basaltos do tipo Gramado e vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias (CPRM, 2010), como apresentado na Figura 6.



**Figura 6 - Contexto geológico da área de estudo**

Fonte: Elaborado a partir de CPRM (2010)

A Unidade Palmas/Caxias abrange a maior parte da área de estudo, seguida pela unidade Gramado, a qual está associada às zonas de relevo mais dissecado. A unidade Palmas/Caxias é caracterizada por litologias do tipo riodacitos e riolitos de coloração cinza clara a cinza esverdeada a azulada, textura fanerítica fina e aspecto mosqueado (pontos esbranquiçados). Essas rochas estão dispostas em derrames, com espessuras médias de 50 metros, que se caracterizam por uma zona basal maciça, por uma zona central marcada por uma ampla disjunção horizontal ou tabular e por uma zona de topo vesicular a amigdalóide.

Na zona basal ocorrem comumente vitrófiros que são rochas maciças, com baixo grau de fraturamento, afaníticas, de coloração preta a marrom avermelhada com um leve brilho superficial. Também podem ocorrer brechas vulcânicas na base dos derrames. A zona central é caracterizada pelos riodacitos apresentando disjunção horizontal de espaçamento centimétrico a decimétrico. No topo há a ocorrência de riodacitos ou riolitos com presença de vesículas e amígdalas, geralmente, preenchidas por minerais de quartzo e carbonatos.

A unidade Gramado é caracterizada pela ocorrência de basaltos e andesibasaltos que são rochas de coloração cinza escura, castanha a marrom, de textura fanerítica muito fina a afanítica dispostas em derrames com espessuras inferiores a 30 metros. Nesses derrames é comum a ocorrência de amplas zonas vesiculares a amigdaloides preenchidas por minerais como zeolitas e quartzos.

A composição química principal das diferentes sequências vulcânicas ácidas e básicas pode ser observada na Figura 7.

	Basaltos Alto-Ti			Basaltos Baixo-Ti		Ácidas	
	Urubici	Pitanga	Paranapanema	Gramado	Esmeralda	Palmas	Chapecó
SiO <sub>2</sub>	51,71	50,40	50,23	53,81	51,17	67,84	65,89
TiO <sub>2</sub>	3,76	3,55	2,34	1,55	1,63	1,00	1,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,28	12,82	13,13	13,88	13,82	13,06	12,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,28	15,29	15,05	13,25	14,14	6,38	7,80
MnO	0,17	0,22	0,22	0,20	0,24	0,11	0,12
MgO	4,56	4,41	5,24	4,59	5,44	1,26	1,75
CaO	8,19	8,36	9,25	8,40	9,89	3,11	3,49
Na <sub>2</sub> O	2,80	2,98	3,28	2,72	2,78	3,18	3,22
K <sub>2</sub> O	1,70	1,41	0,97	1,37	0,68	3,79	3,50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,54	0,58	0,33	0,23	0,22	0,29	0,34
Ni	55	32	51	39	58	10	3
Cu	162	172	198	150	191	88	118
Zn	118	131	122	108	107	79	26
Rb	38	33	22	21	25	161	94
Sr	773	481	304	263	206	141	514
Ba	638	470	301	402	235	701	1115
Y	39	42	37	37	36	50	70
Zr	319	280	182	181	132	271	560
Nb	28	25	15	15	9	21	46
La	41,3	34,9	22,0	22,3	11,6	44,8	81,0
Ce	89,7	80,3	51,1	51,0	28,2	90,0	175,0
Nd	51,0	44,9	29,2	25,9	17,6	44,4	92,2
Sm	10,8	7,12	6,24	6,06	4,58	9,06	19,5
Eu	3,46	3,10	2,09	1,66	1,56	1,87	5,35
Yb	2,92	3,76	3,58	3,25	3,18	4,67	5,24
Th	4,51	3,89	3,17	5,58	2,66	13,7	0,82
U	1,26	1,12	1,08	1,71	0,83	4,57	1,89
Ta	1,92	1,79	1,08	0,91	0,51	1,71	3,17
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0,7048	0,7059	0,7058	0,7075	0,7059	0,7180	0,7056
	0,7062	0,7060	0,7078	0,7150	0,7076	0,7280	0,7080

**Figura 7 - Composição química média dos diferentes grupos de rochas da Formação Serra Geral**  
Fonte: Roisenberg e Viero (2002)

Analisando-se os componentes químicos principais e secundários, observa-se uma grande variação entre essas duas sequências. No entanto, fica evidente uma maior concentração de Cálcio e Magnésio, bem como de Ferro e Manganês nas litologias básicas, enquanto nas litologias ácidas como as da Unidade Caxias/Palmas ocorre maior concentração de Sódio e Potássio.

## 4.2 Contexto Hidrogeológico

Considerando a escala regional, a área de estudo localiza-se na divisão hidrogeológica denominada de Bacia do Paraná, cujos principais sistemas aquíferos (Tabela 1) estão dispostos na Formação Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, onde o volume de água é estimado em 50.000 km<sup>3</sup> (REBOUÇAS, 1988).

**Tabela 1 - Dados hidrogeológicos para os aquíferos pertencentes à divisão hidrogeológica da Bacia do Paraná**

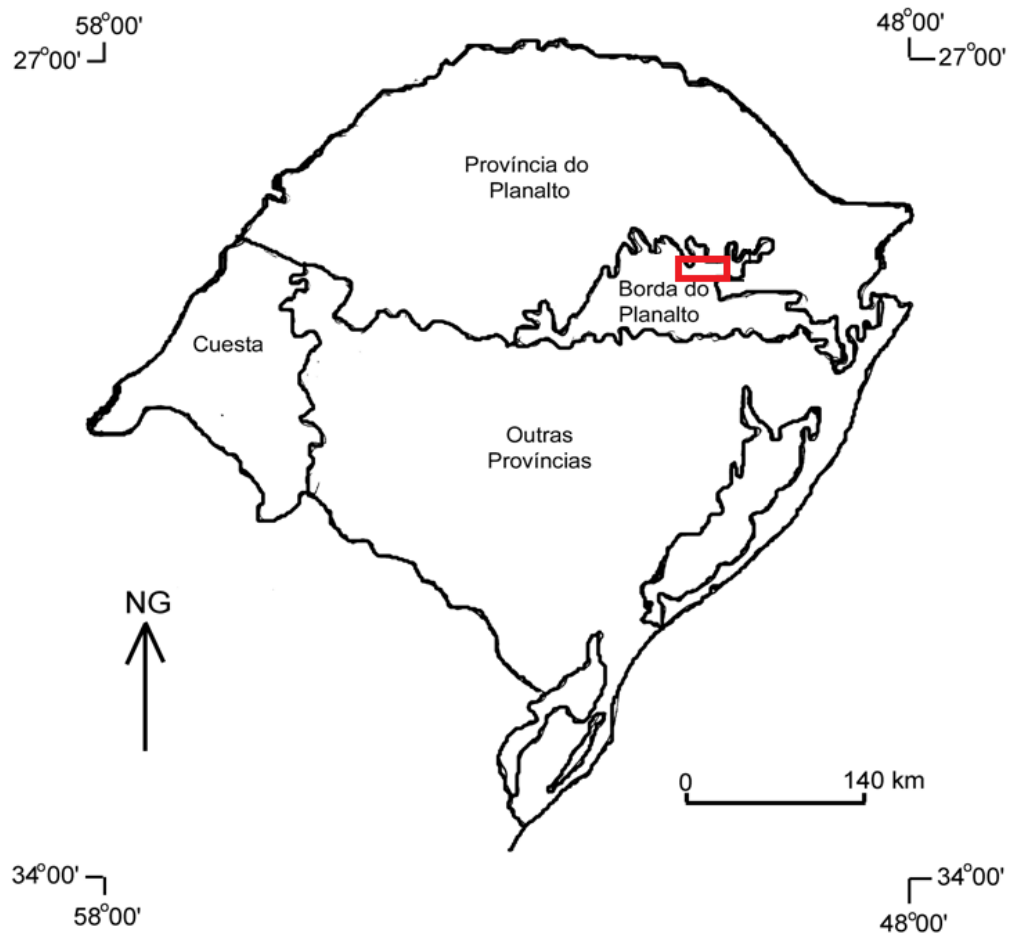
<b>BACIA DO PARANÁ</b>	
<b>AQUÍFERO BOTUCATU</b>	Vazão específica: 10-150m <sup>3</sup> /h (não-confinado) 300 a 1000 m <sup>3</sup> /h (artesiano) Transmissividade: 1,5-7,0 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /seg Coeficiente de armazenamento: 0,2 -0,05 (não-confinado) 10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-6</sup> (confinado)
<b>AQUÍFERO SERRA GERAL</b>	Vazão específica: 3,5 x 10 <sup>-3</sup> a 37,7m <sup>3</sup> /h Profundidade dos poços: 31 a 190m Permeabilidade: 10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-7</sup> m/seg STD: <300mg/l (Fe 9,8mg/l; SiO <sub>2</sub> 30mg/l)
<b>AQUÍFERO BAURU</b>	Vazão específica: 0,03-6m <sup>3</sup> /h/m STD: <200mg/l

Fonte: Rebouças (1988).

Em relação ao Estado do Rio Grande do Sul, a área de estudo está localizada na província hidrogeológica denominada de "Província Basáltica" (Figura 8). Essa província, em função das variações morfológicas, estruturais e espessura dos derrames, foi dividida em subprovíncias denominadas de: Planalto, Borda do Planalto e Cuesta (HAUSMAN, 1995).

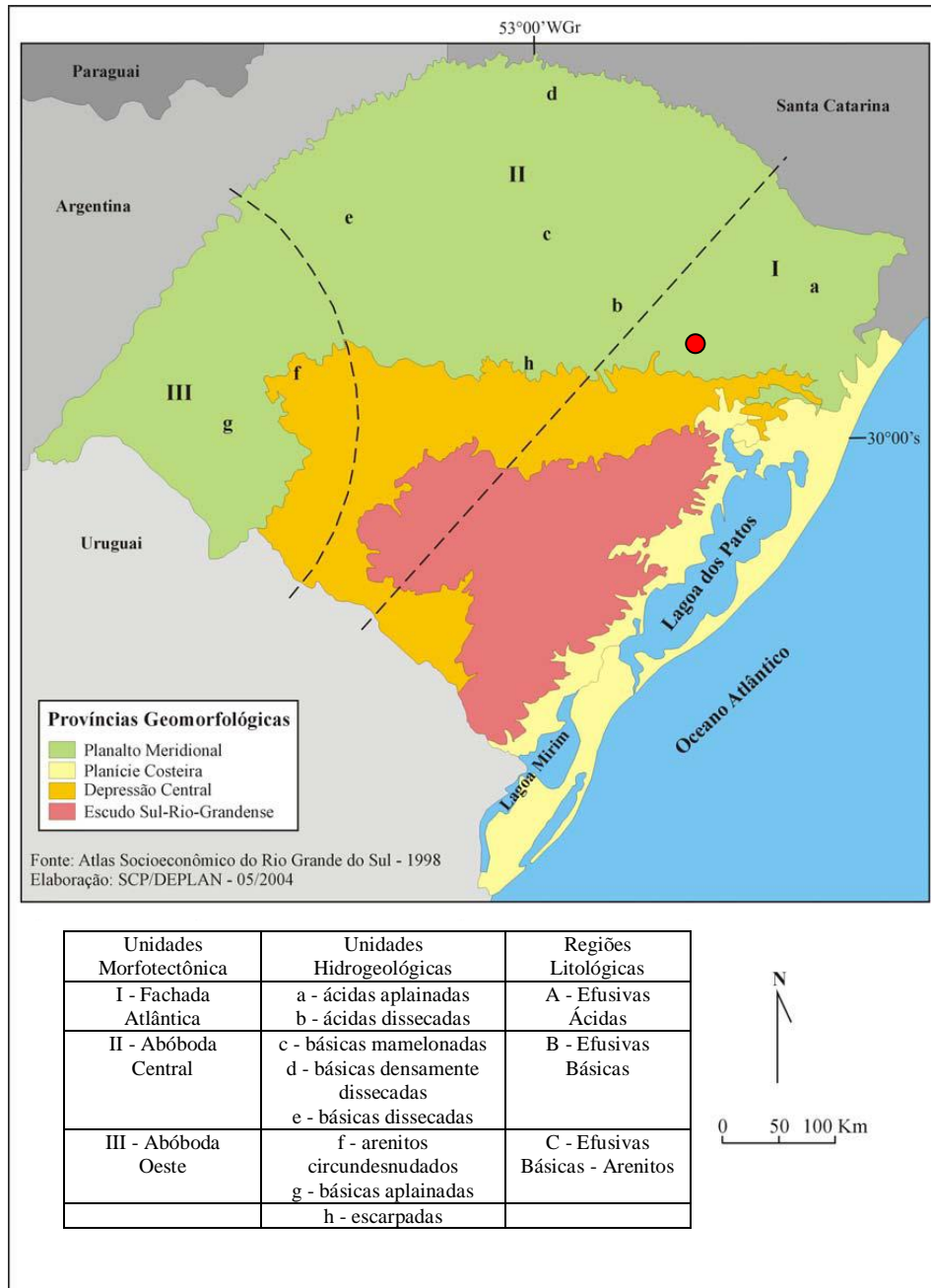
Na classificação de Lisboa (1993), a região de estudo está inserida numa unidade morfotectônica denominada de Fachada Atlântica e nas unidades hidrogeológicas denominadas ácidas aplainadas e ácidas dissecadas (Figura 9).





**Figura 8 - Classificação das províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral**

Fonte: (modificado de Hausman, 1995 apud Reginato, 2003).



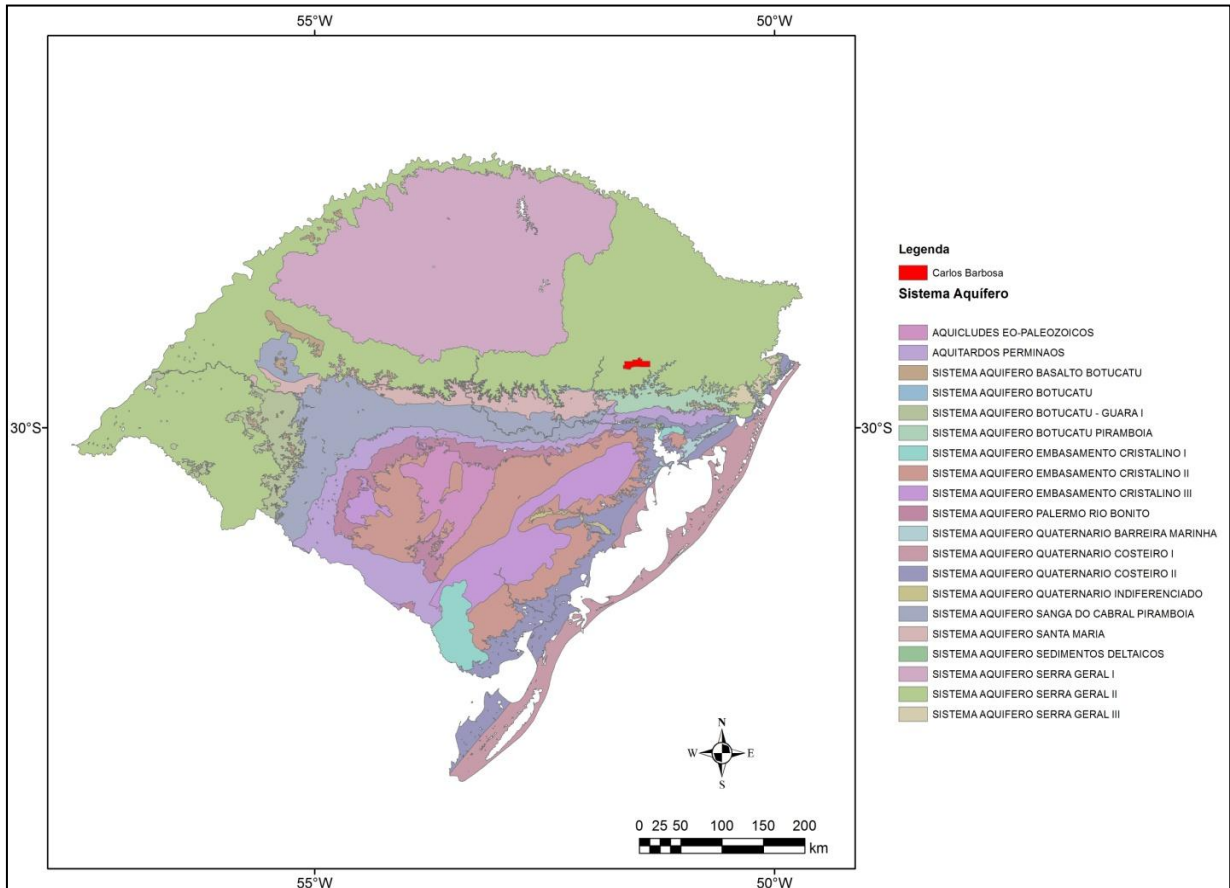
**Figura 9– Províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral**

Fonte: (Lisboa, 1996 em Machado, 2005).

Considerando a classificação do mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul elaborado a partir de Viero e Silva (2010), o local de estudo se concentra na área de ocorrência dos Aquíferos Fissurais Serra Geral, mais precisamente no Sistema Aquífero Serra Geral II, como apresenta a Figura 10.

Este sistema aquífero ocupa uma extensa área no nordeste do planalto Rio Grandense, o qual está associado com os derrames da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral. Suas litologias são predominantemente riolitos, riodacitos e em menor proporção, basaltos

fraturados. A capacidade específica é inferior a  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , entretanto, excepcionalmente em áreas mais fraturadas ou com arenitos na base do sistema, podem ser encontrados valores superiores a  $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  (MACHADO; FREITAS, 2005).



**Figura 10 - Contexto hidrogeológico da área de estudo**

Fonte: elaborado a partir de Viero e Silva (2010)

Nessas regiões hidrogeológicas, as áreas que contêm água subterrânea estão representadas por aquíferos fraturados que são condicionados por estruturas tectônicas (fraturas e falhas) e de resfriamento das rochas vulcânicas (REGINATO e GOTARDO, 1994) ou por aquíferos livres (freáticos) (REGINATO e STRIEDER, 2005).

O aquífero livre ou freático está localizado no manto de alteração existente sobre as rochas vulcânicas, sendo que as águas subterrâneas são captadas por meio de poços escavados (poços cacimba) ou através de fontes (bastante comuns na região em função da topografia). Essas águas são utilizadas para abastecimento público e no desenvolvimento de atividades agropecuárias, nas zonas rurais. O aquífero livre, embora poroso, tem um comportamento heterogêneo, dimensões reduzidas, pequena continuidade lateral, circulação localizada e grau de vulnerabilidade elevado.

Além disso, esse aquífero possui como principais condicionantes os fatores descritos na Tabela 2:

**Tabela 2 - Condicionantes do aquífero livre**

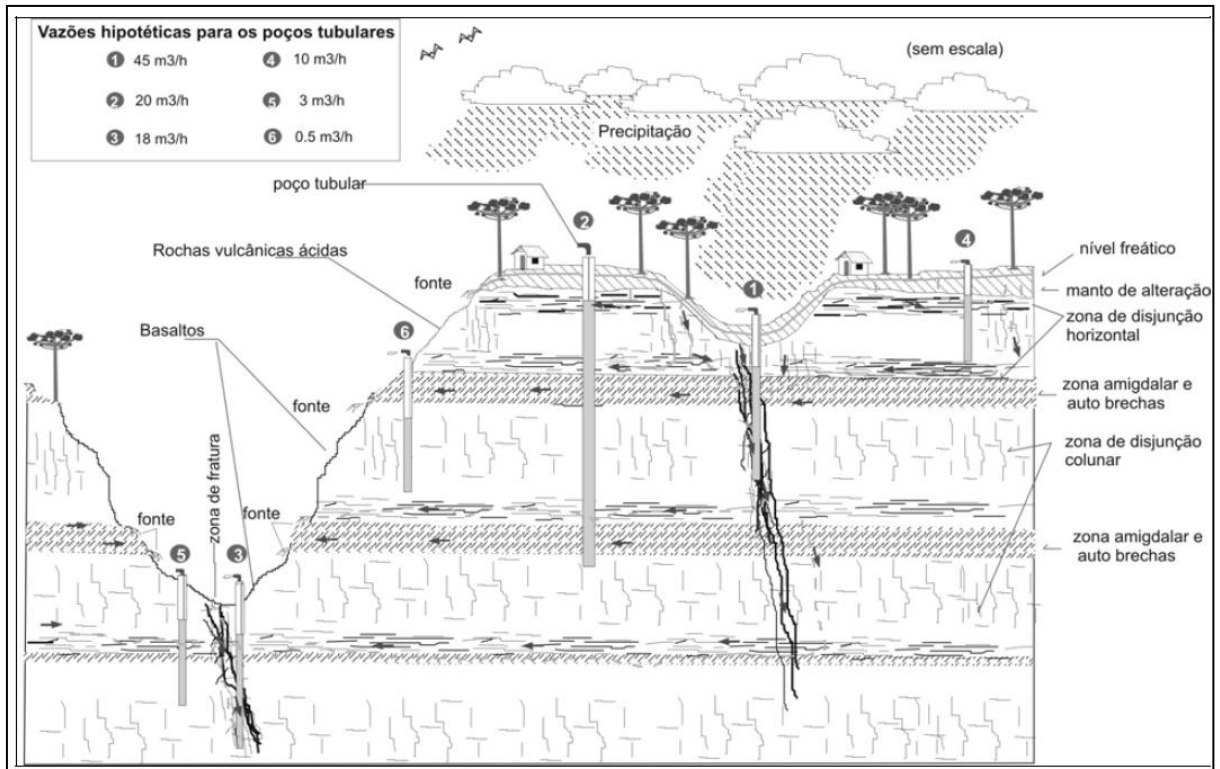
<b>Fator condicionante</b>	<b>Característica</b>
Solo (tipo e espessura)	Os solos que apresentam menores proporções de argilas e maiores espessuras, em princípio, possuem as melhores condições de armazenar e circular a água.
Geomorfologia	A geomorfologia tem uma influência direta no processo de circulação da água, pois a mesma acompanha as inclinações do terreno e do substrato rochoso. Assim, em regiões de declividade mais acentuada, onde há quebra de relevo, haverá a tendência de formação de fontes.
Substrato Rochoso	Principal fator correspondente à estruturação dos derrames de lavas, pois, em zonas maciças, a circulação da água ocorrerá entre o contato da zona de alteração e da rocha sã.
Clima	Possui uma relação direta com o volume de água que circula nesses aquíferos e também com a posição do nível estático. Dependendo do tamanho da área de recarga (microbacia) e da quantidade de precipitação sobre a mesma, haverá a formação e circulação de maiores ou menores quantidades de água subterrânea.

Fonte: Reginato e Strieder (2005)

O aquífero fraturado está localizado nas rochas vulcânicas, sendo seu principal condicionante as estruturas tectônicas. Os condicionantes secundários consistem na estruturação primária da rocha, a geomorfologia e o solo (tipo e espessura).

Esse aquífero é caracterizado como heterogêneo e descontínuo (MOBUS, 1987) e possui uma forte anisotropia, vazões variáveis, capacidades específicas e transmissividades baixas (REGINATO e STRIEDER, 2004), com as condições de armazenamento e circulação da água restritas às discontinuidades das rochas, conforme modelo conceitual de circulação apresentado na Figura 11 (DE FREITAS et al., 2012).

A anisotropia do SASG é gerada em função das estruturas das rochas vulcânicas e das estruturas tectônicas originadas quando da atuação de eventos deformacionais (ATHAYDE, 2012).



**Figura 11 - Modelo conceitual de circulação de água subterrânea no Sistema aquífero Fraturado Serra Geral**

Fonte: Nani (2012) adaptado de Freitas et al. (2000)

A heterogeneidade do aquífero fraturado se deve ao fato de que a fratura possui características pontuais, ou seja, pode apresentar valores diferenciados para o mesmo parâmetro ainda que medido na mesma fratura ou sistema de fraturas, lateral ou verticalmente (MOBUS, 1987).

A Tabela 3 apresenta as principais características hidrogeológicas do aquífero fraturado apresentadas em um estudo realizado por Reginato e Strieder (2004).

**Tabela 3 – Características hidrogeológicas do aquífero fraturado**

Características	Resultados		
Profundidade Média	110 m		
Número de Entradas de Água	1 (43,5%)	2 (39,1%)	3 ou + (17,4%)
Profundidade das Entradas de Água	Intervalo de 0 até 70 metros (76%)		
Nível Estático (NE)	0 - 10 m (66,4%)	10 - 20 m (16,4%)	>20 m (17,2%)
Transmissividades (T)	Média 0,4931 m <sup>2</sup> /h	Mínima 0,1325 m <sup>2</sup> /h	Máxima 1,4578 m <sup>2</sup> /h
Capacidades Específicas (q)	Média 0,3954 m <sup>3</sup> /h/m	Mínima 0,106 m <sup>3</sup> /h/m	Máxima 1,1663 m <sup>3</sup> /h/m
Vazões (Q)	< 10 m <sup>3</sup> /h (72,1 %)	10-20 m <sup>3</sup> /h (18,6 %)	> 20 m <sup>3</sup> /h (9,3%)

Fonte: Reginato e Strieder (2004)

A formação e a circulação da água subterrânea nesse aquífero estão diretamente relacionadas com a estruturação tectônica (presença de fraturas, zonas de fraturas) e, em segundo plano, com a estruturação primária da rocha e geomorfologia. O fluxo de água subterrânea é controlado pela densidade de fratura, geometria, conectividade e preenchimento. Além disso, os processos de superfície, tais como intemperismo, erosão e descarga podem alterar as características hidráulicas de maciços rochosos fraturados (MORTIMER et al., 2011).

Segundo Reginato e Strieder (2006), as estruturas de orientação nordeste e noroeste são as principais, sendo que o intervalo de vazão de 10 a 20 m<sup>3</sup>/h possui maior correlação com lineamentos de orientação nordeste, enquanto que vazões acima de 20 m<sup>3</sup>/h possuem maior relação com lineamentos noroeste.

Na análise detalhada das orientações, esses autores identificaram que para os lineamentos noroeste, as orientações N30 – 60W são as principais. Para as estruturas nordeste, as orientações N20 – 30E, N40 – 50E e N70 – 80E são as que possuem maior associação a aquíferos fraturados. No caso dos lineamentos norte-sul e leste-oeste, as direções N00 – 14E e N80 – 90W apresentam maior ocorrência de poços produtivos.

A forma de captação das águas subterrâneas desse aquífero ocorre por meio de poços tubulares, construídos por meio de sondas percursoras e rotopneumáticas.

Os dois sistemas de aquíferos, livre ou freático e fraturado, podem ou não apresentar conexão. No entanto, Reginato (2003) afirma que a recarga dos aquíferos fraturados tem relação com a circulação da água no manto de alteração, que, quando interceptado por sistemas de fraturas, capta essas águas, formando e alimentando o aquífero fraturado.

### **4.3 Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral**

O comportamento hidroquímico da água subterrânea de uma região depende de vários fatores sendo que a geologia e a hidrogeologia possuem uma influência direta. Entretanto, outros fatores e processos podem influenciar na característica e evolução da composição hidroquímica da água subterrânea. Conforme Santos et al. (2008), as águas subterrâneas tendem a aumentar concentrações de substâncias dissolvidas à medida que se movem lentamente pelos aquíferos.

Além disso, fatores como clima, composição da área de recarga, tempo de contato da água com o meio físico, litologias atravessadas, contaminação causada pelo homem

(SANTOS et al., 2008), reações químicas e biológicas que acontecem dentro do próprio sistema de fluxo subterrâneo e as características inerentes à água (como pH, solubilidade, agressividade, etc.) podem alterar sua composição (FEITOSA, 2000).

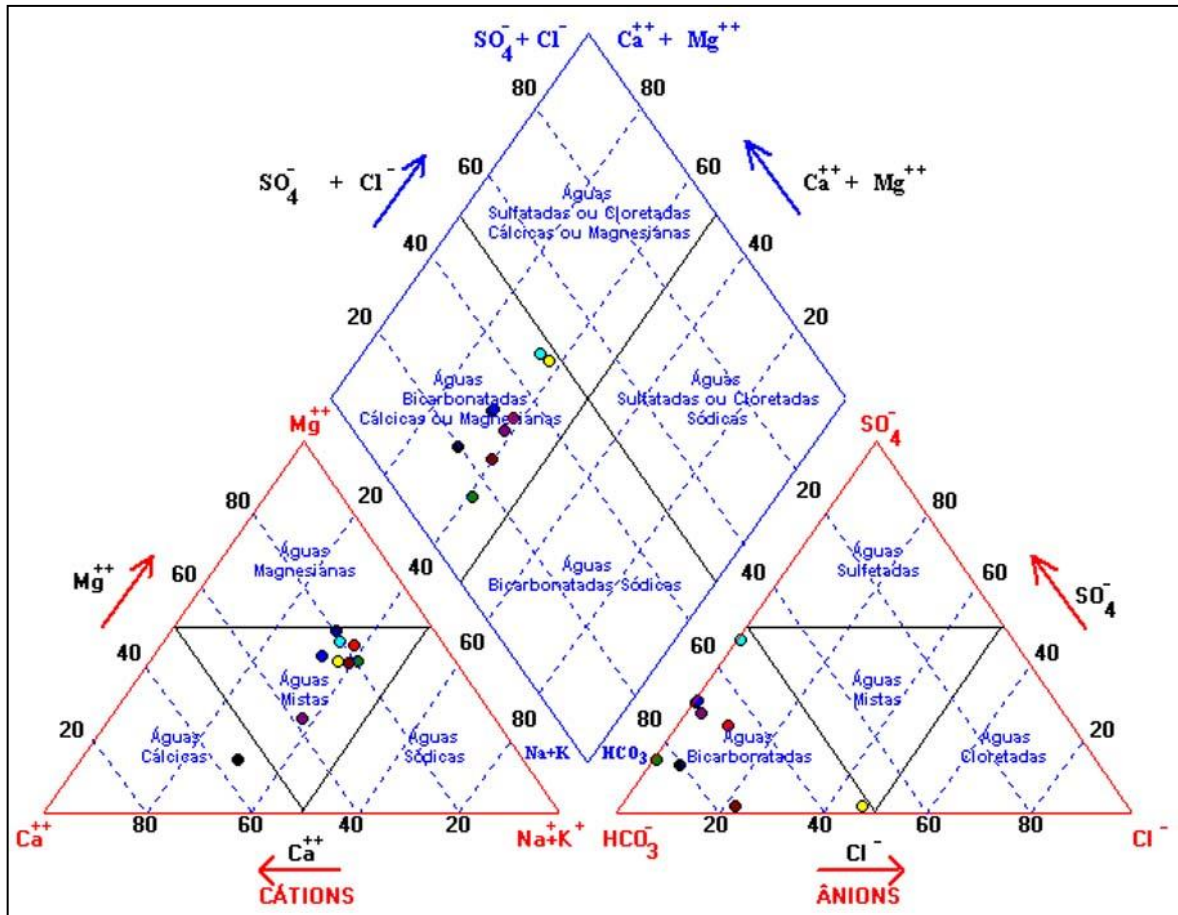
Estudos sobre hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral foram realizados por diferentes autores como Mobus (1987), Hausman (1966, 1995), Bittencourt (1978), Fraga (1992), Rosa Filho (1987), Celligoi (1994), Lisboa (1993 e 1996), Portela Filho (2002), Reginato (2003), Bittencourt (2003), Almeida (2004), Machado (2005), Scopel (2005), Betiollo (2006), Boff et al. (2006), Nanni (2008), Reginato et al. (2012), De Freitas et al. (2012), Athayde et al. (2012).

Em relação ao aquífero livre, em geral, as águas subterrâneas que ali circulam apresentam características hidroquímicas típicas de águas com baixo grau de mineralização. Como esse aquífero está localizado mais próximo à superfície, o mesmo apresenta uma maior vulnerabilidade e suas águas sofrem maior influência antrópica (REGINATO et al., 2012).

Conforme Hausman (1966), as águas subterrâneas do aquífero livre possuem pH variando entre 6 e 9,5, apresentam baixos teores de sólidos totais, alcalinidade não muito elevada e dureza abaixo de 100 mg/L.

Reginato et al. (2012), em estudo realizado em aquíferos livres da região de Veranópolis e Caxias do Sul, evidenciou que as águas desse aquífero apresentam baixa alcalinidade e menor concentração para elementos como cloretos, cálcio, magnésio, potássio e sódio e maior concentração de ferro. Essa baixa concentração, pode estar relacionada com a rápida circulação da água subterrânea, entre a zona de recarga e descarga, resultando num baixo tempo de residência.

Outra explicação pode estar relacionada à composição do solo e às interações hidrogeoquímicas que podem ocorrer nesse ambiente. Os autores também identificaram a ocorrência de um único grupo que é o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. Com base nos cátions, foi observado que a maior parte das águas são consideradas mistas, enquanto poucas são do tipo cálcicas, como apresenta a Figura 12.



**Figura 12 - Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas coletadas do aquífero livre, localizado em solos de alteração das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.**

Fonte: Reginato et al. (2012)

Já, as águas subterrâneas dos aquíferos fraturados apresentam características físico químicas diferenciadas.

Segundo Lisboa (1996), as águas dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral, estão associadas a dois campos hidrogeoquímicos principais: o “Campo das Águas Bicarbonatadas Cálceas e Calcomagnesianas” e o “Campo das Águas Bicarbonatadas Sódicas”.

Em estudo realizado na unidade Fachada Atlântica Dissecada, onde está inserida a área de estudo, o autor identificou três fácies hidrogeoquímicas:

- fácies bicarbonatada calco-sódica-magnesiânica ( $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$ ): 55,55%
- fácies mista bicarbonatada sódico-calco-magnesiânica ( $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$ ): 32,11%
- fácies bicarbonatada calco-magnesiânica-sódica ( $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$ ): 12,34%

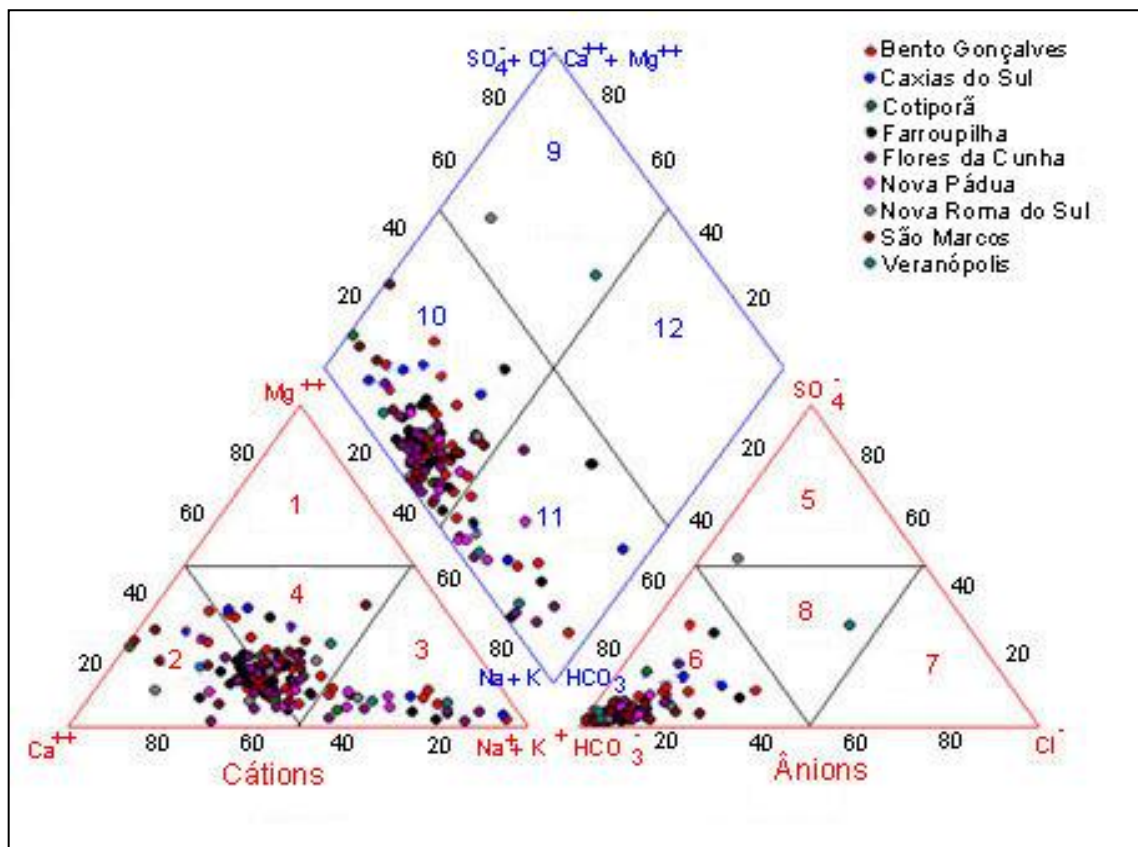


Conforme o mesmo autor, esse sistema aquífero apresenta uma estratificação hidrogeoquímica para as fácies intemperizadas. Essa estratificação é caracterizada por meio das fácies hidrogeoquímicas que mostram variações nos teores dos íons magnésio e cálcio. O condicionador geológico principal dessa estratificação é o litoquímico, com influência secundária de outros condicionantes. Para a fácie mista sódica, a estratificação é controlada por condicionantes geotectônicos, morfotectônicos, morfoestruturais e geomorfológicos (LISBOA, 1996).

Reginato (2003) efetuou uma caracterização hidroquímica baseada na análise de 137 amostras para os aquíferos fraturados, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, tendo encontrado a ocorrência de três campos principais (Figura 13):

- águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (80,2%);
- águas bicarbonatadas sódicas (18,4%)
- águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas (1,4%).

Já em relação a análise de cátions as águas subterrâneas da região estão dispostas em três campos principais: águas cálcicas (62%), águas mistas (37,6%) e águas sódicas (18,4%).



**Figura 13 - Classificação das águas subterrâneas da região nordeste**

Fonte: Reginato et. al (2003)

Segundo Reginato (2003), o campo predominante das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas está de acordo com a composição química das litologias que hospedam o sistema aquífero fraturado. Essa relação evidencia que a fonte original dos cátions  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Mg}^{+2}$  está associada com a alteração dos silicatos que constituem as rochas vulcânicas da região. O reconhecimento das águas bicarbonatadas cálcicas como sendo típicas do SASG também é mencionado por outros autores (FRAGA, 1992; CELLIGOI 1994; BITTENCOURT et al., 1978, 2003; MACHADO e FREITAS, 2005; BETIOLLO, 2006; ATHAYDE, 2012).

O campo das águas bicarbonatadas sódicas, por outro lado, não possui relação com as composições químicas provenientes do intemperismo das rochas vulcânicas, o que marca a existência de outra fonte. Conforme apresentado por Lisboa (1996), esse campo é gerado através da mistura das águas do sistema aquífero Botucatu com o sistema aquífero Serra Geral. O campo das águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas também não apresenta relação com os processos de intemperismo sobre as rochas vulcânicas, marcando, também, a existência de intercomunicação entre diferentes sistemas aquíferos.

Os autores também atribuem a composição bicarbonatada sódica de algumas águas captadas em poços com profundidades próximas a 200 metros a uma mistura com as águas de aquíferos subjacentes, a exemplo do aquífero Guarani e aquíferos paleozóicos. Na região de Santa Catarina, segundo caracterização de Almeida (2004), as águas do SASG podem ser classificadas principalmente como bicarbonatada magnesiana sódica, bicarbonatada magnesiana cálcica e bicarbonatada sódica magnesiana.

Mais recentemente, Nanni (2008) definiu seis fácies hidroquímicas no SASG no estado do Rio Grande do Sul: bicarbonatadas cálcicas; bicarbonatadas sódicas; bicarbonatadas e sulfatadas com flúor; sulfatadas sódicas; sulfatadas e sódicas fluoretadas. A área de estudo insere-se na fácies bicarbonatadas cálcicas.

Mobus (1987) desenvolveu estudos visando à correlação de alguns parâmetros químicos com dados hidrogeológicos e identificou uma relação entre o aumento do pH e o teor de sólidos totais com a profundidade da entrada de água. Esse trabalho envolveu parte da Formação Serra Geral, pois sua área de estudo está localizada na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Hausman (1995) trabalhou com os aspectos da qualidade de água subterrânea dos aquíferos da Formação Serra Geral e identificou que existem variações hidroquímicas com a

profundidade, tempo de circulação e tipo de mineralização secundária existentes nas fraturas. Para o autor, as águas subterrâneas dessa formação geológica possuem teores de sólidos totais dissolvidos não superiores a 200 mg/L. O mesmo foi identificado por Freitas et al. (2012), o qual destaca ainda que estas águas possuem também valores mais baixos de pH.

Hausman (1995) identificou ainda, correlações entre valores de pH com a profundidade; em poços com entradas de água até 150 metros foram encontrados valores de pH entre 6,5 e 7,9, enquanto que em poços com entradas de água entre 150 e 200 metros, os valores encontrados foram em torno de 9, podendo alcançar até 10,6.

#### 4.4 Isótopos estáveis

Isótopos são núclídeos com o mesmo número de prótons e diferentes números de massa devido à variação no número de nêutrons, sendo que estes podem ser divididos em estáveis e instáveis ou radioativos (SANTIAGO et al., 2008).

Os isótopos instáveis são aqueles elementos que em algum tempo serão transformados em outro, que pode ser estável ou radioativo como eles. Já os isótopos estáveis são aqueles que não se transformam em outros por decaimento radioativo. Eles são excelentes traçadores para acompanhar a água no ciclo hidrológico, a partir da formação de chuvas, durante sua permanência em superfície e na infiltração, até chegar aos aquíferos, pois os diversos estágios do ciclo imprimem neles suas marcas (FRISCHKORN, 2008).

Os isótopos mais utilizados em estudos ambientais e hidrogeológicos são o  $^{13}\text{C}$  estável e o  $^{14}\text{C}$  radiogênico; oxigênio ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ); hidrogênio (D/H); nitrato ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ); sulfato ( $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), estrôncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) e ainda o boro, cloro e lítio, entre outros. Como os isótopos estáveis de  $^{18}\text{O}$  e o deutério são partes integrantes da molécula da água, tornam-se os traçadores naturais ideais para estudos hidrogeológicos (NANNI, 2008), possibilitando a obtenção de diversos parâmetros relacionados à sua dinâmica.

Minardi (2008), explica que os isótopos  $^2\text{H}$  (deutério) e  $^{18}\text{O}$  marcam as distintas partes do ciclo hidrológico, como verdadeiras “impressões digitais”, possibilitando o conhecimento da história da água. Possuem ampla utilização na determinação e diferenciação de fontes de águas subterrâneas, como águas antigas e jovens, águas de precipitação, identificando diferentes origens e misturas entre águas subterrâneas, além de fornecer informações paleoambientais importantes a respeito da recarga destas águas subterrâneas (SCHOFIELD E

JANKOWSKI, 2004; CLARK e ARAVENA, 2005; ALEMAYEHU et al., 2010; MILLOT et al., 2011; HOSONO et al., 2011).

O oxigênio possui três isótopos  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ , enquanto o hidrogênio possui dois isótopos estáveis  $^1\text{H}$  e  $^2\text{H}$  (deutério, ou D). A composição isotópica de hidrogênio é representada pela razão D/H, e a composição isotópica de oxigênio pela razão ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), utilizando os dois isótopos de oxigênio mais abundantes  $^{16}\text{O}$  (99,796%) e  $^{18}\text{O}$  (0,204%).

As abundâncias dos isótopos estáveis são medidas por espectrometria de massa. Porém, como é difícil determinar precisamente a razão isotópica, prefere-se medir o enriquecimento ou empobrecimento de um isótopo em relação a uma amostra padrão, conforme a equação 1. O primeiro padrão utilizado internacionalmente foi a água do oceano, o SMOW (*Standard Mean Ocean Water*), definido por Craig (1961), atualmente substituído pelo padrão V-SMOW (*Viena Standard Mean Ocean Water*), uma mistura sintética de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$  e  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ , imitando o SMOW original (SANTIAGO et al., 2008).

$$\delta^{18}\text{O}_{amostra} = \left( \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{amostra}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{padr\tilde{a}o}} - 1 \right) \times 1000\text{‰ VSMOW}$$

Equação 1

Resultados positivos, como por exemplo,  $\delta^{18}\text{O}_{amostra} = +10\text{‰ VSMOW}$  significam que a amostra apresenta 10‰ ou 1% mais de  $^{18}\text{O}$  que o padrão de referência. Da mesma forma, amostras empobrecidas em relação ao padrão de referência serão expressas por exemplo como  $\delta^{18}\text{O}_{amostra} = -10\text{‰ VSMOW}$  (CLARK e FRITZ, 1997).

A evolução das águas é avaliada em função do fracionamento isotópico da mesma, resultando em diferentes razões isotópicas entre uma área e outra, ocasionada por uma série de processos, como a evaporação, absorção, difusão e uma série de reações químicas como a hidrólise de minerais presentes no arcabouço mineralógico do aquífero (DREVER, 1997).

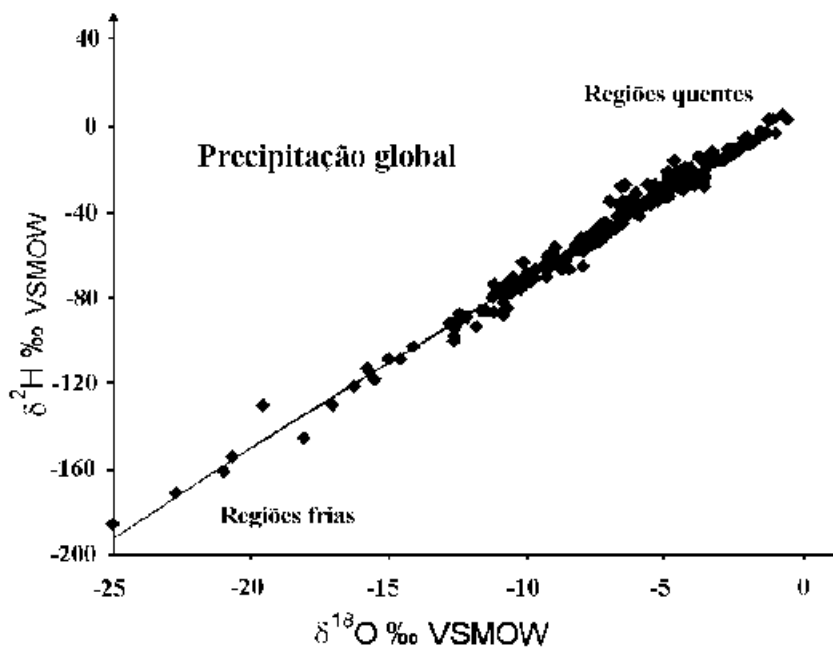
Já a razão isotópica de oxigênio e hidrogênio das águas meteóricas (precipitação) pode ser afetada por fatores como temperatura, quantidade, altitude, evaporação e continentalidade (GEYH, 2000). Em regiões localizadas em maiores latitudes, geralmente mais frias, as águas das chuvas possuem razões isotópicas mais negativas em relação às zonas equatoriais e tropicais. As regiões costeiras são mais enriquecidas em relação a regiões continentais, geralmente mais frias e com forte variação sazonal. As regiões com maior altitude recebem também chuvas mais empobrecidas (MALDANER, 2010).

Quando sujeita à evaporação, a água passa a ter um enriquecimento em isótopos pesados, sendo reconhecidas pelo  $\delta$  elevado em relação à água de origem. Durante o processo de condensação, o vapor remanescente fica progressivamente empobrecido em isótopos pesados. No início de um evento chuvoso a água é mais pesada (valores mais elevados de  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$ ) do que no final, e chuvas intensas são mais pesadas do que chuvas abundantes devido ao efeito de quantidade (SANTIAGO et al., 2008).

Craig (1961), analisando mais de 400 amostras coletadas mundialmente observou que os valores de  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$  de águas meteóricas são linearmente relacionados de acordo com a equação definida como reta meteórica global (GMWL - *Global Meteoric Water Line*), apresentada na equação 2, sendo possível distinguir as regiões quentes e frias, como mostra a Figura 14.

$$\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$$

Equação 2



**Figura 14 - Reta meteórica mundial mostrando a relação entre  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$  na chuva. Os valores mais enriquecidos em  $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$  são representativos da precipitação nas regiões mais quentes do mundo (Silveira 2002, modificado de Clark e Fritz, 1997).**

Em 1993, Rozanski et al. publicaram a reta meteórica global corrigida para VSMOW, com base em dados a rede GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*) da IAEA

(*Internacional Atomic Energy Agency*) e WMO (*World Meteorological Organization*), sendo esta apresentada na equação 3.

$$\delta D = 8,17 (\pm 0,07) \delta^{18}O + 11,27 (\pm 0,65) \text{‰ (VSMOW)}$$

Equação 3

Os primeiros estudos com isótopos ambientais em uso hidrológico no Brasil datam do final da década de 60 e início da década de 70 e tiveram como alvos principais o Nordeste brasileiro, a Amazônia e posteriormente a região Sudeste, basicamente o aquífero Botucatu (SILVEIRA e SILVA JUNIOR, 2002). Kimmelmann et al. (1988), utilizaram isótopos para caracterizar este aquífero, identificando que a origem da água subterrânea era por infiltração da precipitação nas áreas aflorantes. Esta conclusão foi subsidiada pelo fato das amostras de água subterrânea caírem em uma reta muito próxima da reta meteórica mundial para  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$ .

Com o aumento do tempo de residência no aquífero (aumento das condições confinantes), as águas ficam mais mineralizadas (KIMMELMANN et al., 1986). Neste contexto os isótopos também indicaram uma gradação entre as águas de menor confinamento (valores de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  menos negativos) para as de maior confinamento (valores de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  mais negativos, mais depletados) sugerindo a existência variações climáticas pretéritas (KIMMELMANN et al., 1986).

Alguns estudos sobre isótopos foram desenvolvidos principalmente no estado de São Paulo, como os trabalhos de Dias (2005), Viviani-Lima (2007), Martins (2008) e Maldaner (2010) utilizados geralmente no estudo de recargas das bacias paulistas.

Estudos isotópicos também foram usados para caracterização hidroquímica de aquíferos (SILVA et al., 1985, KIMMELMANN et al., 1986; KIMMELMANN et al., 1988). Isótopos ambientais (estáveis,  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$ , e trítio ambiental) foram analisados para permitir a distinção entre águas dos aquíferos Bauru e Serra Geral, origem e processos de recarga e determinação de tempo de trânsito (idade), possibilitando definir a fonte de recarga das águas subterrâneas, identificando que esta ocorre localmente.

Stradioto e Kiang (2010) avaliando as águas subterrâneas do município de Rio Claro, identificaram que águas apresentam as mesmas características isotópicas das águas de chuva, confirmando que as águas do aquífero são mais jovens, tendo sua origem a partir de águas meteóricas.

Isótopos ambientais (estáveis,  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$ , e trítio ambiental) foram usados por Minardi et al. (2008) em análises para permitir a distinção entre águas dos aquíferos Bauru e Serra

Geral em Araguari, a determinação de sua origem, processos de recarga e tempo de trânsito (idade). Os autores observaram a ocorrência do efeito de altitude na concentração dos isótopos estáveis entre um conjunto de poços situado na Formação Bauru e outro situado em cota cerca de 300 metros inferior, na Formação Serra Geral. Os autores encontraram um empobrecimento médio de -0,43‰ por cada 100 metros de aumento da altitude para os poços, valor semelhante ao esperado nas águas de precipitação considerando-se que o tempo de renovação das águas subterrâneas é rápido e a recarga ocorre localmente.

Nanni (2013) utilizou isótopos de hidrogênio e oxigênio a fim de identificar padrões isotópicos no Sistema Aquífero Serra Geral e fazer comparações com os dados do Sistema Aquífero Guarani e águas meteóricas. O autor mostrou que ocorrem diferenças na distribuição espacial da razão isotópica entre os aquíferos que podem ser explicadas pela interferência de diferentes estruturas tectônicas como fraturas, que associadas às zonas de alta pressão no aquífero Guarani, promovem uma recarga ascendente das águas subterrâneas, mostrado também por Rosa Filho (2007) em seu estudo isotópico do Aquífero Guarani na região do Paraná, São Paulo e Uruguai.

Os métodos isotópicos podem se revelar muito importantes, mas não substituem a associação com técnicas convencionais consagradas, em particular como a hidrogeoquímica dos corpos hídricos, como salienta Minardi et al. (2008). Ainda assim, o método isotópico pode ser considerado uma técnica de investigação direta e, portanto, os resultados obtidos tendem a ser mais confiáveis do que aqueles oriundos de técnicas em que os parâmetros de interesse são determinados de forma indireta e os fatores que determinam a exatidão dos resultados são diferentes daqueles que influem nas técnicas convencionais. Deste modo, a comparação entre resultados tende a enriquecer o conhecimento global do meio em estudo.

## 5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento desse estudo envolveu a realização de diferentes etapas relacionadas com o levantamento de dados existentes, seleção de poços, caracterização geológica, estrutural, hidrogeológica, hidroquímica e avaliação isotópica.

### 5.1 Levantamento de dados existentes, inventário e cadastramento de pontos de captação

O levantamento de dados de poços existentes na área de estudo foi realizado através da coleta de informações no banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e na Companhia de Saneamento do Estado do Rio Grande do Sul (CORSAN).

O objetivo da realização do levantamento foi identificar informações sobre poços existentes na região e dados sobre a localização (coordenadas geográficas e/ou UTM), o uso da água subterrânea, as características construtivas, a geologia (perfil geológico dos poços), a hidrogeologia (testes de bombeamento, análises químicas, parâmetros hidrodinâmicos e dados de produção).

As informações obtidas com o levantamento foram utilizadas na elaboração de um banco de dados do projeto, visando com isso facilitar o acesso e a interpretação dos dados, bem como a geração de novos produtos (mapas e gráficos). O banco de dados foi gerado com o uso do *software* Visual Poços 1.0 da *Waterloo Hydrogeologic* (SCHLUMBERGER, 1998).

Para o inventário e cadastramento dos pontos de captação foram realizados levantamentos de campo que tiveram como objetivo identificar os pontos de captação (poços tubulares, poços escavados, fontes), e checar as informações obtidas com o levantamento inicial. Todos os dados obtidos com essa atividade foram inseridos no banco de dados do projeto.

### 5.2 Seleção de Poços Tubulares

Com base nos dados disponíveis no banco de dados do projeto foi realizada a seleção de poços tubulares utilizados na caracterização geológica, hidrogeológica e hidroquímica.

Os critérios utilizados na seleção dos poços estavam relacionados com a existência e confiabilidade dos seguintes dados: perfil construtivo do poço, perfil geológico, informações sobre a profundidade das entradas de água, relatórios de análises físico-químicas das águas



subterrâneas. Também considerou-se a acessibilidade e a existência de torneiras externas para coleta de água subterrânea que foi realizada diretamente no poço.

### **5.3 Caracterização Geológica e Estrutural**

A caracterização geológica regional foi realizada com base na interpretação de mapas geológicos disponíveis para a região, mapas pedológicos, cartas topográficas e relatórios com informações sobre a área. A avaliação geológica detalhada foi feita com base na interpretação dos perfis geológicos de 15 poços. Nessa etapa identificou-se as principais litologias vulcânicas e a relação dessas litologias com as entradas de água nos poços.

Além disso realizou-se um levantamento de campo para avaliação dos diferentes tipos de rochas vulcânicas e estruturas existentes nos diferentes derrames. Esse levantamento foi realizado em afloramentos localizados ao longo de perfis que possuíam orientações norte-sul e leste-oeste e que cortavam diferentes partes do relevo (regiões mais baixas e altas).

A caracterização estrutural foi realizada com base na interpretação de produtos de sensoriamento remoto (imagens de radar e fotografias aéreas) e de modelos digitais de elevação do terreno. Esses produtos foram utilizados na identificação dos lineamentos morfo-estruturais<sup>1</sup> existentes na região. A identificação dos diferentes tipos de estruturas, suas características geométricas e a existência de preenchimento foi realizado através de atividades de campo.

Para avaliação da existência do controle estrutural sobre os poços tubulares foi elaborado um mapa com os lineamentos e a localização dos poços tubulares existentes na região, utilizando-se o software ArGis 10.2 (ESRI, 2013). Para composição do mapa de densidade de fraturas, utilizou-se o método de densidade de Kernel, disponível no referido programa. Para isso a região abrangida foi dividida em células com dimensões iguais de 10000 m<sup>2</sup>, onde contabilizou-se o número de fraturas que estavam inseridas em cada célula. Com isso foi possível gerar um mapa de densidade de fraturas contendo a delimitação de regiões com baixa (0-1 fratura), média (1 a 3 fraturas) e alta (acima de 3 fraturas).

### **5.4 Caracterização Hidrogeológica**

A caracterização hidrogeológica regional foi realizada com base na interpretação de dados disponíveis para a região, como mapas hidrogeológicos, artigos, trabalhos e relatórios

---

<sup>1</sup> Mobus (1987) descreve lineamento como toda feição retilínea, ou curva, composta por elementos de drenagem e/ou relevo, que apresenta um comprimento igual, ou superior a 1 quilômetro.

publicados. A avaliação hidrogeológica detalhada foi realizada com base na interpretação de dados disponíveis para os poços cadastrados e selecionados. A análise desses dados permitiu identificar diferentes informações como: nível estático dos poços, nível dinâmico, parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade e capacidade específica) e vazão, possibilitando a elaboração de gráficos e caracterização hidrogeológica da área de estudo. Estas informações são disponibilizadas no Anexo A, que apresenta o cadastro de poços tubulares da região.

Além disso, as informações dos perfis construtivos dos poços selecionados para análise hidroquímica permitiu identificar o número de entradas de água existentes e a profundidade das mesmas. A avaliação das entradas de água foi utilizada para comparação com os dados hidroquímicos e criação de seções e perfis geológicos realizadas no programa Visual Poços, baseados nos dados de perfis construtivos disponíveis semelhantes aos apresentados na Figura 15.

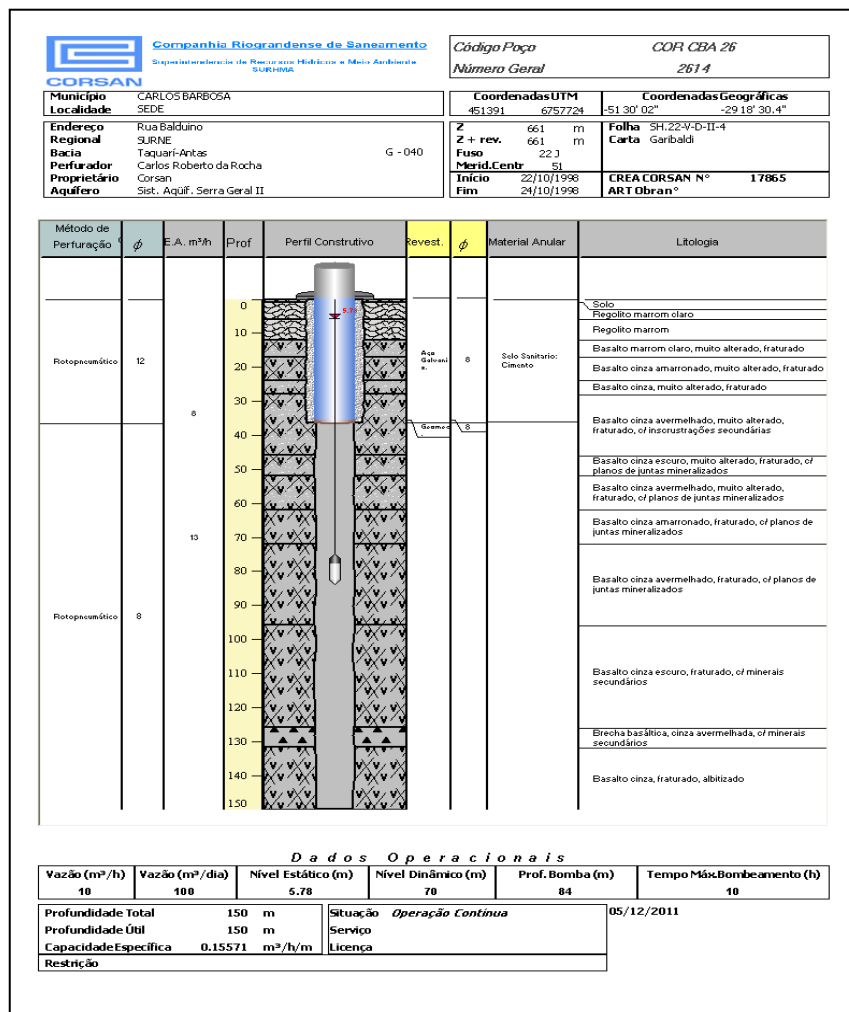


Figura 15 - Perfis Construtivos dos poços tubulares

## 5.5 Caracterização Hidroquímica e Avaliação Isotópica

A avaliação hidroquímica foi realizada utilizando dados hidroquímicos disponíveis para os poços identificados na região e dados de análises físico-químicas realizadas em amostras de água subterrânea coletadas nos poços selecionados.

### 5.5.1 Amostragem e análises laboratoriais

A análise detalhada foi realizada em 12 poços tubulares cuja seleção esteve embasada nos seguintes critérios: poços atualmente em funcionamento, número de entradas de água e seus intervalos, altitude de localização do poço, altitude e litologia da entrada da água, além de padrões hidroquímicos observados nos dados disponíveis, como por exemplo, os resultados obtidos no gráfico de Schoeller de poços que já possuíam análise da água subterrânea. Alguns dos poços tubulares amostrados são apresentados na Figura 16.



CBA 18



CBA19



CBA34



CBA05A

**Figura 16 - Exemplos dos poços utilizados para amostragem em campo**

Além dos poços tubulares foram selecionadas 3 fontes para complementação do estudo, buscando identificar correlações entre a hidroquímica e assinatura isotópica entre os aquíferos que fazem parte do Sistema Aquífero Serra Geral. Uma das fontes amostradas é apresentada na Figura 17.



**Figura 17 - Fonte de encosta utilizada para amostragem de água**

A coleta das amostras de água subterrânea foi realizada utilizando o sistema de bombeamento do poço, sendo a bomba acionada e mantida ligada por pelo menos 10 minutos. Após esse tempo, foi realizada a coleta das amostras de água, na saída da tubulação ligada a bomba. Para cada ponto foram coletadas amostras, contendo preservante ( $\text{HNO}_3$ ) e enviadas para análise dos parâmetros ferro, bicarbonatos, manganês, fluoretos, alcalinidade, cloreto, sulfato, cálcio, magnésio, sódio e potássio.

Parâmetros como pH, condutividade e temperatura e sólidos dissolvidos totais foram determinados em campo, utilizando uma sonda multiparâmetros HORIBA U50. Todas as amostras foram acondicionadas em caixas de isopor, mantidas refrigeradas e transportadas, no mesmo dia da coleta, para o laboratório onde foram realizadas as análises. A Tabela 4 apresenta a metodologia usada pelo laboratório para os parâmetros analisados.

**Tabela 4 - Metodologias analíticas utilizadas na análise das amostras de água**

<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia Utilizada</b>
Alcalinidade total (mg/L)	SMEWW* - Método 2320B
Bicarbonatos (mg/L)	SMEWW - Método 2320B
Cloretos (mg/L)	SMEWW - Método 4500 Cl-B
Sulfatos (mg/L)	SMEWW - Método 4500 SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> B
Fluoretos (mg/L)	SMEWW - Método 4500 F B
Ferro total (mg/L)	SMEWW - Método 3030 E e 3111B
Mangânês total (mg/L)	SMEWW - Método 3030 E e 3111B
Magnésio (mg/L)	SMEWW - Método 3030 E e 3111B
Cálcio (mg/L)	SMEWW - Método 3030 E e 3111B
Sódio (mg/L)	SMEWW - 3500 Na - B
Potássio (mg/L)	SMEWW - 3500 K - B

\*SMEWW: Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (2012), 22<sup>a</sup> edição

A coleta para análise hidroquímica foi realizada duas vezes, uma no mês de abril e outra em julho de 2013. As análises de campo foram realizadas no período de abril a novembro. No entanto a avaliação de parâmetros como pH, condutividade e temperatura e sólidos dissolvidos totais foi realizado mensalmente durante o período de abril a novembro.

A avaliação isotópica foi realizada em diferentes amostras provenientes da água da chuva (1 ponto), fontes (3 pontos) e poços tubulares, 12 pontos que são os mesmos escolhidos para a análise hidroquímica. A coleta dessas amostras teve periodicidade mensal (de abril a novembro), sendo que a água da chuva foi avaliada com o objetivo de estabelecer a reta meteórica local. As amostras para análise de isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio, foram coletadas em frascos de vidro âmbar de 10 mL, lavados três vezes com a própria amostra com filtração, sem adição de preservantes. Todos os frascos foram tampados, garantindo que não existisse nenhuma bolha de ar no interior, evitando o fracionamento da amostra.

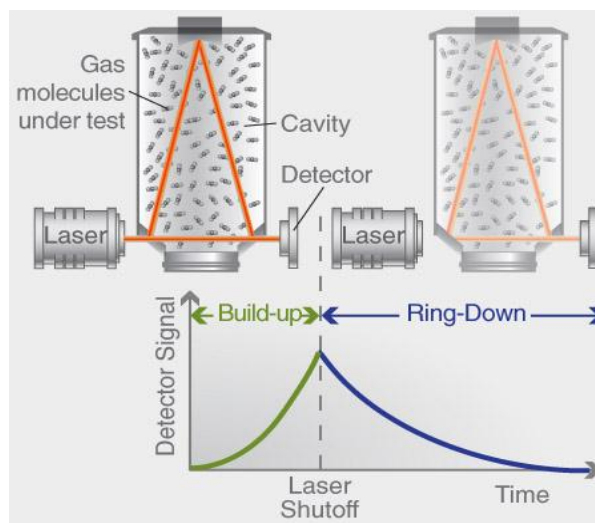
A coleta da água da chuva foi realizada através de pluviômetro convencional localizado no laboratório da CORSAN em Carlos Barbosa. Dados relativos à precipitação foram retirados do banco de dados Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

As análises isotópicas de <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O e <sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H foram realizadas pelo Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília – LAIS/IG/UnB. O laboratório é equipado com analisador de isótopos Picarro - L2120-i – H<sub>2</sub>O, utilizado para a determinação das razões isotópicas de oxigênio e deutério, através da metodologia *Cavity Ringdown Spectrometer* (CRDS), cuja tradução significa Espectroscopia de Cavidade



Ressonante do tipo Ringdown, sendo o mais recente desenvolvimento da Espectroscopia de Absorção a Laser de Diodo Sintonizável (EALDS).

O CRDS baseia-se na medida da taxa de decaimento da intensidade da luz dentro da cavidade de medida. Quando uma quantidade suficiente de luz é injetada dentro da cavidade por uma fonte de laser contínua, a entrada de luz é interrompida e o decaimento da luz armazenada é transmitida para fora da cavidade por meio de um dos seus três espelhos, sendo então medida por um fotodetector, conforme mostra a Figura 18.



**Figura 18. Cavidade de medida do CRDS**

Fonte: Busch (1997)

Utilizando-se um *auto sampler* programável e uma seringa de cromatografia líquida de 5 $\mu$ L ou 10 $\mu$ L, injeta-se 1 $\mu$ L de amostra de água em um vaporizador a 110°C. Após a vaporização da amostra, um fluxo de gás nitrogênio de alta pureza carrega a amostra até a cavidade de medida, que se encontra a uma pressão sub atmosférica de 35torr, onde é realizada a medida simultânea do  $\delta$  D e  $\delta$  <sup>18</sup>O por meio de um laser de comprimento de onda fixo e específico para a ligação H–O. Cada amostra é injetada e analisada de 4 a 6 vezes, no qual descarta-se o primeiro valor medido para que seja minimizado o efeito memória. Em cada corrida os padrões internacionais VSMOW, GISP e SLAP são medidos para que os valores medidos possam ser corrigidos de acordo com as normas da *International Atomic Energy Agency (IAEA)*.

As razões isotópicas de oxigênio (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) e hidrogênio (H/D) são expressas como a diferença entre a razão medida na amostra e a razão de um padrão de referência, utilizando-se a notação delta ( $\delta$ ). Os valores de  $\delta$ 18O e  $\delta$ D são expressos em partes por mil (‰), em relação ao VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water), padrão de referência aceito internacionalmente.

### 5.5.2 Métodos de análises dos resultados

Os resultados das análises químicas e isotópicas foram reunidos num banco de dados hidrogeoquímico no software AcquaChem 5.1 da *Schlumberger Water Service* (SCHLUMBERGER, 2003). A partir do banco de dados estruturado foram empregados os métodos interpretativos apresentados na Tabela 5. A avaliação dos relatórios analíticos foi feita com base na seleção dos parâmetros analisados e no erro cometido nas análises, utilizando a equação do Cálculo do Erro pelo Balanço Iônico (Equação 4).

$$Erro = \frac{\sum \hat{Anions} - \sum \hat{Cations}}{\sum \hat{Anions} + \sum \hat{Cations}} \times 100$$

Equação 4

onde, a  $\sum \hat{anions}$  ou  $\sum \hat{cations}$  representam a somatória das concentrações dos ânions e cátions, respectivamente em miliequivalente por litro (meq/L).

Os parâmetros hidroquímicos e isotópicos foram comparados com as profundidades das entradas da água, visando com isso identificar diferenças ou semelhanças no padrão hidroquímico dessas águas.

**Tabela 5 - Métodos a serem empregados na análise de dados hidroquímicos**

Métodos interpretativos	
Métodos Estatísticos	Métodos Gráficos
Estatística Descritiva (Univariada) Teste não - paramétrico: Kruskal-Wallis Análise de agrupamentos ("Cluster Analysis")	Diagrama Binários Diagrama de Stiff (STIFF, 1951) Diagrama de Schoeller (SCHOELLER, 1935) Diagrama de Piper (PIPER, 1944)

As análises gráficas são úteis na caracterização hidroquímica da região. O diagrama de Stiff apresenta, de maneira distintiva, as principais características hidroquímicas de uma amostra, enquanto o diagrama de Piper representa uma ferramenta bastante consistente na análise de conjuntos de dados possibilitando a distinção de grupos hidroquímicos e a avaliação da evolução hidroquímica ocorrida em determinado aquífero, função de processos hidroquímicos ocorridos ou da ocorrência de misturas de águas. Outro diagrama é o de Schoeller que também permite identificar grupos de amostras através da análise de cátions e ânions.

Como forma de auxiliar na determinação das relações entre as litologias constituintes dos aquíferos e o quimismo das águas subterrâneas, foram calculadas as razões iônicas ou

índices hidrogeoquímicos, que podem indicar um certo relacionamento entre o litotipo e a água. As variações das razões iônicas de  $Mg^{+2}/Ca^{+2}$ ,  $K^+/Na^+$ ,  $Na^+/Ca^{+2}$ ,  $Na^+/Ca^{+2}+Mg^{+2}$  possibilitam indicar a preponderância de determinado elemento sobre os outros elementos, em função, por exemplo, da composição mineralógica das rochas do sistema aquífero.

Para a compreensão da hidroquímica de determinado grupo de amostras, foi analisado o comportamento e a distribuição de determinada variável dentro do conjunto de amostras através de análise estatística e testes não-paramétricos. Nesta pesquisa utilizou-se o teste estatístico não paramétrico de Kruskal-Wallis, a um nível de significância de 5%, a fim de avaliar diferenças entre os pontos coletados, a partir dos parâmetros hidroquímicos analisados. Tal teste foi aplicado pela amostra ser pequena e pelas suposições exigidas pela Análise de Variância como normalidade não terem sido atingidas.

Uma segunda análise estatística consistiu na análise de agrupamentos (*cluster analysis*) a qual utiliza a similaridade entre indivíduos para classificá-los hierarquicamente em grupos, considerando o conjunto de variáveis utilizadas para cada indivíduo. Isso possibilitou definir poços com as mesmas características comparando-os com as diferentes profundidades de entradas d'água.

Segundo Vicini e Souza (2005), a técnica de análise de agrupamento hierárquico tem como objetivo agrupar os elementos verificados em grupos que possuem homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os outros grupos, propondo classificações. Dentro de um grupo, os objetos podem ser considerados semelhantes e, por sua vez, distintos aos que encontram-se fora do mesmo.

Para o agrupamento destes indivíduos é necessário definir uma medida de distância de similaridade ou de dissimilaridade. Albuquerque (2005) cita que as distâncias mais utilizadas em análises de agrupamentos são: distância euclidiana, distância euclidiana quadrada; distância euclidiana ponderada; e distância de Mahalanobis.

O método utilizado no presente estudo utilizou-se a distância Euclidiana como medida de similaridade, e considera que a distância entre dois casos ( $d_{ij}$ ) é a raiz quadrada do somatório dos quadrados das diferenças entre valores de  $i$  e  $j$  para todas as variáveis ( $v = 1, 2, \dots, p$ ). A Equação 5 apresenta a equação utilizada para encontrar a distância de similaridade.

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{v=1}^p (x_{iv} - x_{jv})^2}$$

Equação 5



onde:  $X_{i\nu}$  representa a característica do indivíduo  $i$ ;  $X_{j\nu}$  representa a característica do indivíduo  $j$ ;  $p$  é o número de parcelas na amostra; e  $\nu$  é o número indivíduo na amostra.

Nesta abordagem quanto menor a distância, mais similares são as observações (FÁVERO et al., 2009). O processamento das informações foi efetuado utilizando-se o software SYSTAT, versão 12.0 (SYSTAT, 2007). Para se eliminar o efeito de escala e unidades, a padronização dos dados processados foi realizada com a conversão das variáveis para escores padrão ( $Z$  escore). O algoritmo de agrupamento empregado foi o método *Ward*, o qual busca agrupar os agregados que apresentam menor soma dos quadrados entre dois agrupamentos, calculada sobre todas as variáveis. Este método já foi empregado por diversos autores na análise de dados hidroquímicos e hidrogeológicos (GÜLER et al. 2002; ALMEIDA, 2009; MONTEIRO et al., 2010; FERNANDES, 2010).

O ponto de corte do dendrograma, para definir o número de grupos fundamentou-se na técnica apresentada por Corrar et al.(2009) em que o corte ocorre no momento em que a distância reescalada do coeficiente de aglomeração apresenta a maior variação.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Caracterização geológica da área de estudo

A partir dos levantamentos realizados, por referencial bibliográfico e em campo, foram distinguidas a ocorrência de dois tipos principais de litologias: basaltos do tipo Gramado e vulcânicas ácidas do tipo Palmas/Caxias.

A análise das rochas e estruturas observadas em cada um dos afloramentos observados em campo permitiu a identificação da ocorrência de sete tipos de derrames vulcânicos, sendo dois básicos e cinco ácidos, conforme dados apresentados na Tabela 6 e nos perfis geológicos da Figuras 19 a 22.

**Tabela 6 - Tipos de Rochas e Derrames identificados na área e suas altitudes aproximadas**

<b>Altitude (Aproximada)</b>	<b>Rocha</b>	<b>Derrame</b>
<b>&gt; 698</b>	Riodacito	Derrame Ácido 5
<b>649 a 698</b>	Riolito / Dacito	Derrame Ácido 4
<b>620 a 649</b>	Riodacito	Derrame Ácido 3
<b>561 a 620</b>	Riodacito	Derrame Ácido 2
<b>500 a 561</b>	Riolito	Derrame Ácido 1
<b>445 a 500</b>	Basalto	Derrame Básico 2
<b>até 445</b>	Basalto	Derrame Básico 1

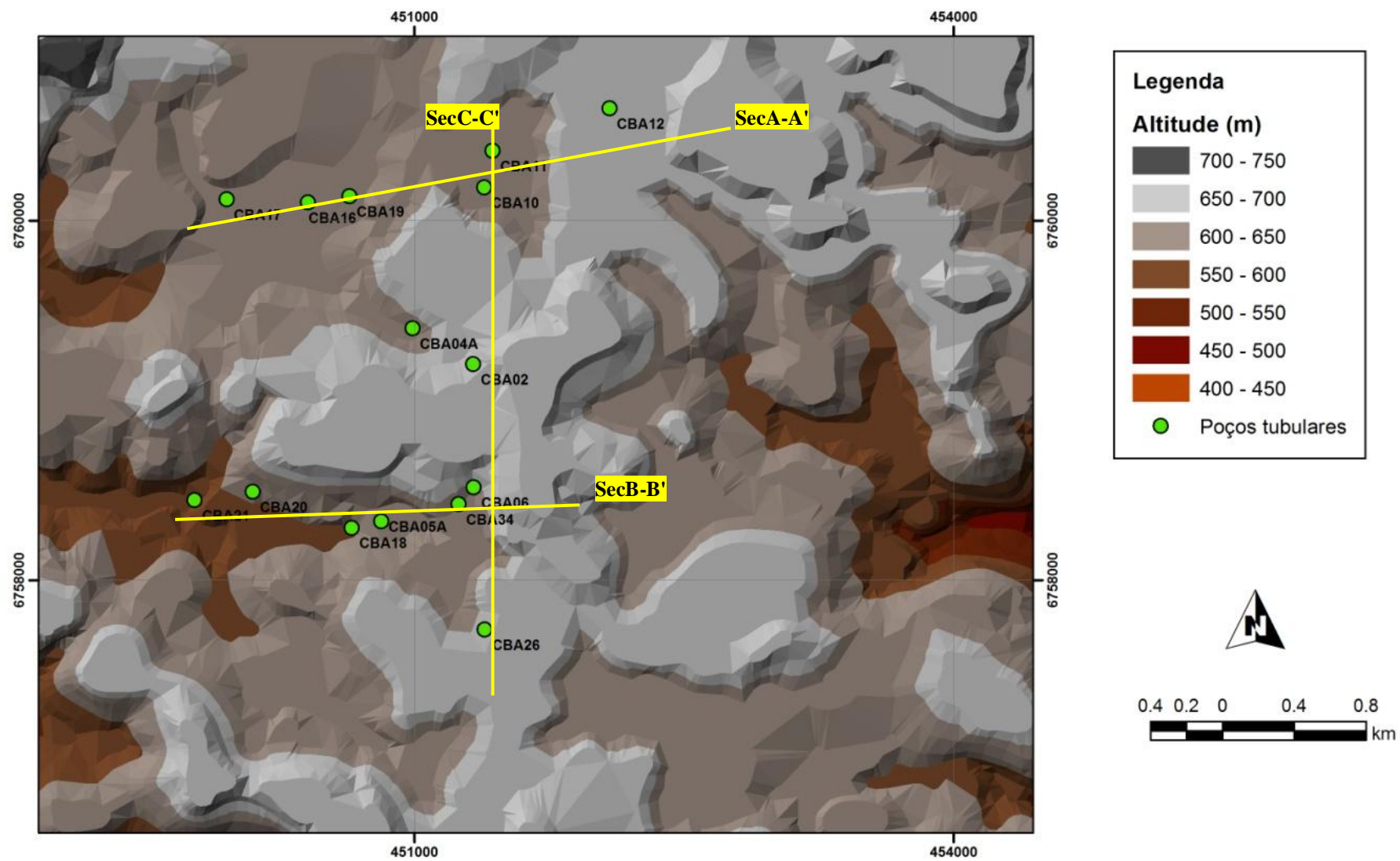


Figura 19 - Poços e seções utilizadas para caracterização geológica da área de estudo

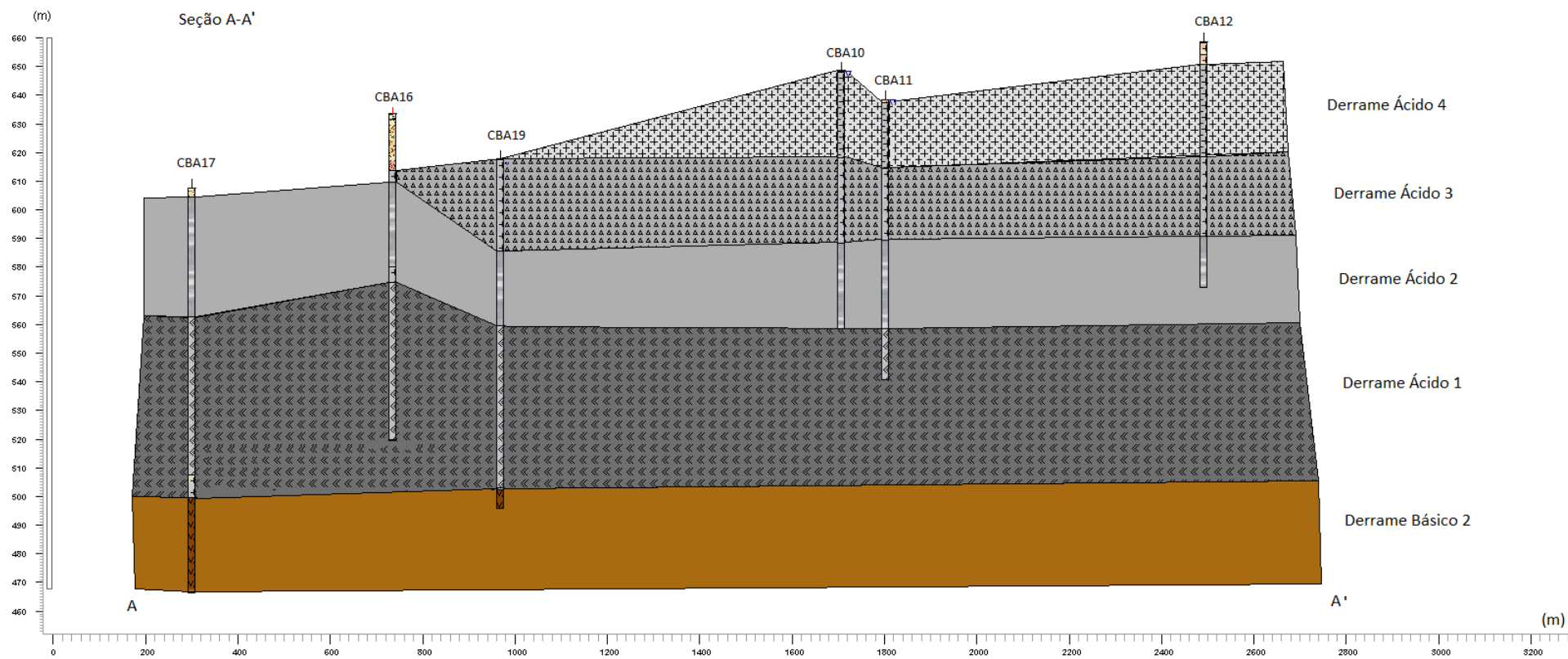


Figura 20 - Seção obtida do perfil geológico A-A'

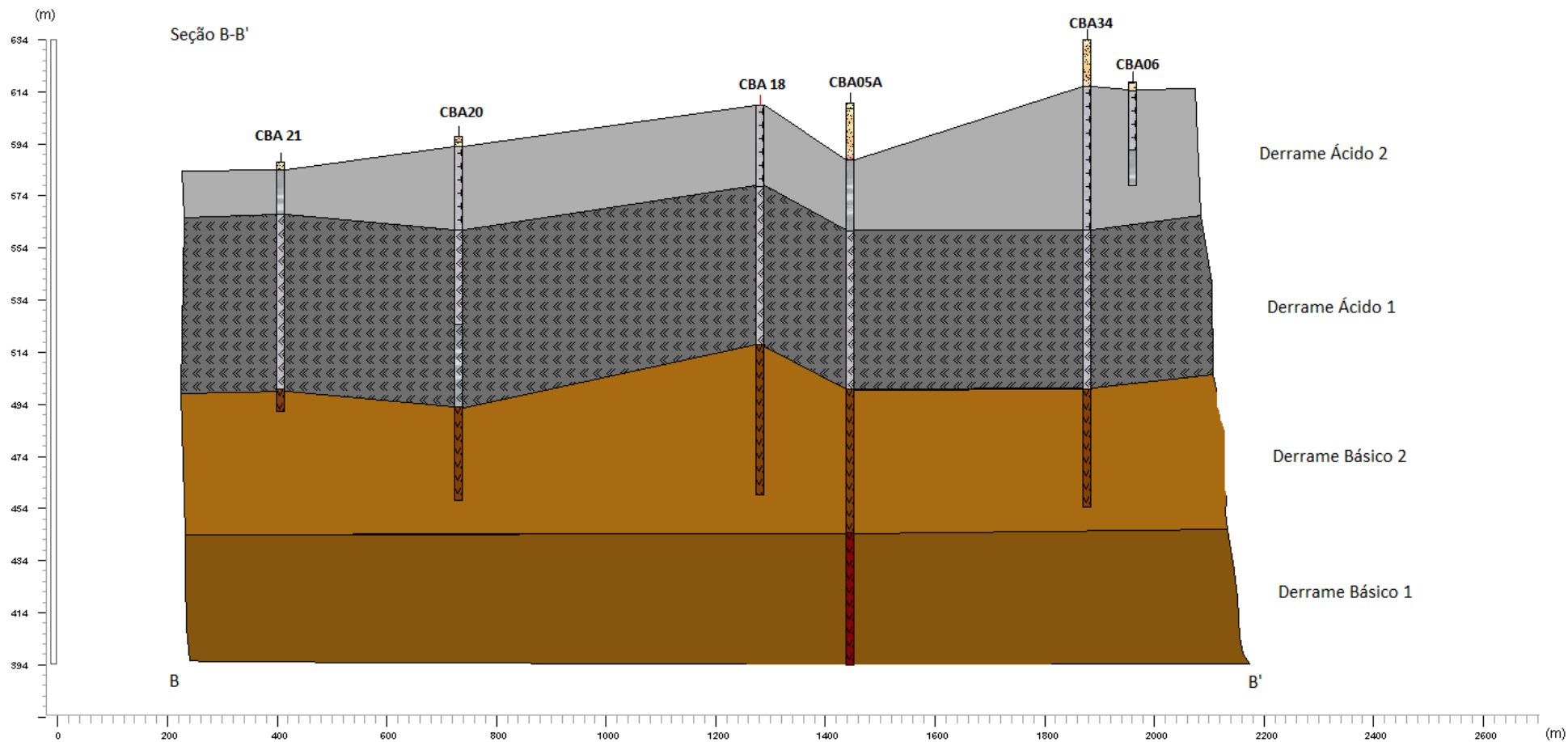


Figura 21 - Seção obtida do perfil geológico B-B'

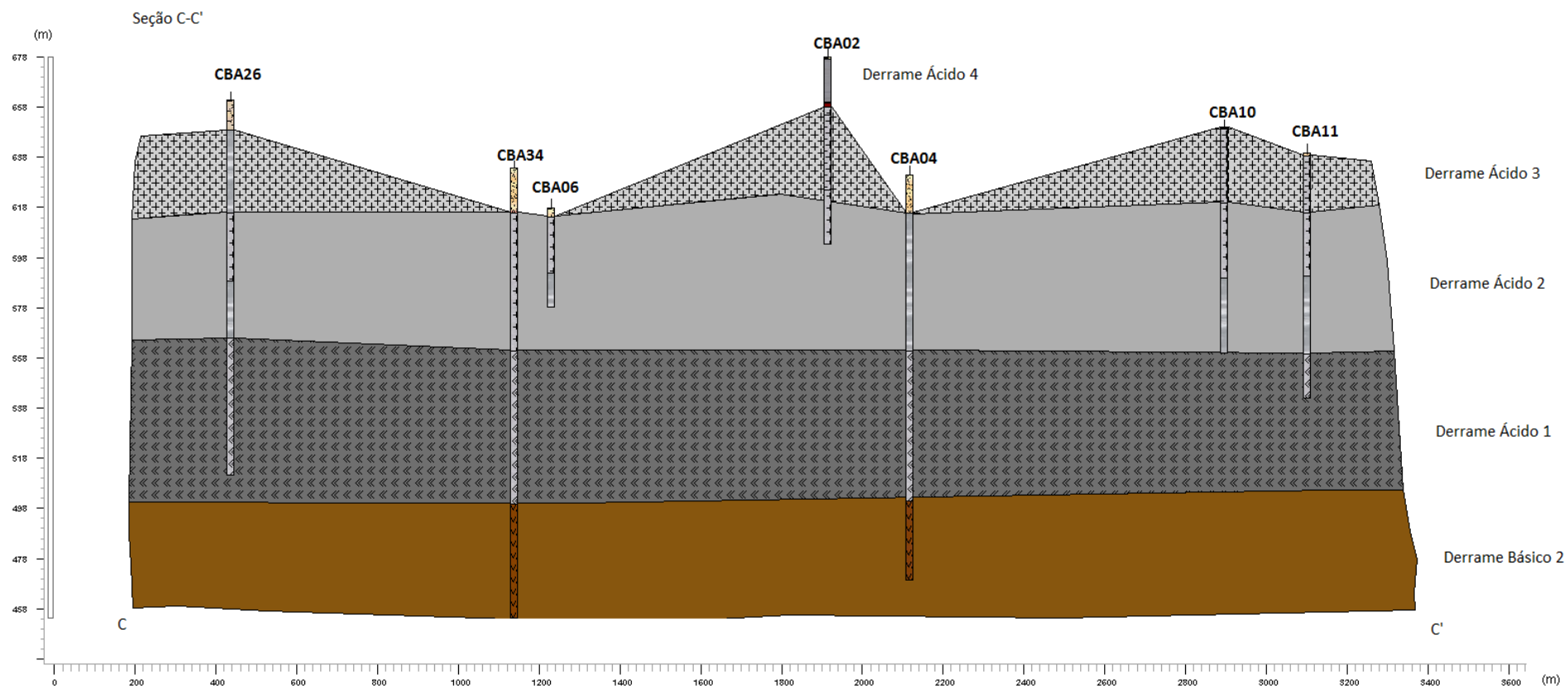


Figura 22 - Seção obtida do perfil geológico C-C'

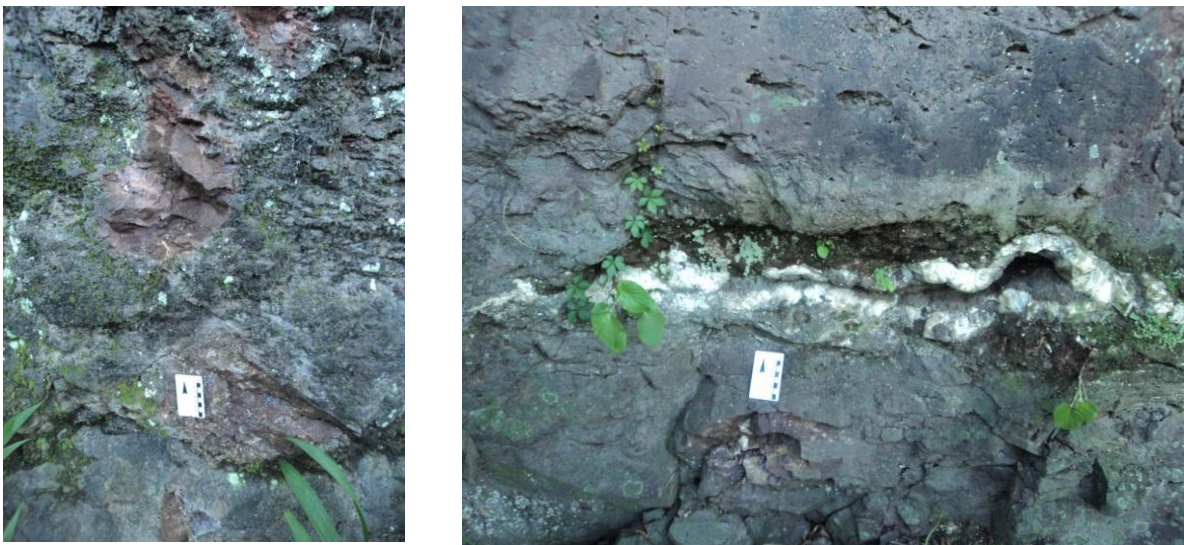


Em altitudes até 500 metros são encontradas dois derrames de rochas basálticas que apresentam coloração marrom escura, textura fanerítica muito fina e estruturas do tipo disjunções conforme apresentado na Figura 23.



**Figura 23 - Vista de um afloramento do primeiro derrame vulcânico básico**

Em direção ao contato do derrame básico 2 há ocorrência de brechas vulcânicas com fragmentos de basalto vesicular a amigdalóide (preenchidos por zeólitas e carbonatos) e de geôdos alongados e orientados (Figura 24).



**Figura 24 - Vista de basaltos, brechas e geôdos nos contatos entre os derrames 1 e 2**



Acima de 500 metros são encontrados 5 derrames ácidos, sendo os riolitos e riodacitos os litotipos principais. Até aproximadamente 561 metros, o derrame é caracterizado por rochas riolíticas de coloração marrom a castanha, com vesículas e amígdalas (preenchidas principalmente por quartzo) de tamanho milimétrico, sendo que muitas destas são orientadas e alongadas (Figura 25).



**Figura 25 - Vista das rochas do derrame ácido 1.**

Próximo do contato dos derrames ácidos há ocorrência de níveis de rochas vesiculares e de brechas vulcânicas, como mostra a Figura 26.





**Figura 26- Exemplo de contato entre derrames de rochas ácidas**

Em um segundo e terceiro derrames ácidos são encontrados riodacitos de coloração cinza clara, com vesículas esparsas e geodos centimétricos preenchidos por quartzo e calcita (Figura 27). O pacote de rochas apresenta poucos planos horizontais, ocorrendo em alguns planos horizontais, circulação de água, porém em pequena quantidade.



**Figura 27 - Exemplos de riodacitos do derrame ácido 2 e 3**

O quarto derrame é caracterizado por dacitos pouco fraturados, de coloração marrom, textura fanerítica fina a muito fina, presença de microamígdalas (preenchidas por carbonato), conforme apresentado na Figura 28.



**Figura 28 - Dacitos do derrame ácido 4**

O quinto derrame é caracterizado pela presença de riodacitos de coloração cinza, textura fanerítica fina e disjunção horizontal bem marcada, como apresentado na Figura 29.



**Figura 29 - Vista de um afloramento do derrame ácido 5**

Na região, foram identificados 266 lineamentos, sendo em sua maioria de pequeno porte (até 10 km) com orientação preferencial para noroeste (N0-10W, N30-50W e N70-80W) e a secundária, para nordeste (N50-60E e N70-80E). A maioria dos poços encontram-se em



zona de média densidade de lineamentos, alguns poços em zona de alta densidade e poucos poços em zona de baixa densidade de lineamentos, como mostra a Figura 30, região mais propícia a ser encontrado um volume maior de água.

O cruzamento dos dados dos poços tubulares com os lineamentos permitiu identificar a existência de um controle estrutural que têm influência na capacidade específica e produção desses poços. Assim, poços que estão associados a regiões de maior densidade de lineamentos, cuja orientação principal dos mesmos é para noroeste, apresentam maior capacidade de produção.

Em alguns estudos, tais como Morin e Savage (2003), Henriksen e Braathen (2006), Neves e Morales (2007), também foi verificado a existência de coincidência favorável da orientação das fraturas e falhas com a anisotropia e permeabilidade, cujas regiões estudadas apresentaram poços mais produtivos quando associados a fraturas que possuíam orientação específica.

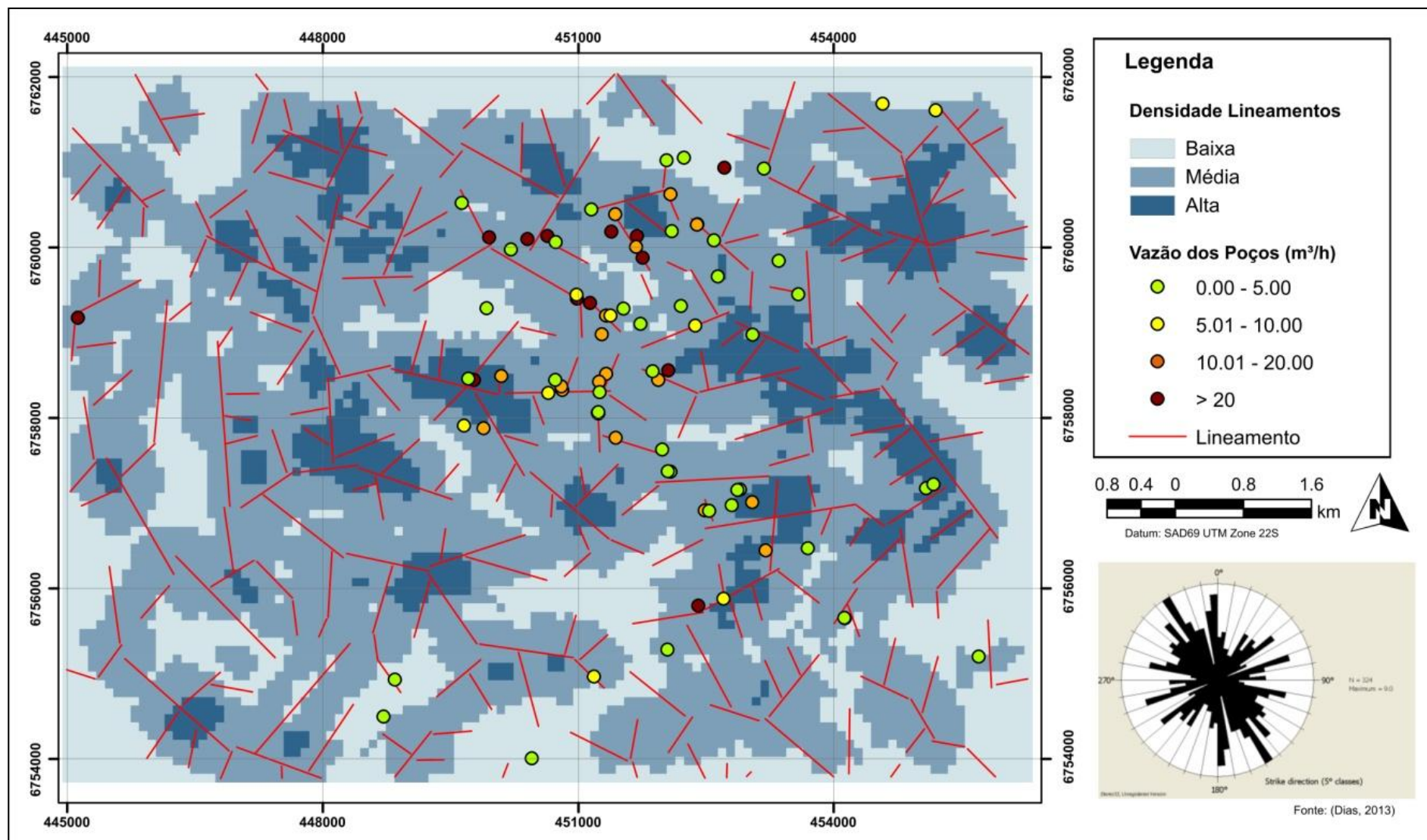
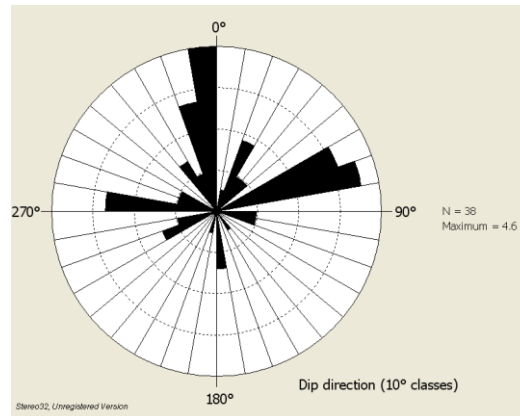


Figura 30 - Mapa de densidade e diagrama de roseta com as direções dos lineamentos

Através da medida de planos de fraturas realizadas em campo, foram identificados que a maior frequência das medidas estão situadas em dois quadrantes principais do diagrama de rosetas (Figura 31). No quadrante NW, o intervalo N0-10W é onde está localizada a maior parte das estruturas, enquanto no quadrante NE o intervalo N60-80E é o principal.



**Figura 31 – Diagrama de roseta dos planos de fraturas medidos em campo**

No levantamento de campo identificou-se que as fraturas são verticais a sub-verticais e cortam os derrames em várias direções. Em alguns pontos foi possível identificar conjugados de cisalhamento ortogonais entre si ( $274^{\circ} 85^{\circ}$ ;  $350^{\circ} 86^{\circ}$ ;  $076^{\circ} 89^{\circ}$ ) e planos ( $074^{\circ} 10^{\circ}$ ;  $076^{\circ} 89^{\circ}$  e  $352^{\circ} 20^{\circ}$ ) com a ocorrência de uma pequena circulação de água. Por vezes, alguns planos apresentam-se mineralizados ( $048^{\circ} 90^{\circ}$ ;  $016^{\circ} 90^{\circ}$ ), sendo muitas vezes preenchidos com zeolitas e carbonatos ( $050^{\circ} 85^{\circ}$ ;  $012^{\circ} 85^{\circ}$ ;  $326^{\circ} 80^{\circ}$ ;  $062^{\circ} 85^{\circ}$ ).

Os principais planos ou estruturas onde há circulação de água correspondem a contatos entre derrames, estruturas de resfriamento das rochas (disjunções horizontais) e fraturas, como apresenta a Figura 32.

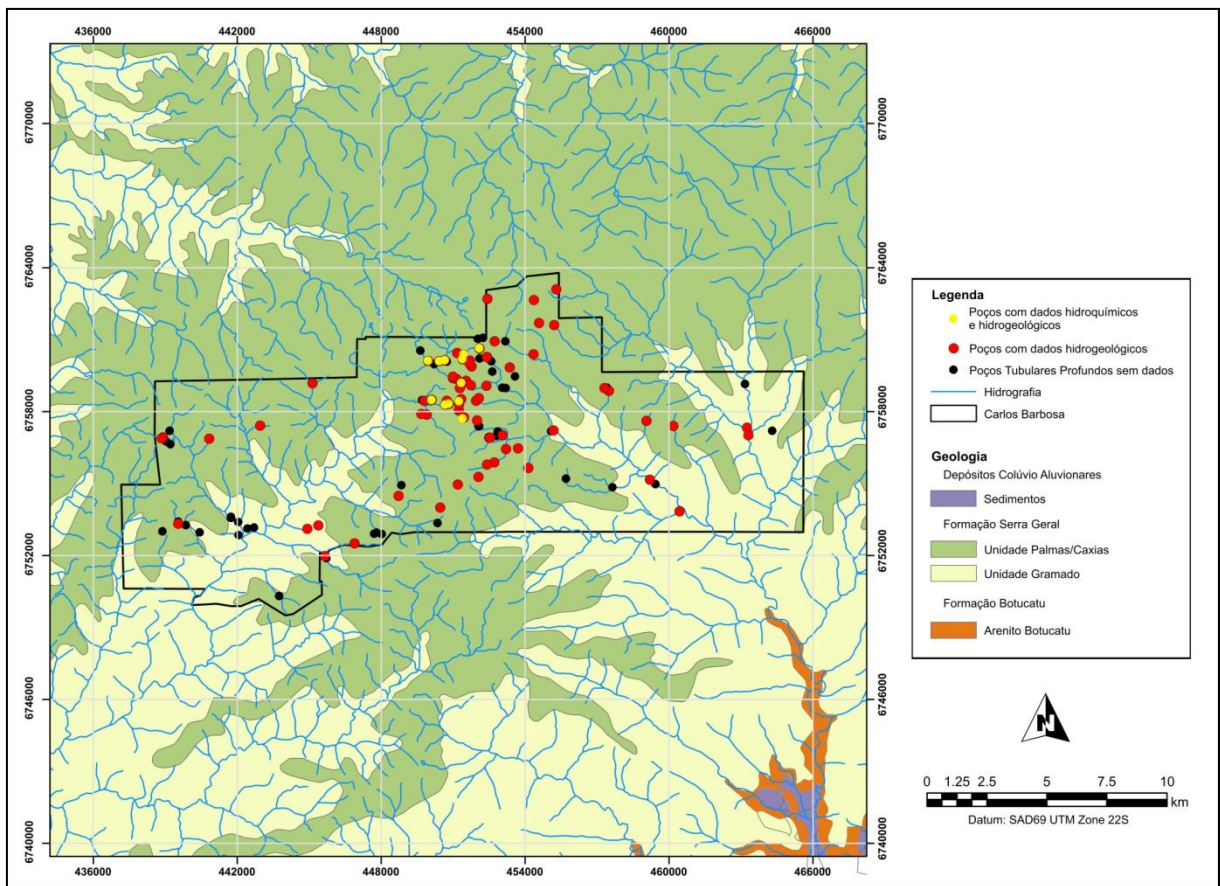


**Figura 32 - Circulação de água no riodacito com disjunção horizontal**



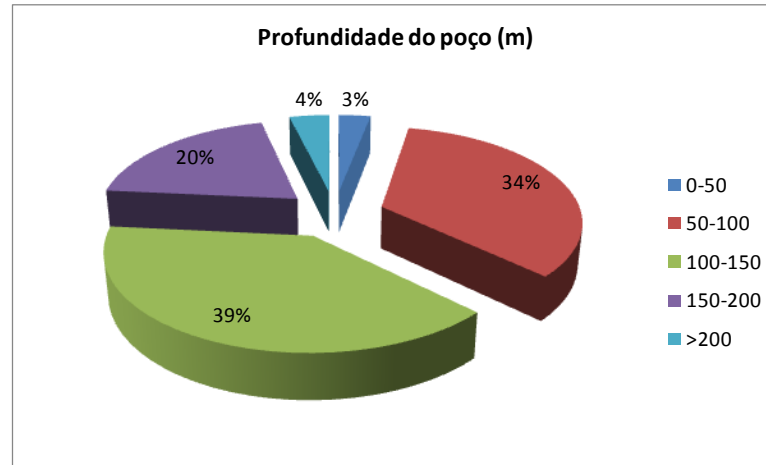
## 6.2 Caracterização hidrogeológica da área de estudo

A partir do levantamento de dados de fontes secundárias como SIAGAS e CORSAN foram identificados 137 poços perfurados no município de Carlos Barbosa. Desses 137 poços, 76 poços possuíam dados de nível estático, 57 de capacidade específica, 74 de vazão e 50 poços possuíam o número e a profundidade de entradas de água, os quais foram utilizados na caracterização hidrogeológica local. Apenas 26 poços possuíam dados de testes de bombeamento, permitindo o cálculo de transmissividade. Além disso, 12 poços localizados em rochas ácidas foram utilizados para coleta de amostras de água subterrânea a fim de realizar a caracterização hidroquímica (Figura 33).



**Figura 33 - Localização dos poços tubulares em Carlos Barbosa**

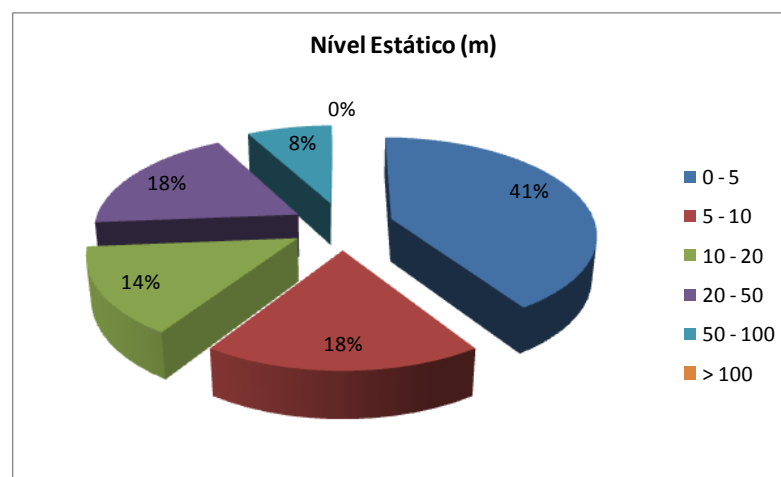
A partir da avaliação dos dados disponíveis, identificou-se que 39% dos poços possuem profundidades que variam de 100 a 150 metros e 34% entre 50 e 100 metros, como mostra a Figura 34. Esses dados demonstram que os poços existentes na região, captam água de fraturas que estão localizadas no intervalo entre 50 e 150 metros.



**Figura 34 - Profundidade dos poços perfurados na região de Carlos Barbosa**

Essa profundidade média evidencia os critérios adotados por profissionais que desenvolvem atividades voltadas à prospecção de poços tubulares. Por exemplo Giardin (1997) considera a profundidade de 120 metros como máxima durante os processos de perfuração (o aprofundamento do poço dependerá das condições geológicas). Já, Hausman (1995) considera que, em profundidades superiores a 300 metros, haverá uma dificuldade muito grande para circulação da água pelas fraturas, pois a pressão do maciço é elevada. Além disso, Hausman (1995) salienta que já há uma diminuição da circulação a partir dos 140 metros de profundidade em função dessas mesmas pressões.

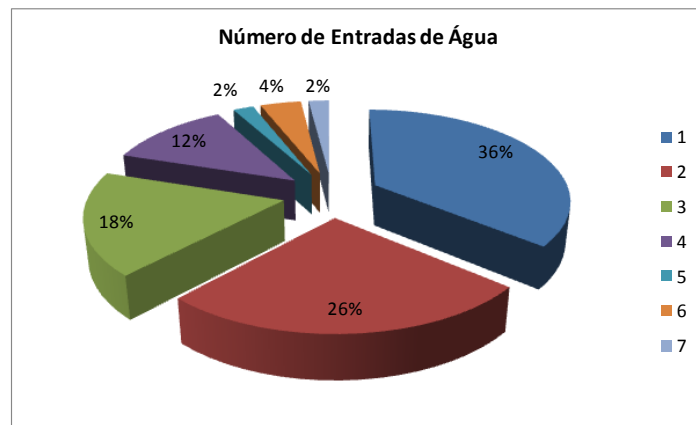
O nível estático (NE) está associado a diferentes profundidades, sendo na maior parte dos casos, localizado entre 0 e 5 metros de profundidade (41%), seguido pelo intervalo de 5 a 10 metros (18%) e 20 a 50 metros (18%), como apresenta a Figura 35.



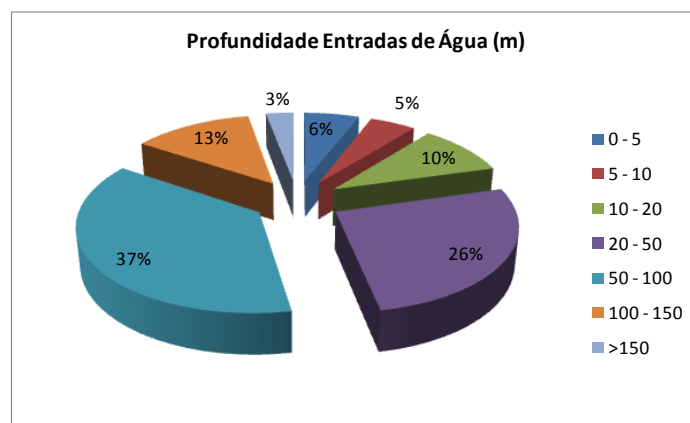
**Figura 35 - Nível estático dos poços analisados**

Tais dados mostram que o aquífero fraturado, embora tenha entradas de água localizadas em diferentes níveis, possui um comportamento semelhante a aquíferos confinados ou semi-confinados. Dessa forma, a água subterrânea presente no aquífero, encontra-se sob pressão e, após a perfuração, tende a subir além da entrada de água.

A análise hidrogeológica dos poços que possuíam dados permitiu identificar que a maior parte dos poços possui de 1 a 3 entradas de água (80%), como mostra a Figura 36. A maioria das entradas de água tem profundidade entre 50 e 100 metros (37%), seguida por profundidades entre 20 a 50 metros (26%) como mostra a Figura 37. Isso evidencia que a circulação da água subterrânea é mais comum no intervalo entre 50 e 100 metros, profundidade essa, mais favorável à ocorrência de fraturas abertas.



**Figura 36 - Número de entradas de água dos poços analisados**



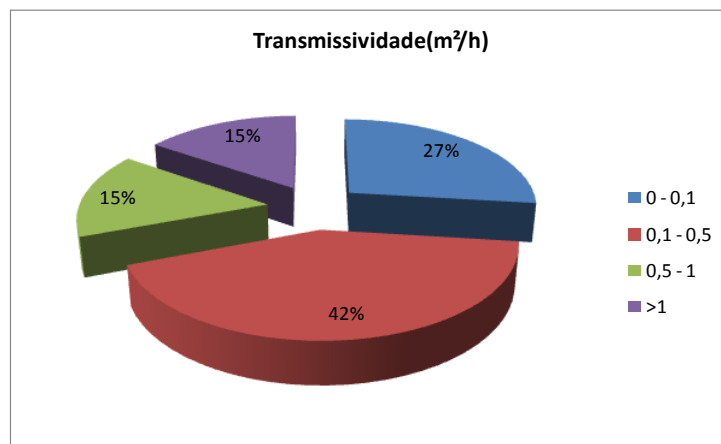
**Figura 37 - Profundidade das entradas de água dos poços**

A localização das entradas de água nos poços tubulares construídos no sistema aquífero fraturado tem relação com o sistema estrutural. Dependendo do tipo de estrutura (se fraturas ou zonas de fraturas), dependendo do mergulho das fraturas e da posição do poço (locação) em relação às fraturas, haverá pontos diferentes onde ocorrerá a interceptação das



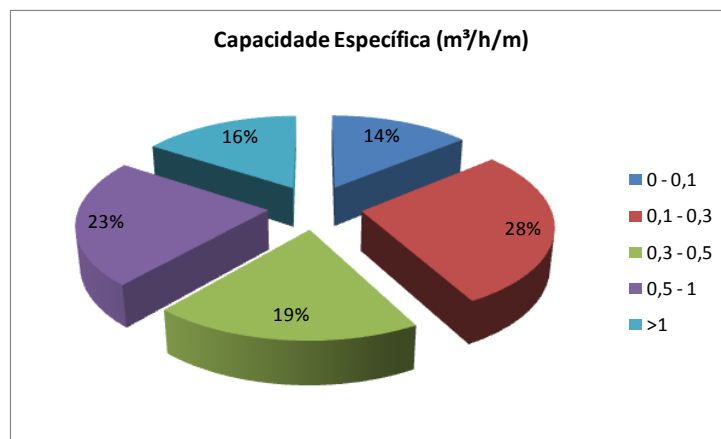
fraturas pelos poços tubulares. Assim, haverá a possibilidade de ocorrer mais de uma entrada de água por poço em diferentes profundidades (REGINATO, 2003).

Os cálculos hidrogeológicos com as informações dos testes de vazão de poços confirmam a baixa transmissividade (Figura 38), na maioria das vezes, muito baixas, sendo que a maioria dos poços apresentam valores no intervalo entre 0,1 e 0,5  $m^2/h$ , seguido por valores de até 0,1  $m^2/h$  (42%), variação típica de aquíferos fraturados (anisotrópicos).



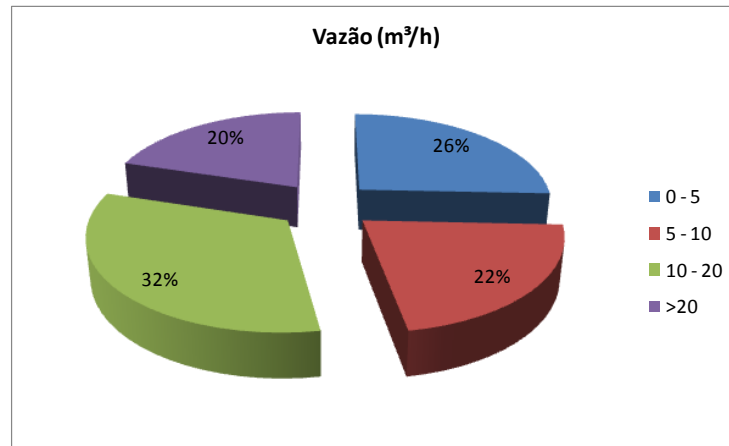
**Figura 38 - Transmissividade dos poços analisados**

A capacidade específica analisada (Figura 39) indicou grande variação, sendo que na maior parte dos casos os valores estão no intervalo de 0,1 e 0,3  $m^3/h/m$  (28%), seguidos por valores entre 0,5 a 1  $m^3/h/m$  (24%) e por valores entre 0,3 a 0,5 (19%), variabilidade condizente com o tipo de aquífero (fraturado) que por sua vez apresenta uma forte anisotropia.



**Figura 39 - Capacidade específica dos poços analisados**

Outro parâmetro analisado, a vazão, apresentou na maioria dos poços analisados um valor entre 10 a 20 m<sup>3</sup>/h (33%), seguida por uma vazão inferior a 5 m<sup>3</sup>/h (29%), como mostra a Figura 40, valores condizentes com as características da região.



**Figura 40 - Vazão dos poços analisados**

Fatores relacionados com o projeto e a perfuração dos poços como profundidade, diâmetro, bem como o número de entradas de água, também têm influência na vazão.

## 6.3 Hidroquímica da área de estudo

### 6.3.1 Caracterização hidroquímica

As características físico-químicas das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) possuem variações condicionadas pelas características geológicas e hidrogeológicas da região, o que pode ser evidenciada através da caracterização hidroquímica (REGINATO e STRIEDER, 2004).

A circulação das águas subterrâneas nesses aquíferos é condicionada pelo sistema de fraturas e pelas estruturas de resfriamento dos derrames de rochas vulcânicas. Assim, as águas circulam em diferentes níveis de profundidade, em diferentes condições de confinamento e podem apresentar características hidroquímicas variadas.

Na Tabela 7 são apresentados os dados dos poços e fontes bem como as informações sobre a profundidade das entradas de água e sua relação com os derrames de rochas ácidas identificados no levantamento de campo e nos perfis geológicos dos poços. Na Figura 41 é apresentada a localização dos 12 poços e 3 fontes que foram utilizados na caracterização hidroquímica da água subterrânea que ocorre associada às rochas vulcânicas ácidas do Município de Carlos Barbosa.

**Tabela 7 - Características dos pontos analisados e respectivas entradas de água**

Código Projeto	N	E	Cota do Terreno (m)	Nº entradas de água	Entrada de água (m)	Altitude Entrada de Água (m)	Profundidade (m)	Entradas de Água (EA)
CBA02	6759202	451327	679	2	15,5 e 52,7	663,5 e 626,3	74,8	EA 1 - DA* 4 (Riodacito com disjunção horizontal) e EA2 - DA 3 (Riodacito Fraturado)
CBA05A	6758327	450814	610	1	40	570	216	EA1 - DA2 (Riodacito com disjunção horizontal)
CBA10	6760184	451388	650	1	8,5 e 16 (14,34 a 22,99)	634	90	EA 1 - DA3 (Riodacito fraturado com disjunção horizontal)
CBA11	6760389	451435	640	1	14 e 22 (14,25 a 21,25)	626, 618	98	EA 1 - DA3 (Riodacito fraturado com mineirais e veios injetados)
CBA12	6760624	452086	660	2	61 (13,73 a 20,23)	639, 599	86	EA 1 - DA3 (Riodacito fraturado) / EA2 - DA2 (Riodacito com vesículas e amígdalas)
CBA16	6760102	450406	614	1	(53,35 a 59,20)	560,65, 554,8	114	EA1 - DA1 (Riolito com vesículas e amígdalas preenchidas por quartzo)
CBA17	6760118	449954	609	1	101	508	141,5	EA1 - DA1 (Riolito com vesículas e amígdalas)
CBA18	6758291	450651	592	2	56 e 80	536, 512	150	EA1, 2 - DA1 (Riolito com vesículas e amígdalas)
CBA19	6760136	450638	619	2	38,112	581, 507	122	EA 1 - DA2 (Riodacito com Disjunção Horizontal) / EA2 - DA1 (Riolito com vesículas e amígdalas - Provável contato entre derrame ácido e básico)
CBA20	6758492	450100	597	1	74	523	140	EA 1 - DA1 (Riolito com Disjunção Horizontal)
CBA26	6757724	451391	661	1	70	591	150	EA1 - DA2 (Riodacito com vesículas e amígdalas)
CBA34	6758423	451246	634	3	48,60,71	586, 574, 563	180	EA 1, 2, 3 - DA2 (Riodacito com vesículas e amígdalas)
Fonte 1	6758485	450711	625	-	-	-	-	DA 3
Fonte 2	6758480	451328	631	-	-	-	-	DA 3
Fonte 3	6759443	450747	647	-	-	-	-	DA3

\*DA: Derrame Ácido

O tratamento inicial do conjunto de dados, realizado pelo cálculo do erro analítico, buscando verificar a qualidade dos dados, permitiu evidenciar que a maioria das amostras apresentaram erro inferior a 10%, com exceção das amostras das Fontes, as quais o erro foi superior a 20% (Figura 42). Esse erro pode estar associado à presença de outros íons e cátions que não foram analisados, ou mesmo pelo fato de estas amostras receberem contribuição de águas não mineralizadas, como água da chuva, uma vez que a coleta ocorreu na caixa de armazenamento da fonte, interferindo desta forma, na qualidade dos dados.

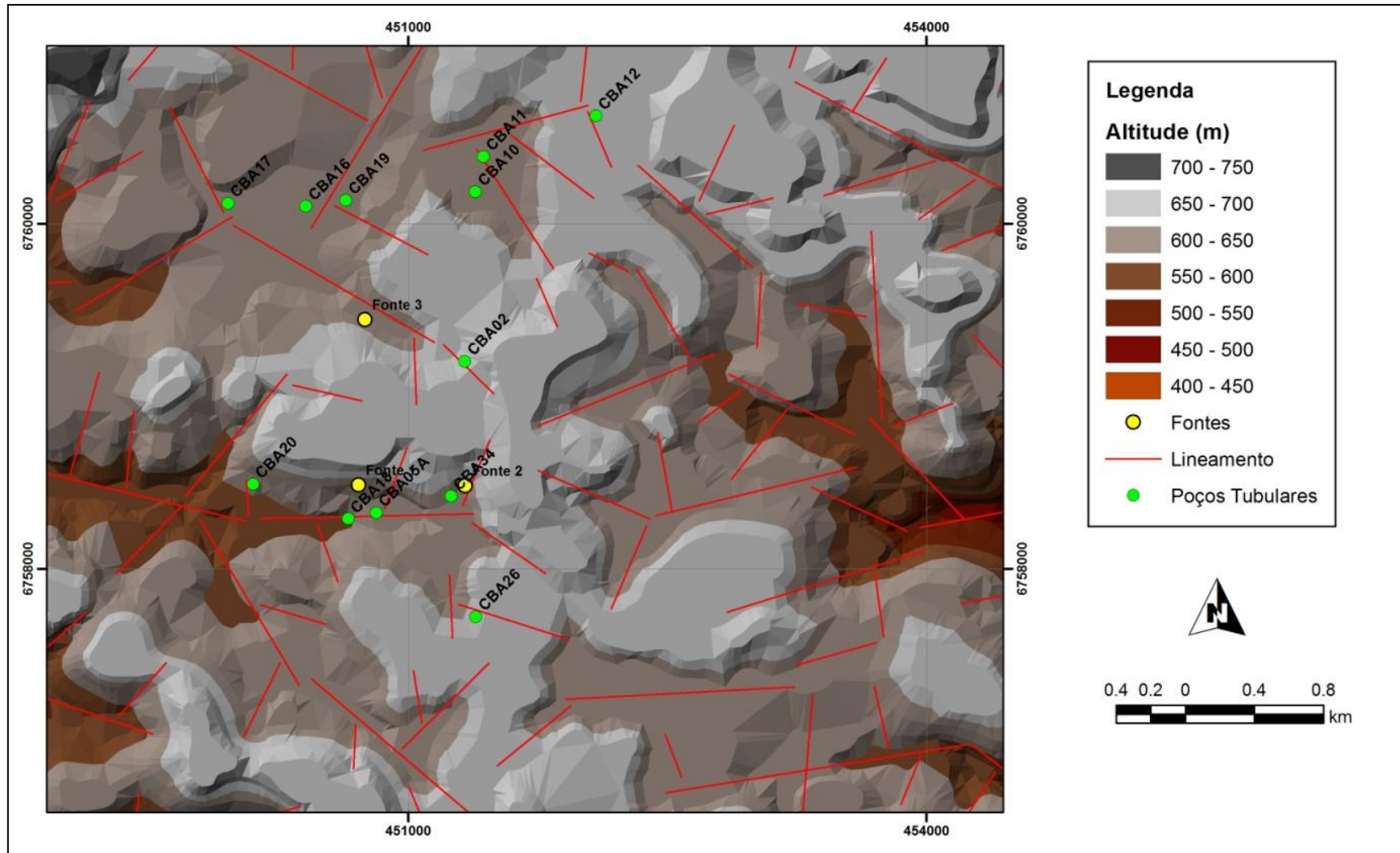


Figura 41 - Poços e fontes selecionados para amostragem de água

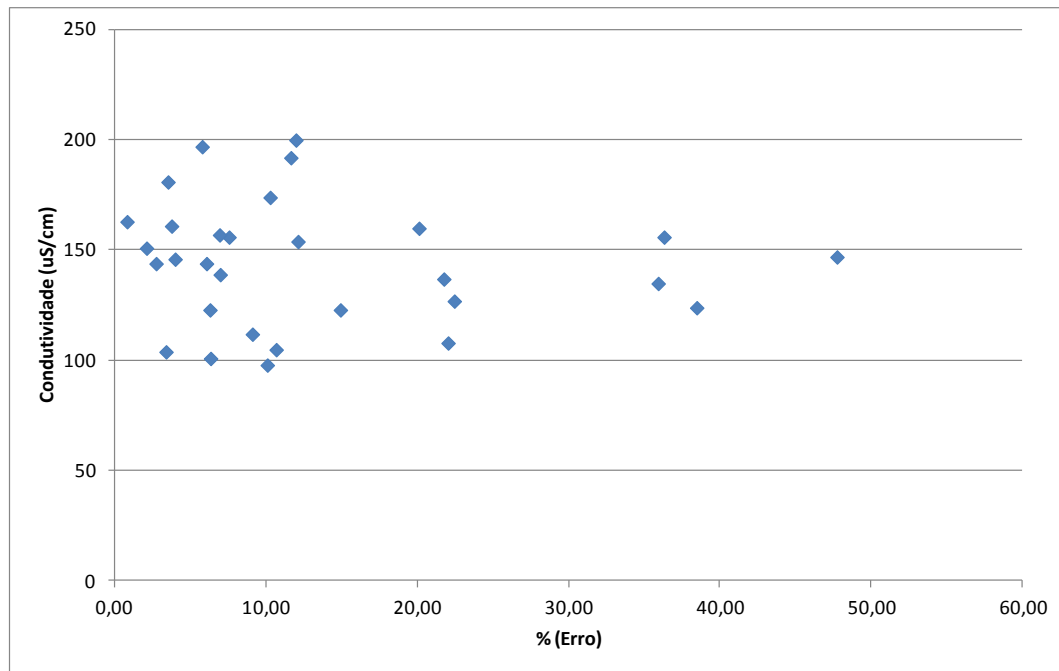


Figura 42 - Gráfico relacionando os valores de erro com a condutividade elétrica das amostras

As águas subterrâneas analisadas apresentaram os seguintes resultados para as duas campanhas realizadas (Tabela 8 e Tabela 9). As principais estatísticas descritivas são mostradas na Tabela 10.

Tabela 8 - Valores obtidos na primeira amostragem (Abril 2013)

Poço	Temp (°C)	pH	Cond. (uS/cm)	Alctotal (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	Fe <sup>+2</sup> (mg/L)	Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	Mn <sup>+2</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	STD (mg/L)
CBA02	18,4	6,67	200	59,9	73,2	20,39	10,4	0,43	0,064	3,62	0,04	4,54	13,15	3	130
CBA05A	18,88	5,87	161	61,4	73,5	15,85	4,5	0,3	0,064	3,58	0,04	1,09	9,26	3	161
CBA10	18,5	5,81	112	24,4	29,3	8,87	5,5	0,82	0,064	1,76	0,04	5,4	7,41	1	73
CBA11	18,5	5,84	160	38,6	46,4	11,71	3,7	0,3	0,064	1,95	0,04	3,5	6,11	1	75
CBA12	18,62	5,85	98	27,4	32,9	9,16	4,6	0,4	0,064	1,79	0,04	3,51	4,81	1	64
CBA16	19,38	6,25	154	57,4	68,9	14,29	5,2	1,35	0,067	1,83	0,04	2,82	13,7	1	100
CBA17	19,26	6,18	197	75,1	91,2	21,37	5,9	0,76	0,064	1,82	0,04	1,09	15,74	4	128
CBA18	18,52	5,89	146	53,8	64,3	15	3,4	0,29	0,064	1,92	0,04	2,3	9,44	1	95
CBA19	18,9	6,13	156	53,3	65,3	14,41	6,7	0,44	0,064	1,96	0,04	4,02	12,22	3	102
CBA20	18,27	5,98	144	55,3	66,8	14,76	5,9	0,63	0,064	1,87	0,04	2,3	12,96	2	94
CBA26	18,81	6,02	101	35,5	40,9	8,82	3,2	1,03	0,064	1,47	0,04	2,65	9,07	1	66
CBA34	18,63	6,28	174	45,2	54,3	17,21	11,3	0,71	0,064	1,96	0,04	2,82	11,48	4	113
Fonte 1	17,94	4,89	147	6,6	7,3	9,99	7,8	0,23	0,064	3,34	0,04	4,37	10,54	6	96
Fonte 2	18,31	6,33	127	25,4	29,3	10,22	7	0,29	0,064	1,77	0,04	5,4	8,33	2	82
Fonte 3	19,82	5,36	156	5,1	5,8	8,86	11,4	0,18	0,064	3,38	0,04	7,13	10,37	10	102

**Tabela 9 - Valores obtidos na segunda amostragem (Julho 2013)**

Poço	Temp (°C)	pH	Cond. (uS/cm)	Alctotal (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	Fe <sup>+2</sup> (mg/L)	Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	Mn <sup>+2</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	STD (mg/L)
CBA02	17,28	5,78	192	61,38	75,64	20,87	10,26	0,59	0,064	3,482	0,04	4,54	12,63	1	125
CBA05A	17,4	6,26	157	61,4	75,6	18,91	5,79	0,81	0,064	3,58	0,04	0,92	10,17	2	102
CBA10	17,09	5,22	105	26,73	32,94	8,508	5,32	0,89	0,064	1,711	0,04	5,23	7,37	1	68
CBA11	17,2	5,62	123	41,08	54,9	11,66	5,79	0,77	0,064	3,138	0,04	3,16	8,07	1	80
CBA12	17,2	5,74	123	21,78	26,84	9,768	6,08	0,57	0,064	1,73	0,04	2,99	7,37	1	80
CBA16	17,44	6,12	137	64,35	79,3	16,6	2,75	0,55	0,064	1,922	0,316	2,47	10,52	1	89
CBA17	17,3	6,17	181	79,2	97,6	22,42	5,79	0,94	0,064	1,902	0,04	1,09	14,9	3	118
CBA18	17,5	6,18	151	55,44	68,32	14,905	7,88	0,88	0,064	1,997	0,04	1,96	12,1	1	102
CBA19	17,3	6,03	144	59,4	73,2	14,875	4,75	0,3	0,064	3,134	0,04	3,85	10,88	1	93
CBA20	17,11	6,28	139	59,4	73,2	15,025	4,28	0,76	0,064	1,933	0,04	2,13	11,75	1	90
CBA26	16,3	6,31	104	47,52	58,56	11,09	3,51	0,77	0,064	1,481	0,04	1,27	9,82	1	68
CBA34	16,8	6,16	163	47,02	57,95	18,21	10,92	0,37	0,064	1,879	0,04	2,65	10,88	1	106
Fonte 1	15	5,39	124	6,93	8,54	8,85	9,88	0,38	0,064	3,228	0,04	3,85	9,47	5	81
Fonte 2	11,22	6,05	108	25,47	31,72	11,07	8,55	0,03	0,064	1,708	0,04	4,89	9,3	1	70
Fonte 3	17,11	5,15	135	4,45	5,49	7,676	10,83	0,4	0,117	3,322	0,04	6,44	9,47	8	88

**Tabela 10 - Estatísticas descritivas dos parâmetros analisados**

Parâmetro	Número de casos	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
Alctotal (mg/L)	30	4,45	79,2	42,865	21,14
HCO <sub>3</sub> (mg/L)	30	5,49	97,6	52,307	26,01
Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	30	7,676	22,42	13,712	4,368
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	30	2,75	11,4	6,629	2,673
Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	30	1,47	3,62	2,339	0,765
K <sup>+</sup> (mg/L)	30	0,92	7,13	3,346	1,626
Na <sup>+</sup> (mg/L)	30	4,81	15,74	10,31	2,506
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	30	1	10	2,4	2,268
F <sup>-</sup> (mg/L)	30	0,03	1,35	0,572	0,297
Fe <sup>+2</sup> (mg/L)	30	0,064	0,117	0,066	0,01
Mn <sup>+2</sup> (mg/L)	30	0,04	0,316	0,049	0,05
pH	119	4,29	6,98	5,861	0,491
Cond. (uS/cm)	119	72	200	139,45	27,58
STD (mg/L)	119	64	161	94,7	22,33
Temp (°C)	119	11,22	19,82	17,651	1,229

Em geral as águas do aquífero Serra Geral na região de Carlos Barbosa apresentam concentrações variáveis de cálcio, magnésio e sódio e, pequenas concentrações de cloretos e sulfatos. A concentração média de Cálcio de 13,71 mg/L está diretamente relacionada ao arcabouço químico-mineralógico do aquífero, pois reflete a remoção do cálcio dos plagioclásios e minerais ferromagnesianos dos basaltos. A solubilidade do Ca<sup>2+</sup> em águas

naturais está vinculada à presença de espécies carbônicas dissolvidas como  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  (MOCELIN e FERREIRA, 2009).

O principal ânion presente nas águas subterrâneas do SASG na área de estudo é o íon bicarbonato, proveniente das reações de equilíbrio da série carbonática, iniciada nas áreas de recarga com a dissolução de  $\text{CO}_2$  presente nos solos e na água da chuva ou como produto da hidrólise de silicatos do basalto o que acaba caracterizando a maior parte das águas como bicarbonatada (BITTENCOURT, 2003; GASTMANS, 2007).

Apesar disso, a concentração de carbonatos e bicarbonatos são baixas, quando comparados por exemplo às águas do Sistema Aquífero Guarani, apresentando valores que variam de 5,49 a 97,6 mg/L. O pH das amostras de água subterrânea coletadas indica uma preponderância de águas ácidas, com valores que variam de 4,89 a 6,67; sólidos totais dissolvidos (STD) de 70,5 a 131,5 mg/L e  $\text{Na}^{+2}$  de 6,09 a 15,32 mg/L, valores baixos, devido principalmente às entradas de água estarem associadas aos derrames de rochas vulcânicas ácidas.

A dureza varia de 24 a 77 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , com média de 70,6 mg/L, o que caracteriza tais águas como pouco duras. Estes valores representam características de águas com pouco tempo de residência com recarga relacionada às precipitações pluviométricas através do manto de intemperismo (HAUSMANN, 1966; LISBOA, 1996).

Foram encontradas concentrações baixas de fluoreto que variam entre 0,37 e 0,95 mg/L, cuja variação é provavelmente oriunda do tratamento realizado pela companhia de abastecimento (CORSAN) que injeta flúor diretamente no poço. No entanto, o fluoreto pode estar, naturalmente, presente nas águas subterrâneas do SASG sendo que a origem desse elemento é diversa. Manasses et al. (2007) sugerem que os teores mais altos de flúor podem ser resultantes de interação água-rocha em tempo mais prolongado. Já Nanni (2008), sugere que o enriquecimento de fluoreto no SASG decorre da combinação de recarga ascendente do Sistema Aquífero Guarani (SAG) em condições de alto confinamento e longo tempo de residência, situação não encontrada na região de estudo, uma vez que não há evidências de conexão com o SAG.

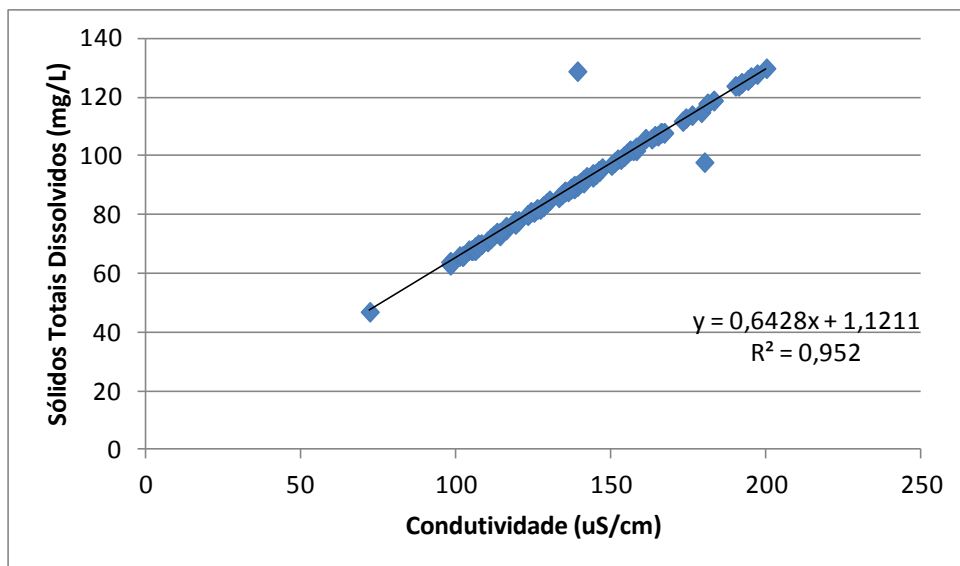
O ferro, comum nos óxidos de ferro (hematita e magnetita) e o manganês que está intimamente associado com o ferro, apresentaram concentrações inferiores a 0,117 mg/L e 0,316 mg/L, respectivamente. Tais valores podem ser atribuídos ao fato que apenas parte do ferro é colocado em solução, sendo que o restante compõe os minerais argilosos (MANASSES et al., 2007). As reduzidas concentrações de cloreto e sulfatos encontradas, em

geral inferiores a 6 mg/L e 4 mg/L, respectivamente, com exceção dos poços CBA02 e CBA34, que possuem concentrações superiores a 10 mg/L de cloretos, são explicadas devido às rochas ígneas serem pobres em cloretos e sulfatos.

Em relação ao íon potássio, verifica-se que este é pouco presente nas amostras, variando de 0,92 a 7,13 mg/L sendo que a maior parte do potássio liberado por hidrólise é logo adsorvido por minerais argilosos (MANASSES et al., 2007).

A condutividade elétrica das águas subterrâneas é o parâmetro que apresenta relação direta com a mineralização das águas, podendo ser indicativo de sentidos de fluxo das águas subterrâneas e grau de confinamento das mesmas (GASTMANS, 2007). No caso da região do SASG analisado, as amostras apresentam condutividade variando de 72 a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A relação entre a condutividade e a quantidade de sólidos dissolvidos totais é direta e apresenta uma boa correlação, conforme pode ser observado na Figura 43.



**Figura 43 - Gráfico de correlação entre a condutividade e a quantidade de sólidos totais dissolvidos nas águas do SASG em Carlos Barbosa**

A classificação das águas subterrâneas das duas amostragens realizadas, com base no Diagrama de Piper (Figura 44), indicou a ocorrência de um único campo que é o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas para os poços tubulares e uma fonte. Já a água de duas fontes foi classificada como águas sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas (cloretadas mistas). Essas águas apresentam uma concentração maior de sulfato cuja origem pode estar relacionada a diferentes fatores como um maior tempo de retenção na caixa de armazenamento, processos de degradação, contaminação devido a presença de sistemas de



esgotamento sanitário do tipo fossas sépticas ou ainda entrada da água que escoar pela superfície do terreno após a precipitação.

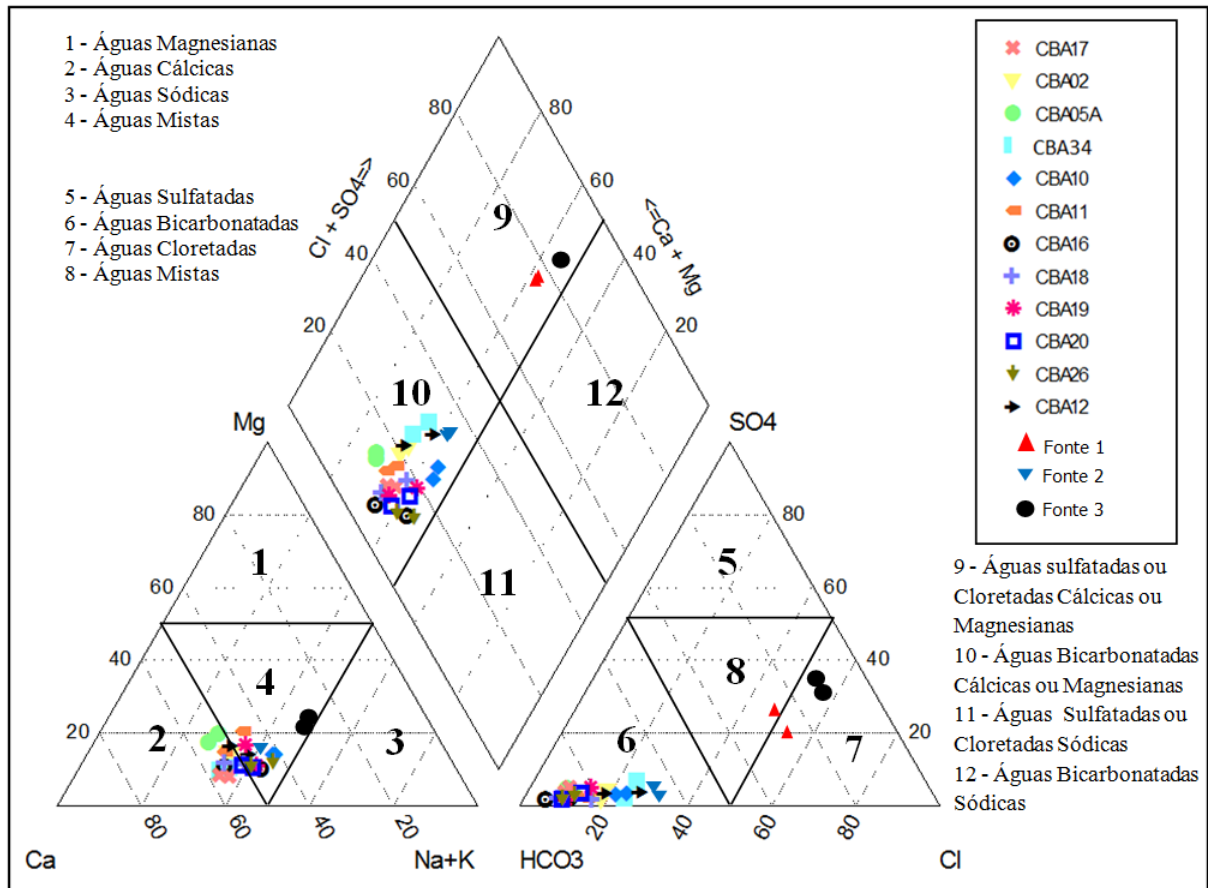


Figura 44 - Diagrama Piper das amostras de água subterrânea do SASG.

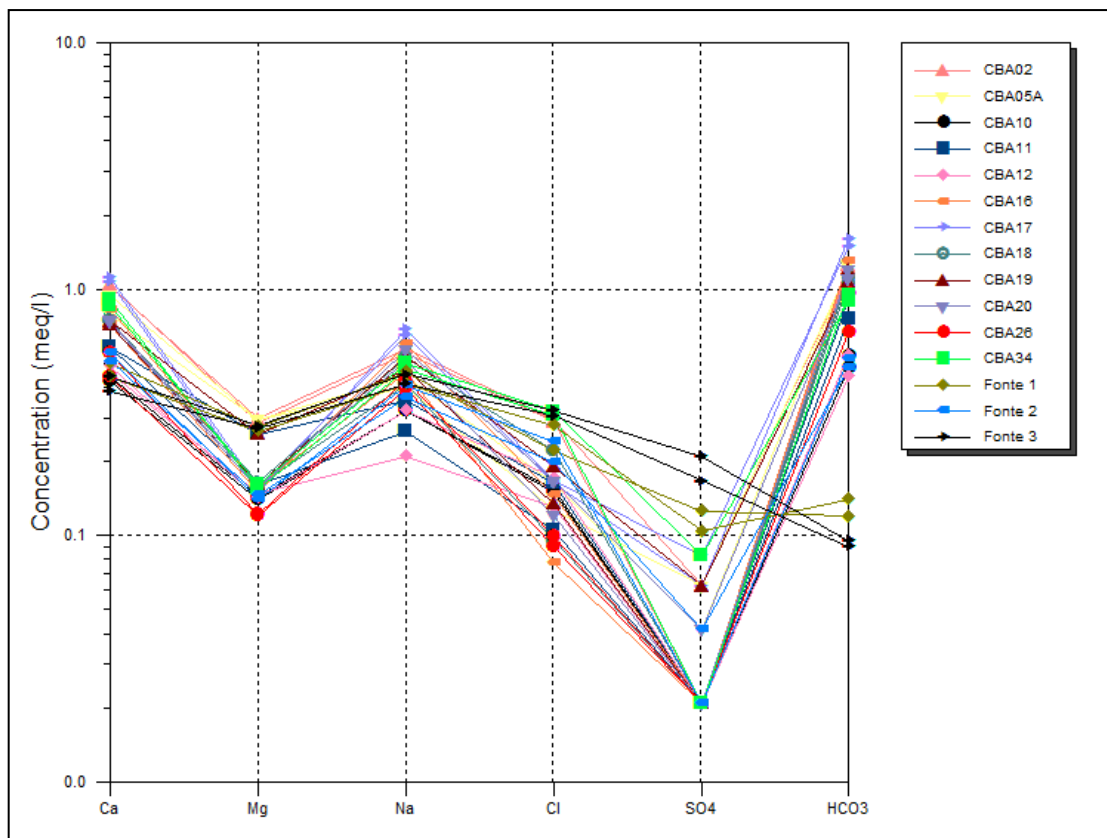
Pela análise dos cátions observa-se que essas águas são cálcicas ou mistas. A ocorrência desse tipo de água está de acordo com os estudos do sistema aquífero Serra Geral realizados por Bittencourt (1978), Fraga (1992), Rosa Filho (1994) e estudos regionais realizados por Lisboa (1996), Betiollo (2006) e Reginato et. al. (2013), sendo que a fonte dos elementos cálcio, magnésio e sódio está relacionada com os silicatos presentes nas diferentes rochas vulcânicas.

Conforme Lisboa (1996) as águas que circulam no SASG tendem a apresentar uma relação onde o  $Ca > Mg > Na$  predomina e um enriquecimento de cálcio e magnésio do topo (rochas ácidas) para a base (rochas básicas). Segundo Machado e Freitas (2000) esse padrão está associado às primeiras fases de evolução geoquímica das águas que circulam no SASG. Bittencourt et al. (2003) afirmam que as águas bicarbonatadas cálcicas são as águas típicas do SASG, sendo o cálcio o cátion mais abundante, proveniente da alteração de plagioclásios e minerais ferromagnesianos dos basaltos.

Segundo Manasses et al. (2007), o campo das águas bicarbonatadas cálcicas possui um controle litoquímico, já que suas características químicas estão relacionadas em boa parte com os processos de intemperismo que atuam sobre as rochas vulcânicas, característica bem comum em águas continentais relativamente diluídas.

Reginato et al. (2013) explicam que, ainda que as águas tenham a mesma classificação conforme o diagrama Piper, estas podem apresentar concentrações distintas para os elementos cálcio, magnésio e sódio por circularem por aquíferos fraturados que estão associados a diferentes rochas vulcânicas e a profundidades variadas.

A análise do diagrama de Schoeller (Figura 45) indica a existência de um comportamento hidroquímico geral com pequenas variações nas concentrações dos íons analisados.



**Figura 45 - Diagrama de Schoeller das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo**

As variações mais significativas estão relacionadas às concentrações de magnésio, sódio, cloro e sulfato e podem ser explicadas pela ocorrência de diferentes entradas de água, localizadas em profundidades distintas de diferentes derrames de rochas vulcânicas ácidas.

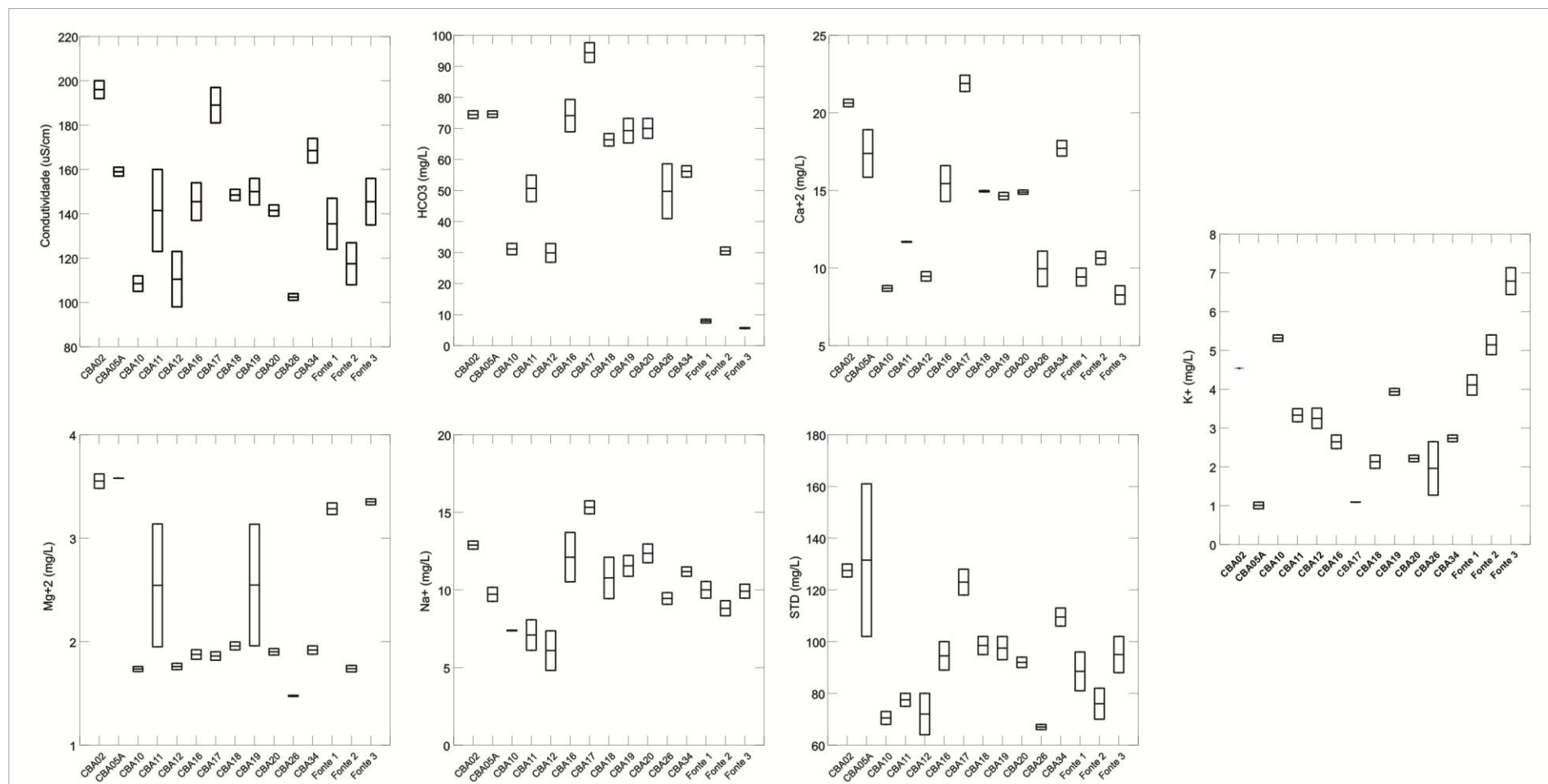
De acordo com a aplicação do teste estatístico de Kruskal-Wallis, a um nível de significância de 5%, obteve-se que os parâmetros condutividade, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade e os íons de cálcio, bicarbonato, magnésio, potássio e sódio apresentam diferenças significativas entre os poços e fontes analisadas, uma vez que possuem *p-value* inferior a 0,05, como apresenta a Tabela 11.

**Tabela 11 - Resultados do teste de Kruskal-Wallis**

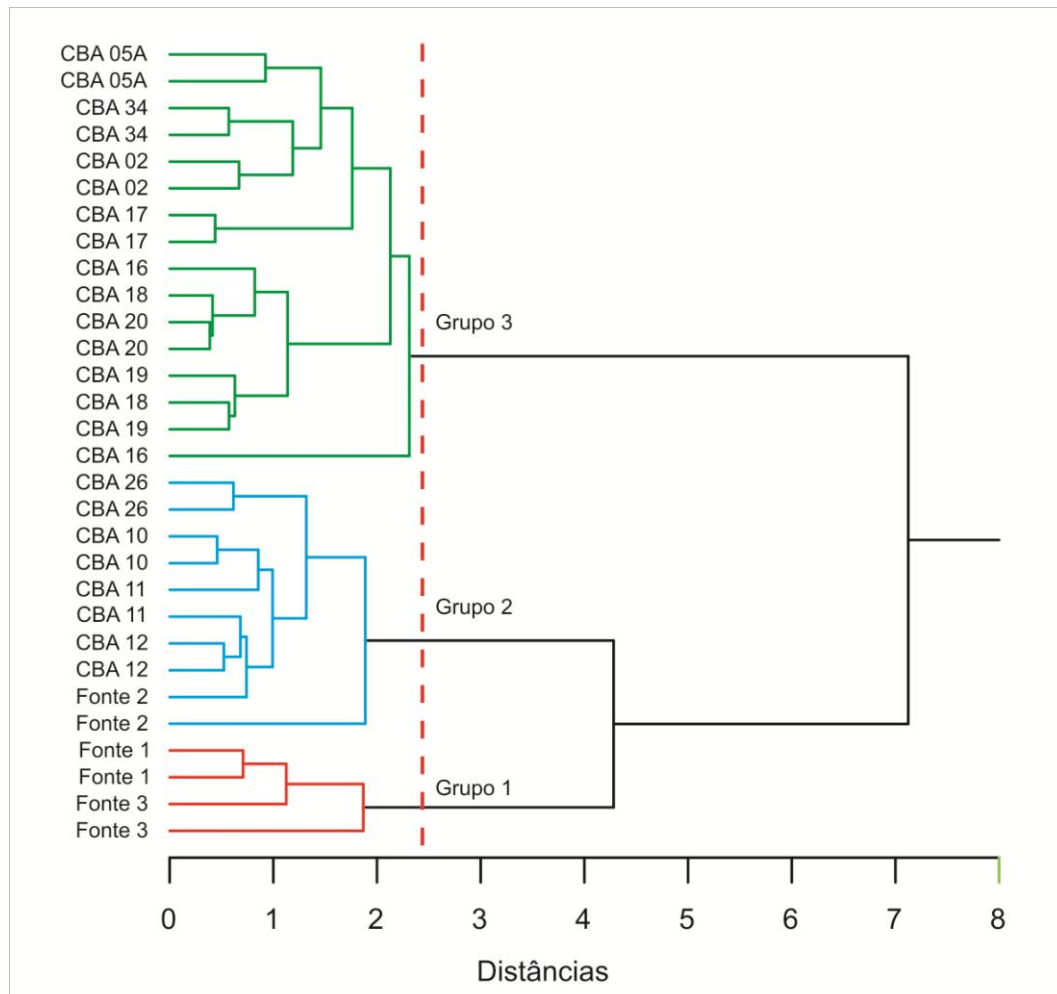
<b>Parâmetro</b>	<b>Kruskal-Wallis</b>	<b>p-value</b>
<b>Temperatura</b>	5,227	0,982
<b>pH</b>	20,171	0,125
<b>Condutividade</b>	25,314	0,032
<b>Alctotal</b>	27,983	0,015
<b>HCO<sub>3</sub></b>	27,837	0,015
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	27,474	0,017
<b>Cl<sup>-</sup></b>	23,042	0,06
<b>F<sup>-</sup></b>	18,258	0,195
<b>Fe<sup>+2</sup></b>	13,466	0,49
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	27,564	0,016
<b>Mn<sup>+2</sup></b>	14	0,45
<b>K<sup>+</sup></b>	28,36	0,013
<b>Na<sup>+</sup></b>	26,053	0,025
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	22,193	0,075
<b>STD</b>	26,147	0,025

Esta diferença dos parâmetros e íons analisados entre os poços e fontes amostradas pode ser visualizada nos gráficos da Figura 46.

A partir da identificação destas diferenças buscou-se verificar a relação entre poços e suas entradas de água, verificando a ocorrência de agrupamentos entre os pontos amostrados devido às suas características hidroquímicas. A análise dos agrupamentos forneceu o dendograma apresentado na Figura 47, indicando a existência de 3 grupos de águas, distinguidos pela distância de ligação entre eles, descritos a seguir:



**Figura 46 - Gráficos box-plot de parâmetros e íons que possuem diferença significativa nos poços e fontes analisados**



**Figura 47 - Dendrograma das amostras de águas subterrâneas do SASG na área de estudo**

**Grupo 01:** Grupo de amostras de águas de fontes que apresentaram uma característica diferenciada em relação a categorização obtida pelo diagrama Piper (fonte 1 e fonte 3). Este grupo representa águas com baixo grau de mineralização, provenientes da zona de recarga de aquíferos. Entende-se que, apesar de estes pontos apresentarem características de águas sulfatadas/cloretadas cálcicas/magnesianas, estas fontes pertencem ao aquífero fraturado, por serem fontes de encostas e por possuírem características hidroquímicas diferentes de águas do aquífero livre, como descrita por Reginato et al. (2012). Ainda que estes pontos apresentem baixa alcalinidade, e concentrações de cálcio, sódio, estes e outros valores como de magnésio, potássio e sólidos totais dissolvidos são maiores do que valores encontradas em aquíferos livres da região.

**Grupo 02:** Grupo formado por amostras de poços onde a entrada de água é inferior a 30 metros, localizado no derrame ácido 3, em altitudes entre 620 e 649 metros, sendo que a água circula por meio de riodacitos fraturados com disjunções horizontais (CBA 10, CBA 12) e, alguns poços, possuem na profundidade da entrada de água, minerais e veios injetados (CBA 11). Neste grupo também entrou a fonte 2, com características muito similares ao poço CBA 12. Os poços pertencentes a este grupo apresentam menor valor de pH (média de 5,7), menor concentração de  $\text{HCO}_3$  (média de 28,9 mg/L),  $\text{Na}^+$  (média de 7,34 mg/L),  $\text{Ca}^{+2}$  (média de 11,1 mg/L) e sólidos totais dissolvidos, com média de 74 mg/L (Figura 46).

Essas características podem ser explicadas pela existência de uma entrada de água menos profunda, o que contribui para uma maior recarga e circulação da água subterrânea rasa, favorecendo assim a renovação e a baixa concentração de elementos. Os componentes dissolvidos estão diretamente relacionados ao tempo de residência da água nos aquíferos e às maiores concentrações de sólidos dissolvidos. Valores baixos de STD e íons presentes nas amostras analisadas podem refletir um tempo de residência potencialmente curto, limitando o tempo de interação água-rocha.

Nestas águas mais ácidas são observados menores valores de STD. Isto indica que a acidez da solução de percolação que infiltra no solo relaciona-se com o ácido carbônico e apresenta pH baixo (MANASSES et al., 2007). À medida que a água subterrânea se move no aquífero, ocorre redução da acidez devido às reações de intemperismo químico, sendo estabelecido o equilíbrio iônico e ocorre aumento na quantidade de sólidos dissolvidos na solução de lixiviação. Dessa forma, águas com maior teor de STD apresentam maior valor de pH.

A exceção deste grupo, refere-se ao poço CBA 26, o qual apresenta características muito próximas ao CBA 10, em termos de STD, condutividade, cálcio e alcalinidade, porém possui entrada de água próxima a 70 metros.

A circulação de água nesta profundidade está restrita a diaclasamentos ou regiões próximas a contato de derrames onde ocorrem rochas vesiculares a amigdaloides. Neste sentido, o poço CBA 26 possui sua entrada de água localizada entre o Derrame Ácido 2 e Derrame Ácido 3 pelo levantamento regional. As características químicas da água são mais semelhantes ao grupo 2, exceto em termos de concentração de sódio e pH, cujos valores são maiores, apresentando uma média respectiva de 9,45 mg/L de sódio e pH de 6,17, e concentração menor de  $\text{Mg}^{+2}$ , correspondendo a 1,47 mg/L, possível reflexo da entrada de água ser mais profunda.

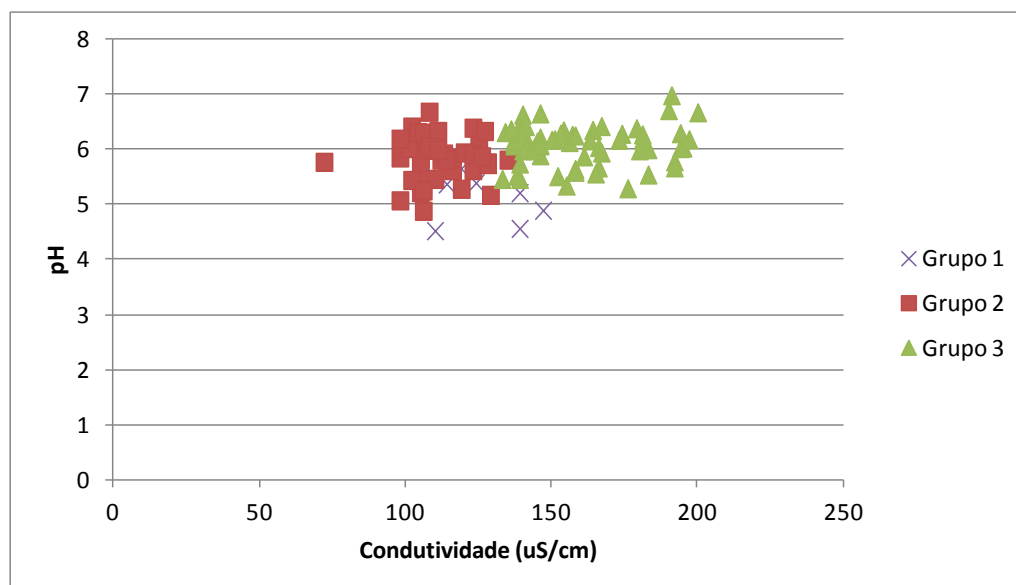
**Grupo 03:** Amostras provenientes de poços com entrada de água mais profunda, que varia de 50 a 112 metros, localizada no derrame ácido 1, em altitudes entre 500 e 561 metros, com presença de riolitos, em sua maior parte preenchido por vesículas e amígdalas. Os poços agrupados são: CBA 16, CBA17 CBA 18, CBA 19 e CBA20. Além disso, 2 poços estão localizados no derrame ácido 2, com presença de riodacito com disjunções horizontais (CBA 05, CBA 34) e um poço com duas entradas de água, uma no derrame ácido 4 e outro no derrame ácido 3 (CBA 02).

A água coletada nestes poços apresentam semelhança entre si em relação a condutividade que varia entre 140 e 200 uS/cm, superior ao do grupo 2, devido a profundidades das entradas de água, as quais são mais profundas, possivelmente com maior tempo de interação água-rocha possibilitando maior dissolução de íons, como cálcio, sódio, magnésio.

A água com maior tempo de contato com a rocha permite intemperização maior dos minerais, especialmente os plagioclásios cálcicos e sódicos, os quais são liberados mais rapidamente que o potássio. Dessa forma, são observados valores maiores de Cálcio e Sódio, com média de 17,19 mg/L, e 12 mg/L, respectivamente, verificando enriquecimento deste íon em função do confinamento. Ao mesmo tempo observa-se concentrações de bicarbonato que variam de 65 a 80 mg/L, valor quase 2,5 vezes superior ao grupo com entradas de água em até 30 metros. Isso pode estar relacionado a um maior grau de confinamento ou a presença de minerais de carbonato que ocorrem preenchendo fraturas ou amígdalas. A concentração maior de minerais reflete em um maior valor de sólidos totais dissolvidos, em média 100 mg/L, e um pH maior, com média de 6,1.

O poço CBA 17 apresentou as maiores concentrações de todas as amostras em termos de cálcio, sódio e bicarbonatos, com médias de 21,9 mg/L, 15,32 mg/L e 94,4 mg/L respectivamente, exemplificando o fato que com entradas de água mais profundas, maior a concentração destes íons. Dos casos amostrados, este poço apresenta a segunda maior profundidade, inferior apenas ao CBA19. Entretanto, ao observar as características hidroquímicas do CBA19, verifica-se que as concentrações são inferiores ao CBA17, resultado possível de mistura de águas de outra entrada que este poço possui.

A particularidade deste grupo está associada as maiores valores de condutividade, pH (Figura 48) e STD quando comparados com outros poços, além de cálcio, resultado da presença de calcita nas vesículas e amígdalas dos derrames, sendo esta grande controladora de cálcio nas águas, principalmente com pH mais elevado.



**Figura 48 - Relação entre condutividade e pH nas amostras analisadas**

A relação entre condutividade e pH indica a existência de aumento de ambos os parâmetros, com maior variação da condutividade em poços com entradas mais profundas, como o caso do grupo 3, quando comparados ao poços menos profundos do grupo 2.

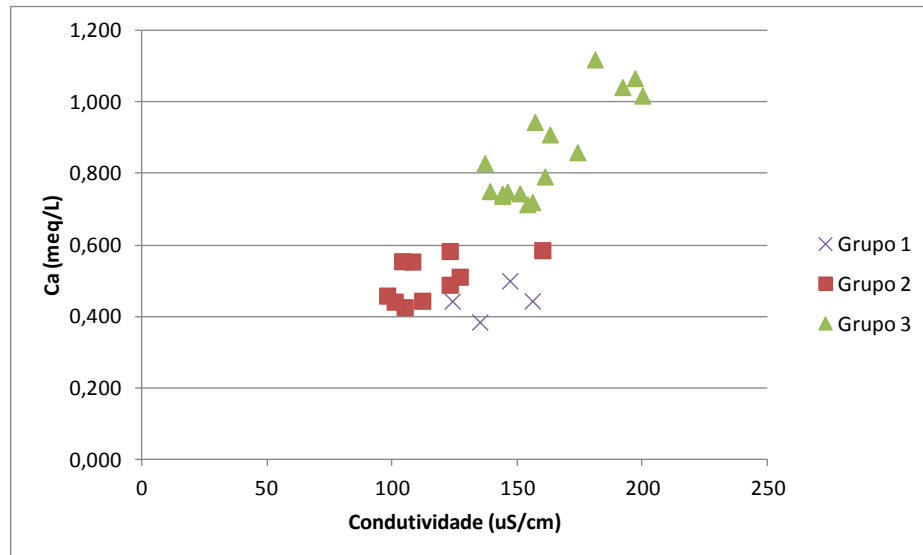
Outras correlações entre os parâmetros, e entre os principais cátions e ânions são apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12 - Correlação entre os principais parâmetros hidroquímicos**

	pH	COND	ALC	HCO3	Ca	Cl	Mg	K	Na	SO4	STD	F	Fe2	Mn	TEMP
pH	1														
COND	0,306	1													
ALC	0,714	0,557	1												
HCO3	0,706	0,552	0,999	1											
Ca	0,601	0,824	0,869	0,87	1										
Cl	-0,183	0,381	-0,355	-0,348	0,075	1									
Mg	-0,333	0,388	-0,116	-0,104	0,135	0,441	1								
K	-0,507	-0,206	-0,726	-0,723	-0,558	0,504	0,241	1							
Na	0,398	0,722	0,618	0,615	0,74	0,238	0,095	-0,331	1						
SO4	-0,493	0,253	-0,469	-0,472	-0,179	0,589	0,511	0,447	0,178	1					
STD	0,248	0,851	0,543	0,535	0,741	0,299	0,482	-0,298	0,638	0,261	1				
F	0,275	-0,009	0,397	0,397	0,192	-0,31	-0,34	-0,424	0,312	-0,34	-0,04	1			
Fe2	-0,358	-0,056	-0,336	-0,333	-0,26	0,291	0,236	0,356	-0,05	0,46	-0,05	-0,08	1		
Mn	0,091	-0,047	0,192	0,196	0,125	-0,27	-0,10	-0,102	0,016	-0,12	-0,05	-0,01	-0,04	1	
TEMP	0,064	0,351	0,196	0,175	0,133	-0,16	0,045	-0,068	0,135	0,196	0,33	0,27	-0,06	-0,03	1

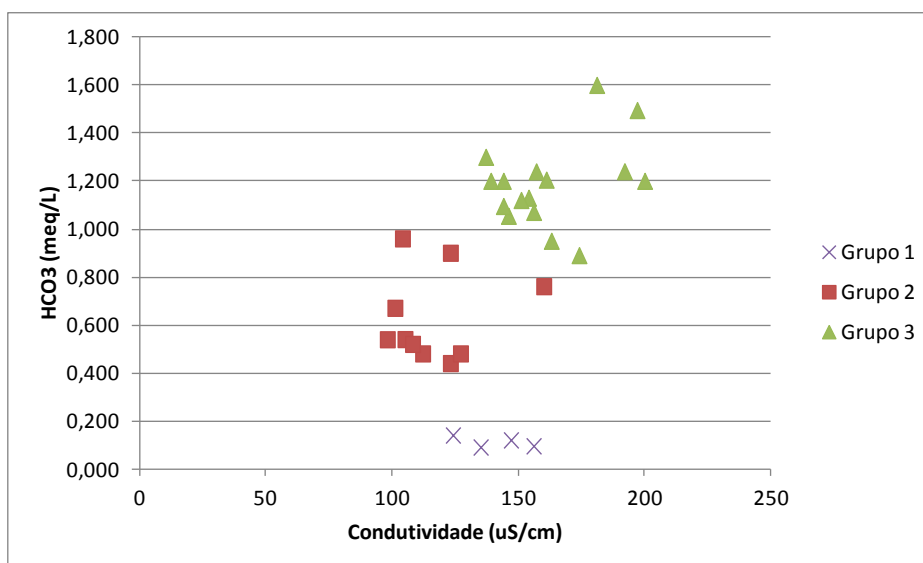


O comportamento do cálcio em relação ao aumento da salinização das águas pode ser analisado por sua relação com a condutividade, que é de 0,824 para o total de amostras (Figura 49).



**Figura 49 - Gráfico de correlação entre condutividade e cálcio**

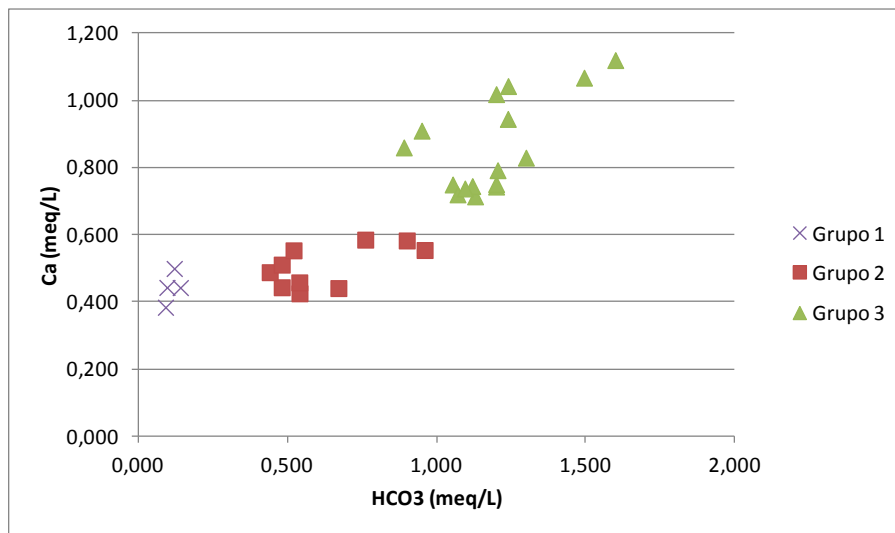
Em poços localizados no derrame ácido 3 ou no contato entre os derrames 2 e 3 como o poço CBA26, verificou-se menores salinidades em função da menor concentração de cálcio. A situação contrária também foi verificada nos poços com entradas de água mais profundas e que estão localizadas no derrame ácido 1 e 2, onde a salinidade é maior, sendo encontrada maior concentração do íon cálcio. A Figura 50 apresenta a correlação por grupo entre  $\text{HCO}_3^-$  e condutividade.



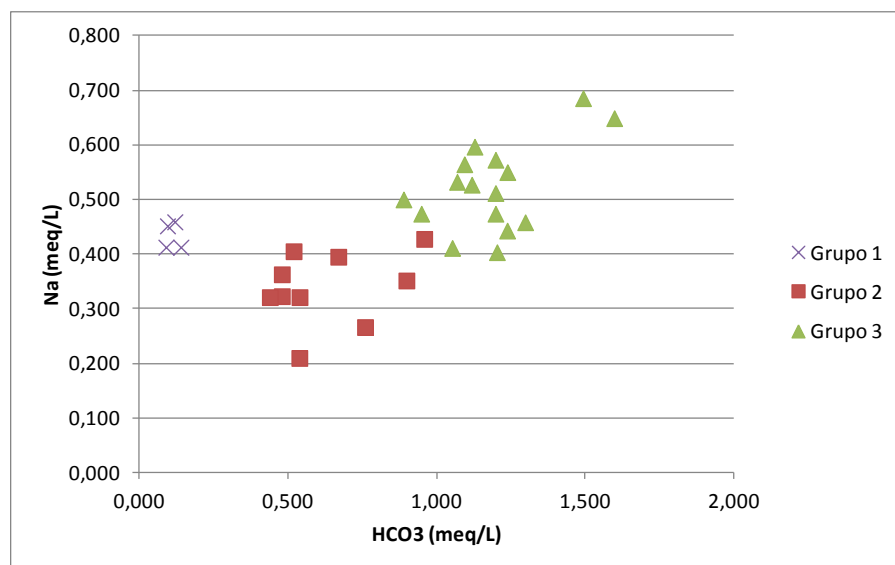
**Figura 50 - Correlação entre  $\text{HCO}_3^-$  e condutividade nas amostras analisadas**

Em função do bicarbonato ser o principal ânion presente nas águas subterrâneas coletadas, é de se esperar um relação linear entre suas concentrações e a condutividade. Pelo gráfico anterior observa-se que as fontes apresentam baixas concentrações de bicarbonato e à medida que as entradas de águas são mais profundas ocorre um aumento tanto na concentração de bicarbonatos como de condutividade gerando uma correlação de 0,552 entre os parâmetros analisados.

As relações dos principais cátions (cálcio e sódio) com o principal ânion (bicarbonato), apresentam comportamentos semelhantes aos observados em relação à condutividade, com correlações de 0,87 e 0,62, respectivamente, como pode ser observado na Figura 51 e Figura 52.



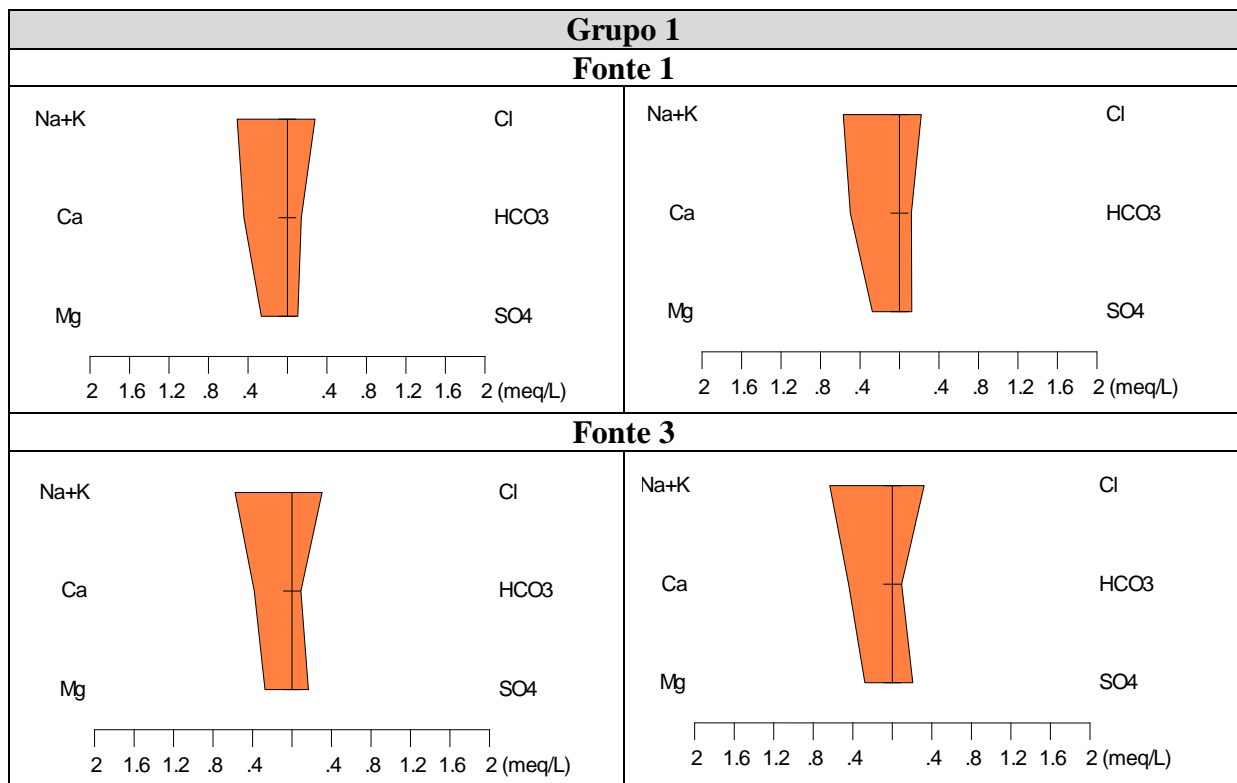
**Figura 51 - Correlação entre cálcio e HCO<sub>3</sub> nas amostras analisadas**



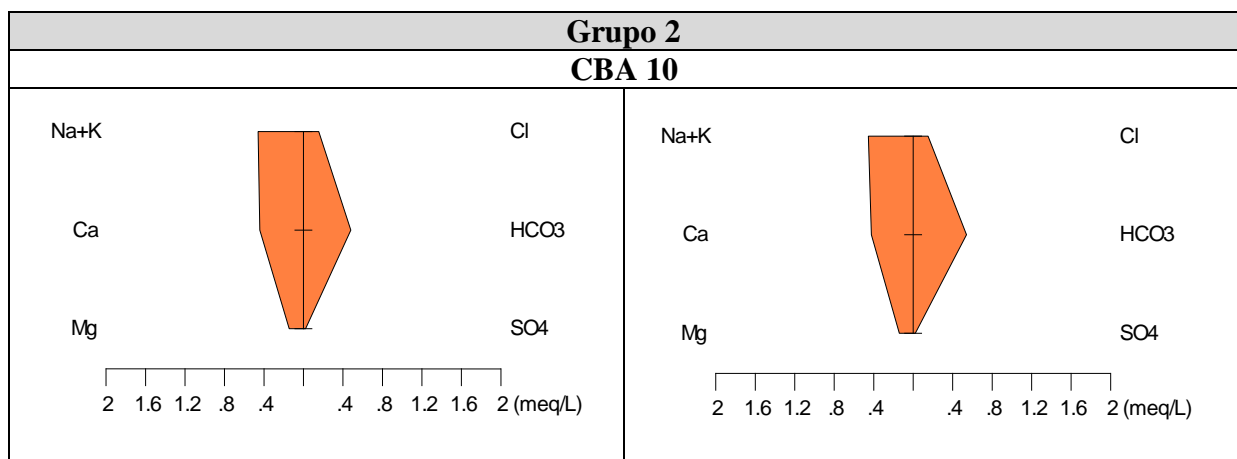
**Figura 52 - Correlação entre sódio e HCO<sub>3</sub> nas amostras analisadas**

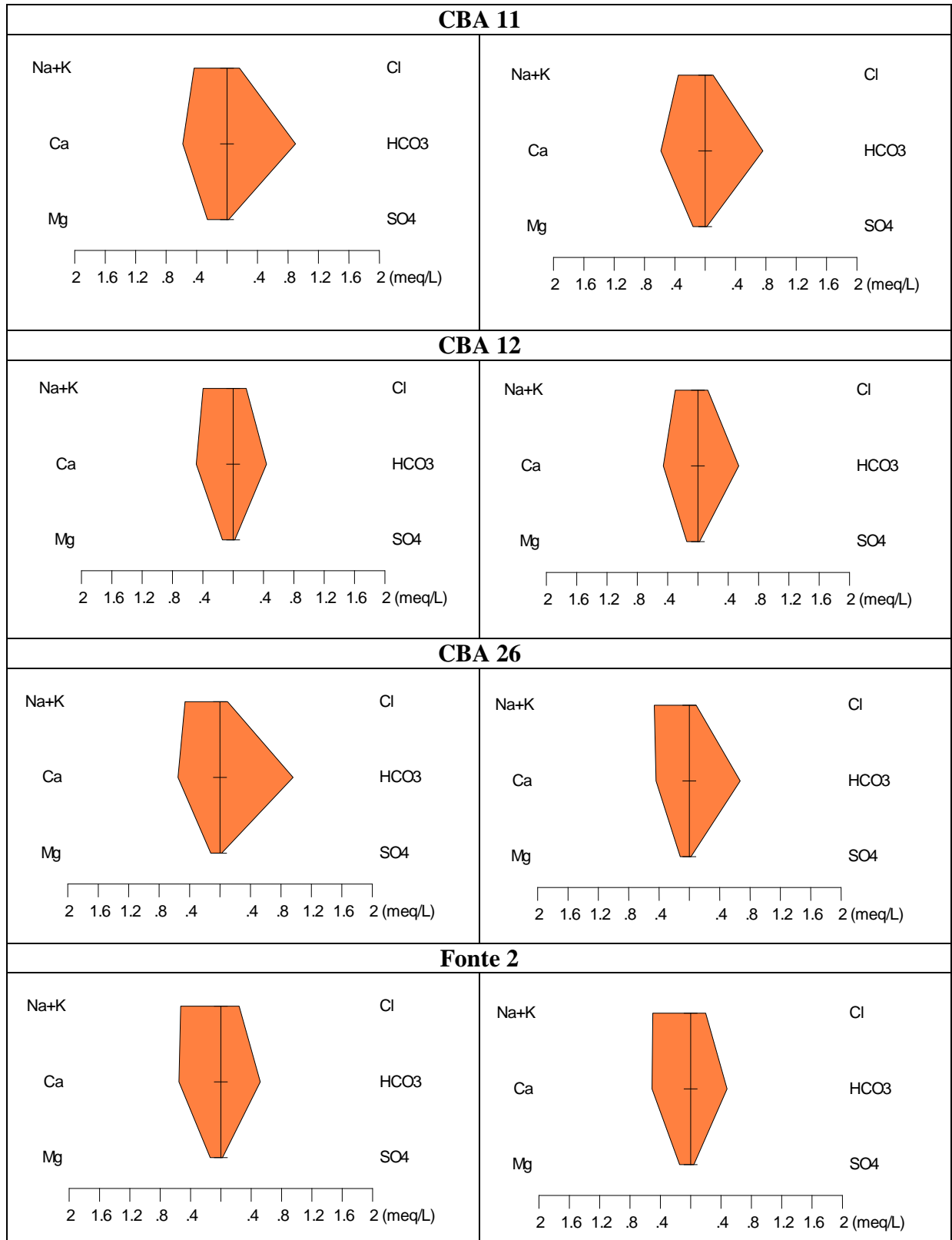
Os poços que apresentam maior concentração de cálcio também possuem maior concentração de bicarbonatos indicando um maior grau de dissolução da calcita, resultado de maior tempo de armazenamento no aquífero e permitindo maior tempo de interação entre água e rocha.

Pela análise do diagrama Stiff, apresentado nas Figura 53, 54 e 55, também pode ser identificada a diferença de águas localizadas em um mesmo derrame ácido, quando observadas as geometrias das figuras do grupo de poços analisados.

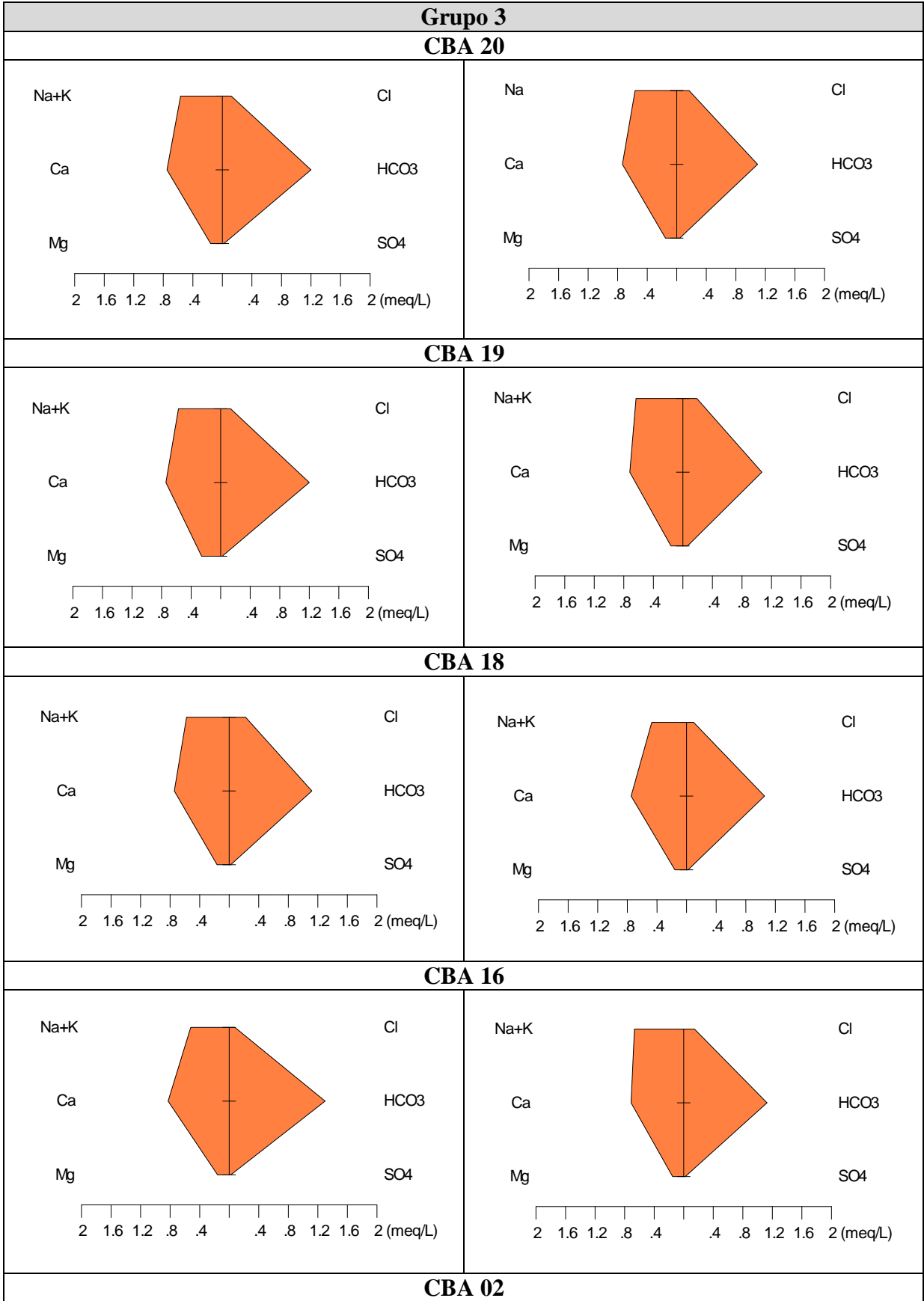


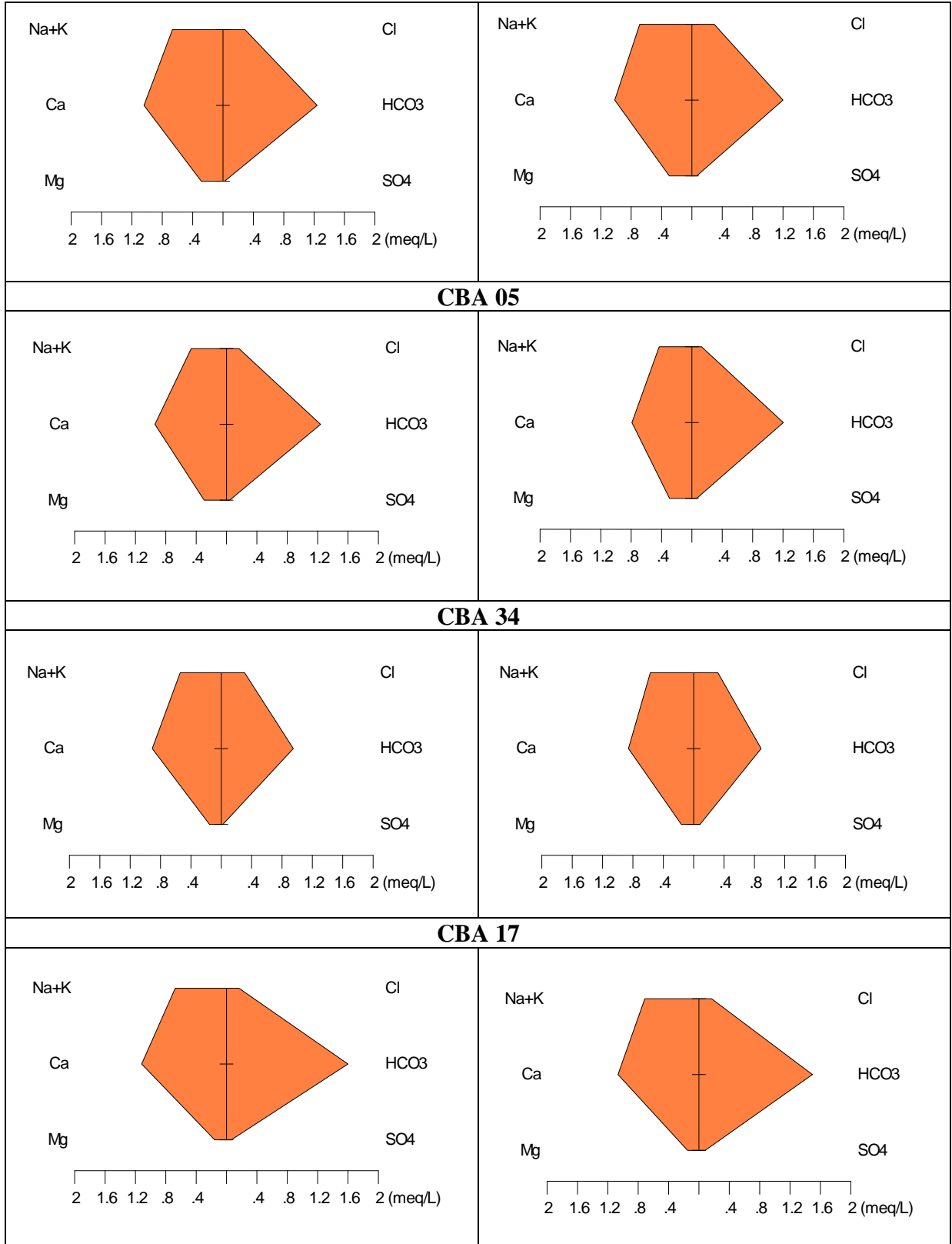
**Figura 53 - Geometrias observadas no Diagrama de Stiff referente ao grupo 1 das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo.**





**Figura 54 - Geometrias observadas no Diagrama de Stiff referente ao grupo 2 das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo.**





**Figura 55 - Geometrias observadas no Diagrama de Stiff referente ao grupo 3 das amostras de água subterrânea do SASG na área de estudo.**

Apesar das amostras apresentarem uma feição geométrica semelhante, características das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, com exceção das fontes 1 e 3, pode-se perceber uma variação na concentração dos íons, quando as entradas de água estão localizadas em profundidades e derrames diferentes, corroborando com os resultados anteriores, mostrando que ocorrem diferenças hidroquímicas entre poços localizados em um mesmo derrame ácido regional. Entretanto, localmente, verifica-se que os diversos derrames em sequência proporcionam a observação de pequenas diferenças, as quais são verificadas pelo agrupamento de poços que possuem entradas de água localizadas em profundidades semelhantes, mesmo estando em fraturas diferentes.

As relações entre os íons dissolvidos nas águas subterrâneas podem estar associadas às litologias atravessadas, indicar fenômenos modificadores, ou ainda indicar alguma característica específica da água (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983). O uso de relações entre diversos íons pode fornecer o tipo de reações químicas que estão associados aos processos hidroquímicos. A Tabela 13 apresenta a média dos valores encontradas das razões iônicas para as duas amostragem realizadas.

**Tabela 13 - Razões iônicas calculadas em meq/L**

Poço	$rMg^{+2}/Ca^{+2}$	$rK^{+}/Na^{+}$	$rNa^{+}/Ca^{+2}$	$rNa^{+}/Ca^{+2}+Mg^{+2}$	$rCl^{-}/HCO_3^{-}$	$rNa^{+}/Cl^{-}$	$rHCO_3^{-}/Ca^{+2}$	$rCa^{+2}/Mg^{+2}$	$rNa^{+}/K^{+}$
CBA02	0,284	0,207	0,545	0,424	0,239	1,924	1,185	3,527	4,828
CBA05A	0,342	0,061	0,489	0,364	0,119	2,941	1,418	2,946	16,623
CBA10	0,329	0,423	0,742	0,558	0,301	2,107	1,178	3,038	2,365
CBA11	0,359	0,284	0,529	0,387	0,159	2,348	1,424	2,949	3,656
CBA12	0,307	0,334	0,558	0,428	0,315	1,741	1,041	3,265	3,261
CBA16	0,201	0,130	0,694	0,577	0,095	4,981	1,576	4,989	7,752
CBA17	0,140	0,042	0,611	0,536	0,107	4,041	1,416	7,138	23,901
CBA18	0,216	0,119	0,628	0,516	0,145	3,325	1,457	4,634	8,739
CBA19	0,286	0,201	0,688	0,539	0,144	3,172	1,552	3,670	4,988
CBA20	0,210	0,105	0,724	0,598	0,126	3,810	1,543	4,753	9,482
CBA26	0,247	0,124	0,834	0,668	0,119	4,342	1,629	4,092	9,485
CBA34	0,179	0,144	0,551	0,467	0,341	1,551	1,041	5,604	6,952
Fonte 1	0,576	0,241	1,853	1,176	1,915	1,781	0,557	1,739	4,142
Fonte 2	0,270	0,345	1,443	1,137	0,438	1,756	1,883	3,718	2,929
Fonte 3	0,671	0,402	2,096	1,254	3,389	1,376	0,450	1,496	2,487
Média	0,308	0,211	1,372	1,046	0,530	2,746	2,387	3,837	7,439

As razões iônicas calculadas permitem evidenciar fluxo de água por rochas vulcânicas, observadas pela razão  $rNa^{+}/Cl^{-}$  maior que 0,7 como apresentado por Hem (1985) e pela relação  $rNa^{+}/Ca^{+2}$  ser inferior a 1, corroborando com a caracterização do diagrama Piper em águas bicarbonatadas cálcicas, valor também apontado por Portela Filho et al. (2005) no

estudo da contribuição do aquífero basáltico sobrejacente ao Sistema Aquífero Guarani. A origem do bicarbonato é oriunda da dissolução da calcita, a qual apresenta uma razão teórica  $r\text{HCO}_3/\text{Ca}^{+2}$  próxima de 1,5 (ROISENBERG et al., 2003), encontrando-se em média nos poços analisados um valor próximo a 1,4.

As relações entre os metais alcalinos ( $r\text{K}^+/\text{Na}^+$ ) variam de 0,042 a 0,423 sendo os valores mais elevados em poços com entrada de água menos profunda e fontes, influenciada principalmente pela infiltração de água da chuva que arrasta potássio do regolito. Em zonas com entradas de água em maior confinamento, ou seja, mais profundas, ocorre a perda do potássio que se agrega a argilominerais, aumentando as concentrações de sódio devido à troca iônica. A razão de ânions  $r\text{Cl}/\text{HCO}_3^-$  variou entre 0,095 a 0,341 nos poços, chegando a 3,39 nas fontes. Este valor elevado para as fontes, pode ser explicado pelo fato que as águas analisadas foram coletadas das caixas de captação das fontes, já que essas caixas podem receber também água da chuva proveniente do escoamento ou mesmo águas do freático que podem estar contaminadas. Geralmente os valores para esta razão são baixos, em função da própria característica da água, que tem como ânion principal o bicarbonato e reduzidas concentrações de cloreto.

Outras razões iônicas como  $r\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$  e  $r\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$  foram encontradas em média e respectivamente no valor de 0,258 e 0,633, valores que estão dentro dos intervalos atribuídos em outros estudos da Formação Serra Geral como de Gastmans et al. (2005). A razão  $r\text{Na}^+/\text{K}^+$  maior que 1 é mais elevado nos poços CBA05A e CBA17, indicando a ocorrência de um fluxo com maior tempo de residência.

Segundo Bittencourt et al. (2003), valores mais elevados da relação  $r\text{Na}^+/\text{K}^+$  são indicativos de fluxo em basaltos. A relação com valores mais altos pode estar associada ao padrão de circulação das fraturas, a qual ocorre entre rochas ácidas e básicas e por diferença de pressão pode ocorrer misturas de águas de diferentes profundidades. Cabe salientar que estes dois poços possuem profundidades que atingem o derrame básico 1 e 2, podendo existir entradas de água nesses níveis, mas que não foram identificadas no perfil do poço.

Embora os poços tubulares selecionados tenham sido perfurados na sequência de rochas vulcânicas ácidas, as estruturas tectônicas encontradas nas litologias cortam diferentes derrames e podem proporcionar diferentes padrões de circulação, dando origem a padrões hidroquímicos e razões iônicas distintas. Essas características podem ser melhor visualizadas na **Figura 56**, a qual apresenta um modelo conceitual hidroquímico preliminar para o sistema aquífero SASG em derrames ácidos e básicos da área de estudo.



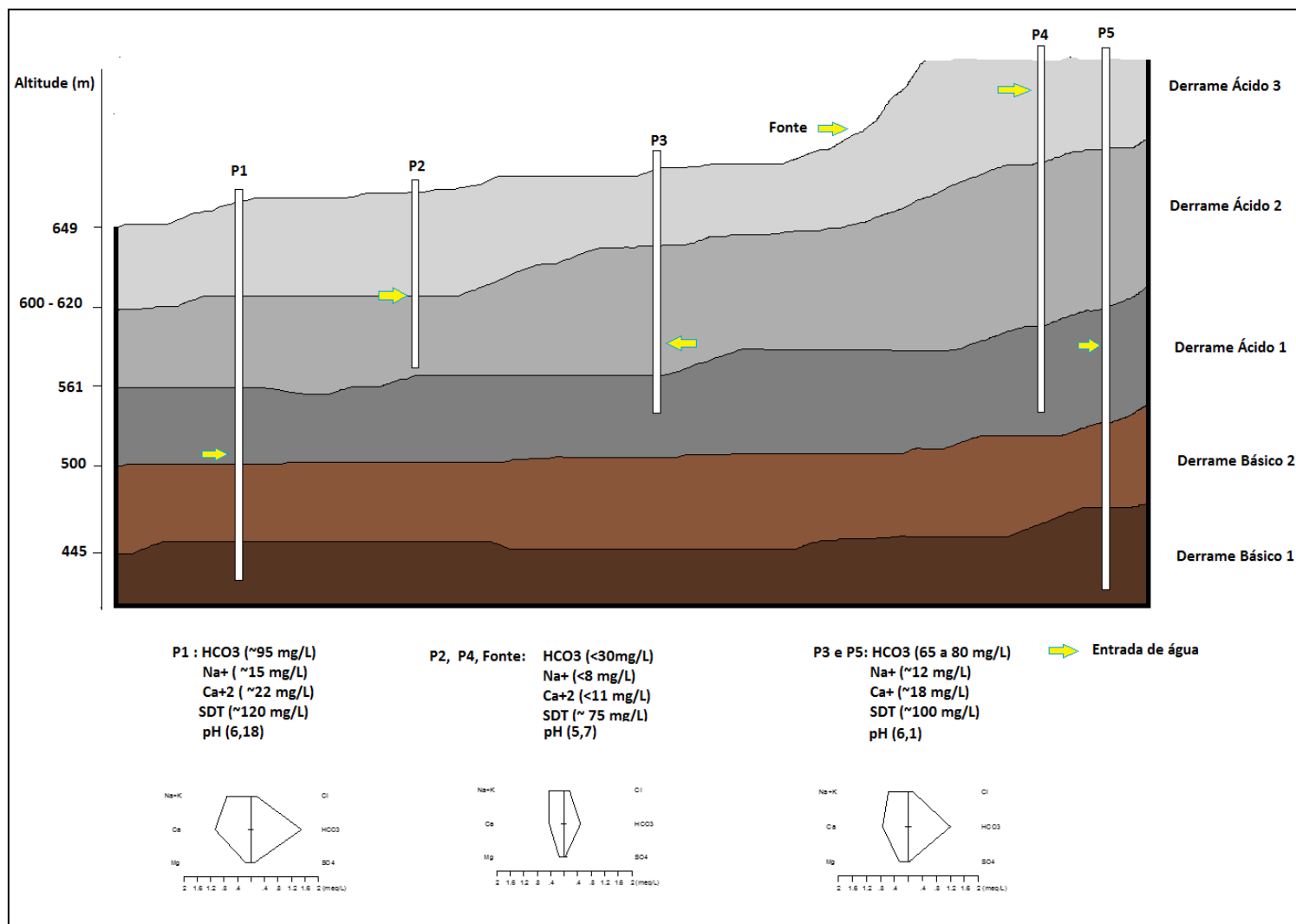


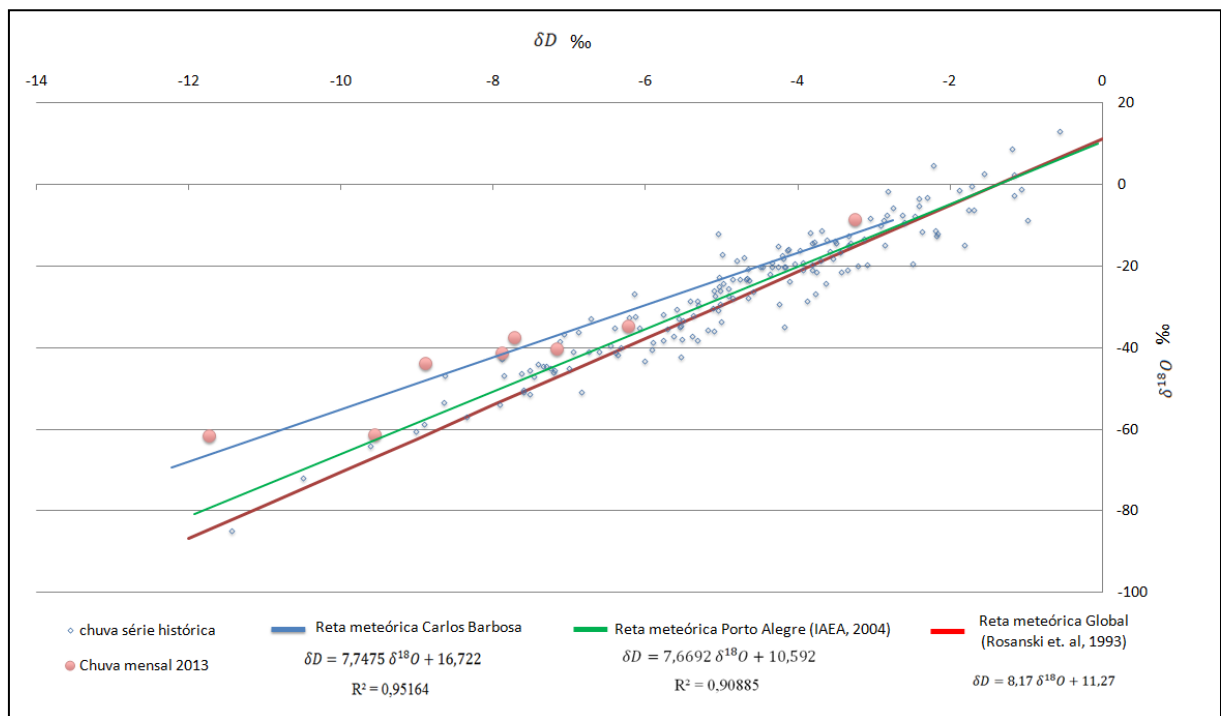
Figura 56 - Modelo conceitual hidroquímico preliminar do SASG para a área de estudo

De acordo com o modelo conceitual hidroquímico preliminar, poços com entrada de água mais rasa, representados pelos pontos P2, P4 e Fonte, possuem menores concentrações dos íons analisados, bem como pH mais ácido, resultante uma rápida circulação que não permite o estabelecimento do equilíbrio químico. Ao aumentar a profundidade da entrada de água, o tempo de residência da água que infiltrou é maior, permitindo que ocorra processos de interação água-rocha, aumentando a concentração dos íons, característica dos poços P1, P3 e P5.

O fato de ter variações entre concentrações em poços localizados em um mesmo intervalo de profundidades de entradas de água pode estar associado às mineralizações, bem como os poços podem ter interações com águas que circulam em maior profundidade mas que em função de pressões ou do sistema de fraturas podem se interconectar e provocar essas mudanças nas características químicas.

### 6.3.2 Padrões Isotópicos

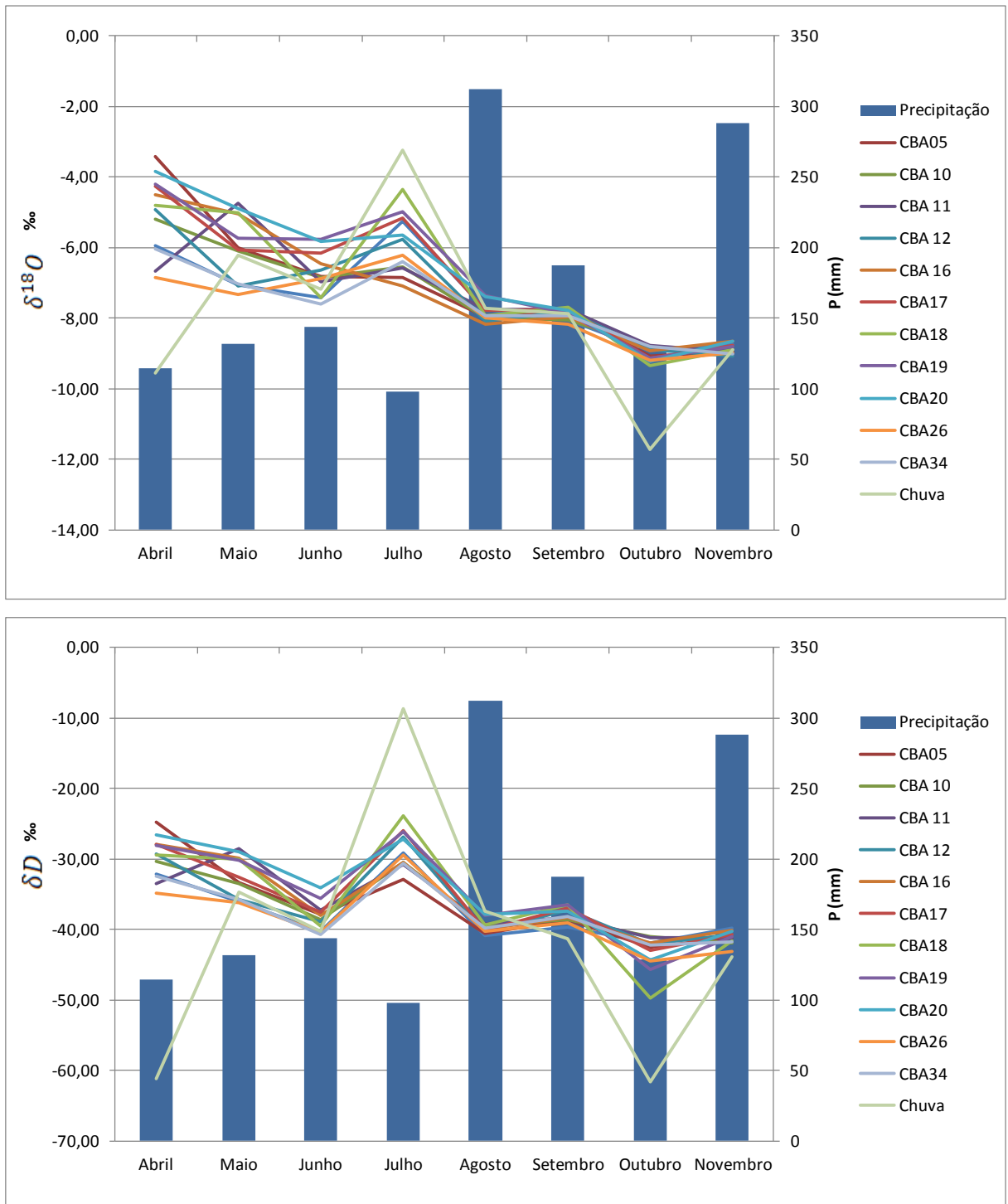
A partir da análise dos resultados de dados isotópicos de água da chuva coletada no período de abril a novembro de 2013, pode ser estabelecida a reta meteórica para Carlos Barbosa, conforme apresentado na Figura 57.



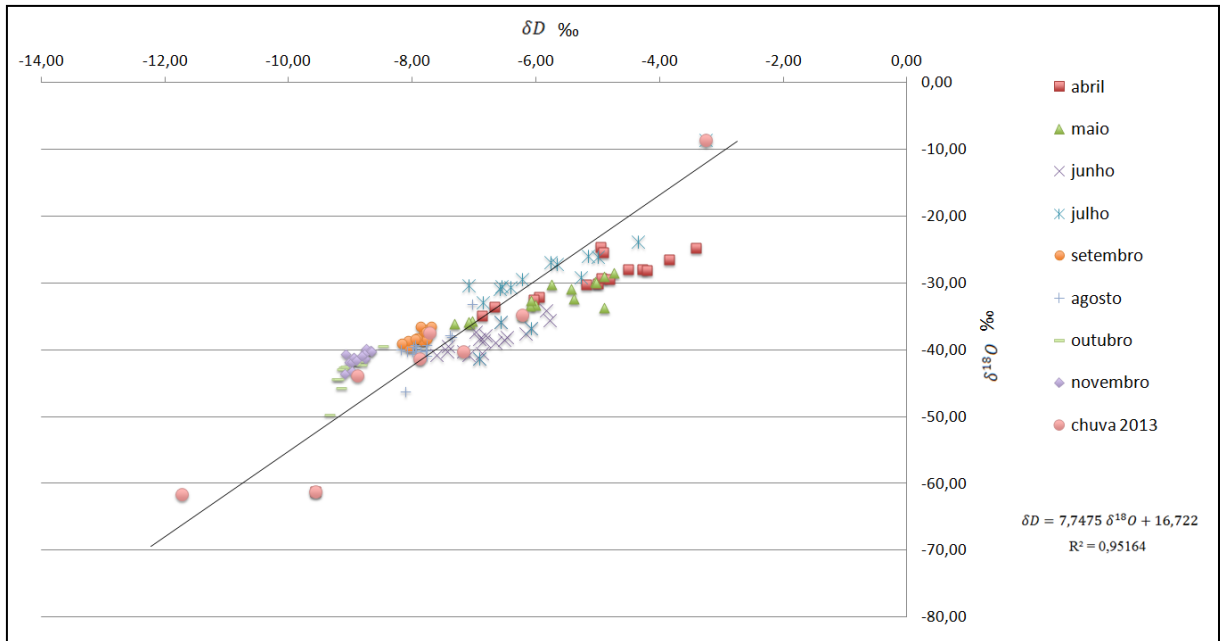
**Figura 57 - Reta meteórica de Carlos Barbosa**

A reta meteórica de Carlos Barbosa localiza-se acima da reta meteórica global (ROZANSKI et al., 1993) e da reta meteórica da cidade de Porto Alegre (IAEA, 2004), apresentando média de  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$ , respectivamente de -7,8‰ e -41,12‰, valores mais empobrecidos que à cidade de Porto Alegre, a qual apresenta média de  $\delta^{18}O$  igual a -4,79‰ e  $\delta D$  igual a 26,3‰ em função principalmente dos efeitos ocasionadas pela altitude e distância da costa continental (SANTIAGO et al., 2008).

Os valores de  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$  são apresentados no Anexo B e para as águas das chuvas variaram de -11,73 a -3,25‰ e de -61,56 a -8,63‰ respectivamente, sendo que a variação da razão isotópica da chuva é normal, e se correlaciona com o volume da precipitação mensal: meses com menor precipitação tendem a ser menos negativos tendendo a 0, chegando a apresentar valores positivos; nos meses com volume de chuva maiores, os valores tendem para níveis mais negativos, como mostrado na Figura 58 e na Figura 59 que apresentam a variação do sinal isotópico nos meses monitorados. Isso se deve ao fato que em períodos com menores precipitações, o teor de umidade atmosférica é menor e as temperaturas são maiores, aumentando a concentração de deutério na água de chuva, apresentando efeito de sazonalidade, como exposto por Santiago et al. (2008).

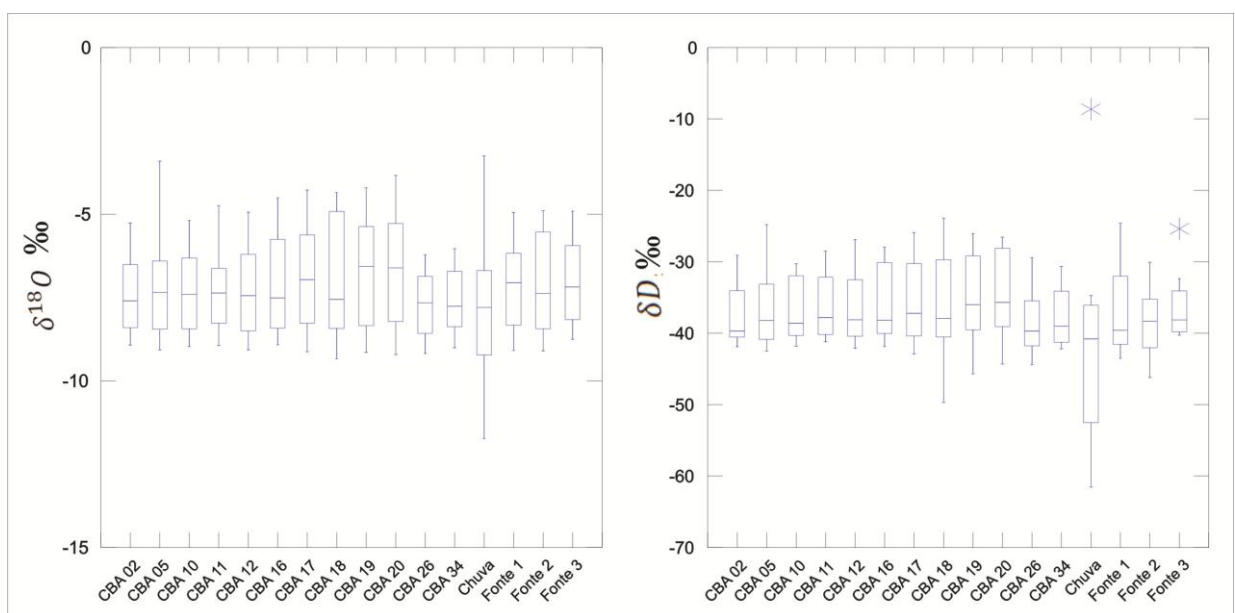


**Figura 58 - Variação do sinal isotópico em relação à quantidade de chuva**



**Figura 59 - Variação do sinal isotópico de  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$  nos meses monitorados**

A análise de isótopos nos poços e fontes monitorados apresentam resultados estatisticamente semelhantes, com *p-value* de 0,997 para  $\delta^{18}O$  e 0,949 para  $\delta D$  a um nível de significância de 5% na aplicação do teste de Kruskal Wallis. Isso mostra que os poços, fontes e a água da chuva são semelhantes indicando que água subterrânea pode ser caracterizada isotopicamente como originada por infiltração da precipitação nas áreas de recarga. Observando a Figura 60, verifica-se que não ocorrem grandes diferenças em relação aos pontos analisados.



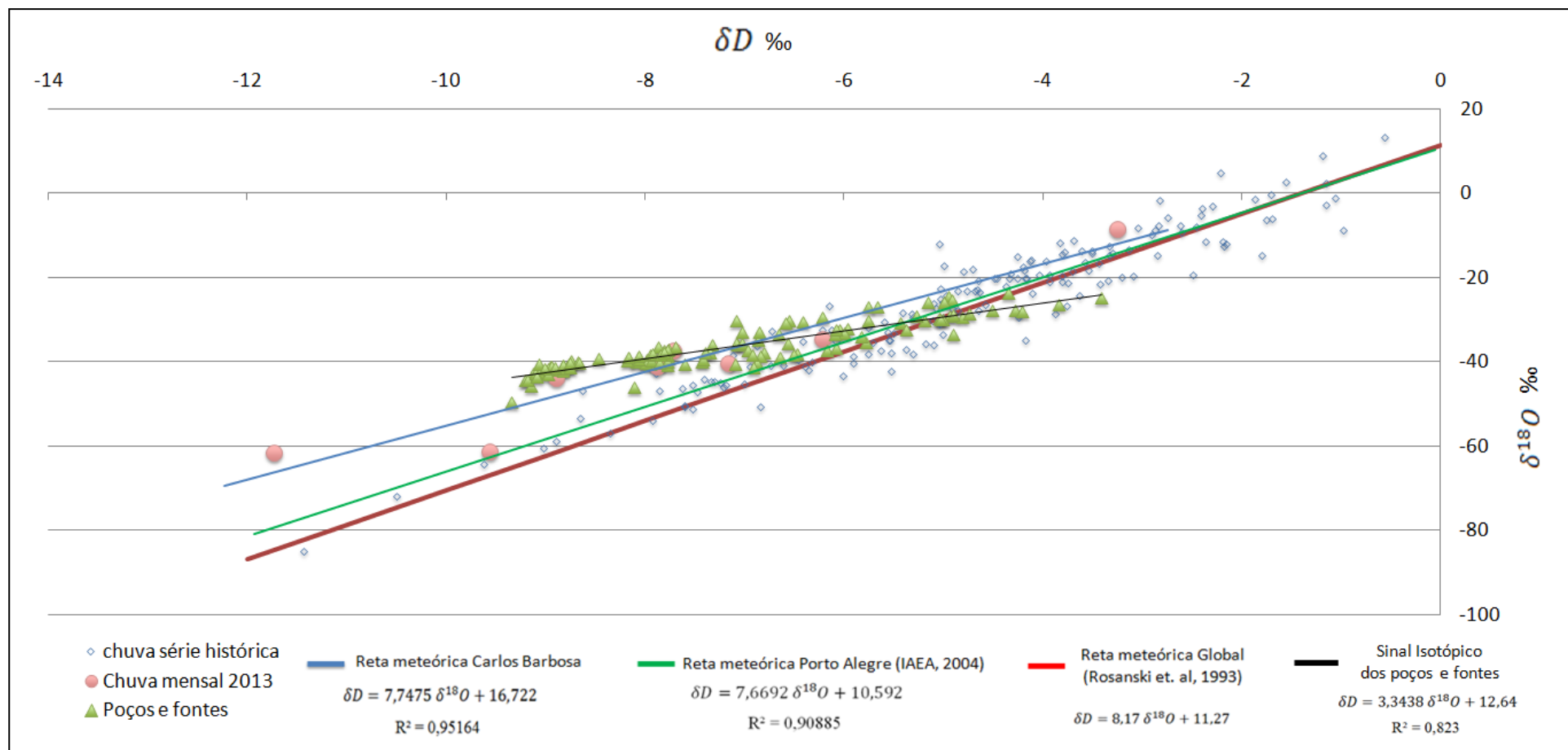
**Figura 60 - Gráficos boxplot de comparação de isótopos entre os pontos amostrados**

Entretanto, quando comparado os valores das retas meteóricas global, regional, local e o sinal da razão isotópica das águas subterrâneas (Figura 61), pode-se perceber uma atenuação nos valores destes últimos, principalmente no deutério, devido sua maior amplitude, podendo ocorrer isso em função da interação entre água e solo, água e rocha e do tempo de percolação e de permanência no reservatório. Estas pequenas diferenças entre poços podem ser melhor verificadas analisando a Tabela 14 que apresenta as principais estatísticas descritivas dos isótopos estáveis avaliados.

**Tabela 14 - Principais estatísticas descritivas de  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$**

Amostra	$\delta D$ (‰)				$\delta^{18}O$ (‰)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
CBA 02	-37,46	-41,90	-29,11	4,63	-7,40	-8,93	-5,27	1,28
CBA 05	-36,48	-42,51	-24,81	5,86	-7,11	-9,07	-3,41	1,83
CBA 34	-37,71	-42,18	-23,87	4,34	-7,60	-9,01	-4,35	1,06
CBA 10	-36,73	-41,85	-30,29	4,66	-7,31	-8,97	-5,19	1,35
CBA 11	-36,26	-41,20	-28,53	4,77	-7,28	-8,94	-4,74	1,36
CBA 12	-36,40	-42,12	-26,92	5,53	-7,29	-9,07	-4,94	1,47
CBA 16	-35,82	-41,87	-27,94	5,49	-7,10	-8,92	-4,51	1,65
CBA 17	-35,57	-42,91	-25,90	6,18	-6,89	-9,13	-4,28	1,74
CBA 18	-36,24	-49,71	-23,87	8,18	-6,94	-9,34	-4,35	1,94
CBA 19	-35,14	-45,70	-26,05	6,67	-6,74	-9,15	-4,21	1,82
CBA 20	-34,58	-44,33	-26,55	6,51	-6,66	-9,21	-3,84	1,89
CBA 26	-38,47	-44,42	-29,41	4,86	-7,70	-9,18	-6,22	1,06
Fonte 1	-36,81	-43,53	-24,62	6,60	-7,14	-9,09	-4,95	1,46
Fonte 2	-38,43	-46,19	-30,09	5,10	-7,09	-9,10	-4,90	1,63
Fonte 3	-36,23	-40,28	-25,39	5,11	-7,03	-8,76	-4,91	1,42
Chuva	-41,12	-61,56	-8,63	16,64	-7,80	-11,73	-3,25	2,49

Os resultados indicam enriquecimento médio tanto de  $\delta^{18}O$  quanto de  $\delta D$  dos poços e fontes quando comparados à água da chuva, ocorrendo uma maior diferença em poços com entradas de água mais profundas, como o CBA 17, CBA 18, CBA 19 e CBA 20, que apresentaram valores variando de 0,86 a 1,14‰. Estes poços possuem entradas de água superior a 70 metros, indicando que a água possui uma circulação mais lenta que em poços com entrada de água menos profundas (inferiores a 30 metros) como CBA 10, CBA 11 e CBA 12, os quais tiveram enriquecimento médio de  $\delta^{18}O$  em relação à água da chuva apenas de 0,5‰, e fontes com enriquecimento médio de  $\delta^{18}O$  próximo a 0,8‰. Isso indica que há predomínio de circulação rasa, com grande influência de recarga mais recente. O maior valor nas fontes pode ser resultado de processos de evaporação antes da água da chuva entrar no aquífero, como salienta Santiago et al. (2008), o qual cita que ocorre enriquecimento progressivo da água em isótopos pesados quando sujeita à evaporação.



**Figura 61 - Comparações entre a linha de água meteórica global, linha de água meteórica local (IAEA - WMO estação Porto Alegre) e sinal de razão isotópica dos poços analisados**

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na região abrangida pelo município de Carlos Barbosa há ocorrência de aquíferos fraturados que fazem parte do Sistema Aquífero Serra Geral e que estão localizados nos derrames de rochas ácidas da Formação Serra Geral. A maioria dos poços utilizados principalmente para abastecimento público, possuem profundidades entre 50 e 150 metros, nível estático localizado entre 0 e 5 metros, capacidade específica entre 0,1 e 0,5 m<sup>3</sup>/h/m e vazão que varia entre 5 a 20 m<sup>3</sup>/h. O maior percentual de poços possui entre 1 a 3 entradas de água, localizadas em torno de 50 a 100 metros de profundidade e em zonas de média e alta densidade de fraturas, as quais possuem orientação preferencial de noroeste.

A análise do diagrama de Piper indicou que as águas subterrâneas que circulam por esses aquíferos são do tipo bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, predominando as águas bicarbonatadas mistas e cálcicas, cuja concentração dos íons está diretamente relacionada ao arcabouço químico-mineralógico do aquífero. Apenas duas fontes foram classificadas como águas sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas (cloretadas mistas), resultado que pode estar associado a um maior tempo de retenção na caixa de armazenamento, ou a processos de degradação ou contaminação.

Pela análise do diagrama de Schoeller verificou-se a existência de um comportamento hidroquímico geral com pequenas variações nas concentrações dos íons analisados, relacionadas às concentrações de magnésio, sódio, cloro e sulfato e podem ser explicadas pela ocorrência de diferentes entradas de água, localizadas em profundidades distintas de diferentes derrames de rochas vulcânicas ácidas.

De acordo com os parâmetros analisados e as entradas de água em diferentes profundidades pode-se agrupar os pontos amostrados em 3 grupos distintos, também verificado pelo diagrama Stiff: Grupo 1, característico das fontes que apresentam águas sulfatadas ou cloretadas, cálcicas ou magnesianas; Grupo 2, agrupando poços com entrada de água menos profunda, contribuindo para uma maior recarga e circulação da água subterrânea rasa, favorecendo assim a renovação e a baixa concentração de íons; Grupo 3, agrupando poços com entrada de água mais profunda, permitindo maior tempo de contato com a rocha influenciando a maior intemperização dos minerais e por consequência obteve-se maior concentração de íons como cálcio, sódio, bicarbonatos e parâmetros como condutividade e sólidos dissolvidos totais.



Ainda que os poços estejam em derrames ou profundidades semelhantes, podem ocorrer exceções na concentração dos elementos, dando origem a padrões hidroquímicos e razões iônicas distintas, resultado de mistura de águas ou interconexão entre fraturas. Pela análise das razões iônicas evidenciou-se fluxo de água por rochas vulcânicas e apenas em dois poços com fluxo de maior tempo de permanência (CBA05 e CBA17), devido às entradas de água estarem localizadas em profundidades maiores ou geradas pela conexão de fraturas.

A caracterização hidroquímica indica que as águas subterrâneas dessa região apresentam baixo grau de mineralização e baixo tempo de residência, sendo que as exceções foram encontradas em poços que possuíam entradas de água mais profundas.

A análise de isótopos permitiu o estabelecimento da reta meteórica de Carlos Barbosa, a qual está localizada acima da reta meteórica mundial e de Porto Alegre. Além disso, verificou-se que a mudança do sinal isotópico depende da quantidade de chuva, ou seja, meses com maior chuva, os valores de  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$  tendem para níveis mais negativos. Observou-se também que poços, fontes e a água da chuva são semelhantes indicando que água subterrânea encontradas em profundidade de entradas de água até próximas a 100 metros podem ser caracterizadas isotopicamente como originada por infiltração da precipitação nas áreas de recarga.

Recomenda-se um estudo mais aprofundado da região com um maior número de poços em diferentes níveis de profundidade, bem como a utilização de poços que não estão em bombeamento para a avaliação das características hidroquímicas e isotópicas em uma extensão maior de área a fim de verificar a ocorrência do comportamento hidroquímico encontrado neste trabalho.

Sugere-se ainda a avaliação da conectividade entre fraturas como variável de entendimento para as diferenças hidroquímicas existentes em poços localizados no mesmo derrame.

Este trabalho contribuiu no conhecimento hidroquímico e hidrogeológico do sistema aquífero Serra Geral, especificamente em uma região cujo abastecimento de água é realizado somente através deste aquífero. O estudo auxiliou na verificação da existência de diferenças no padrão hidroquímico e isotópico do aquífero fraturado permitindo um melhor entendimento das características deste sistema, facilitando a compreensão quanto aos padrões de circulação, recarga e alterações hidroquímicas.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M.A., 2005. **Estabilidade em análise de agrupamento (cluster analysis)**. *Biometry Masters Thesis*. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco.

ALMEIDA, C. A. S. (2004). **Hidrogeoquímica e vulnerabilidade dos aquíferos Serra Geral e Guarani na área de influência dos reservatórios de Itá e Machadinho, SC-RS**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em Geografia, Florianópolis, 2004.

ALMEIDA, J. R. F. (2009). **Análise estatística multivariada e modelo geoquímico inverso no estudo da qualidade da água subterrânea na bacia do Forquilha em Quixeramobim - Ceará**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2009.

ALEMAYEHU, T., LEIS, A., EISENHAEUER, A., DIETZEL, M. (2011). MULTI-PROXY APPROACH (2H/H, 18O/16O, 13C/12C and 87Sr/86Sr) for the evolution of carbonate-rich groundwater in basalt dominated aquifer of Axum area, northern Ethiopia, *Chemie der Erde - Geochemistry*, In Press.

ATHAYDE G., MÜLLER C., ROSA FILHO E., HINDI E. Compartimentação hidroestrutural e aptidões químicas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 42(Supl 1), 2012.

AYRAUD, V., AQUILINA, L., PAUWELS, H., LABASQUE, T., PIERSON-WICKMANN, A., AQUILINA, A., GALLAT, G., 2006. Physical, biogeochemical and isotopic processes related to heterogeneity of a shallow crystalline rock aquifer. *Biogeochemistry* 81, 331–347.

BETIOLLO, L. M. (2006). Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, 2006.

BITTENCOURT, A. V. L. (1978). **Sólidos hidrotransportados na bacia hidrográfica do rio Ivaí: Aplicação de balanços hidrogeoquímicos na compreensão da evolução de processos da dinâmica externa**. São Paulo, 1978. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP.

BITTENCOURT A.V.L., ROSA FILHO E. F., HINDI E. C., BUCHMANN FILHO A. C. 2003. A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia do rio Piquiri, Paraná – BR. *Rev. Águas Subterrâneas*, 17:67-76.

BUSCH, K. W. AND BUSCH, M. A. (1997). Cavity ring-down spectroscopy: An ultratrace absorption measurement technique. *ACS Symposium Series 720*, Oxford.

CELLIGOI A., DUARTE U. 1994. Aspectos hidrogeoquímicos da Formação Serra Geral em Londrina-PR. *In*: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8, Recife, *Anais*, p.425-433.

CLARK, I.D.; ARAVENA, R. Environmental Isotopes in Ground Water Resource and Contaminant Hydrogeology. San Diego: NGWA, 2005. 103p. (NGWA COURSE #394 - January 25-26).

CLARK, I. e FRITZ, P. (1997). **Environmental isotopes in hydrogeology**. 1a ed. New York, Lewis Publishers. 328p.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; FILHO, J. M. D. Análise Multivariada para os Cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia. 1. ed. 2. reimpr. São Paulo: Atlas, 2009. 541 p.

CPRM. (2010) Mapeamento geológico integrado da bacia hidrográfica do Guaíba: carta geológica: FolhaSH.22-V-D – Caxias do Sul. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Porto Alegre (Brasil). 1 mapa color. Escala 1:250.000. Material cartográfico.

CUSTÓDIO, E; LLAMAS, M.R. Hidrologia Subterrânea. 2ª ed. Barcelona: Ediciones Omega, 1983, 2v. 2350p.

DA SILVA, A. J. , LOPES, R. C; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, 2003.

DE FREITAS, M. A., BINOTTO, R. B., NANNI, A. S. RODRIGUES, A. L. M., BORTOLI, C. R. Avaliação do Potencial Hidrogeológico, Vulnerabilidade Intrínseca e Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 17 n.2 - Abr/Jun 2012, 31-41**

DIAS, J.P.R.V. 2005. Composição isotópica de oxigênio e hidrogênio da precipitação e sua relação com as águas subterrâneas na cidade de São Paulo. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 98p.

DREVER, J.I. **The Geochemistry of Natural Waters**. 3 ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1997. 438p.

ESRI. **Software ArcGis for Desktop 10.2**. USA, 2013.

FÁVERO, L. P. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2009. xx, 646 p. ISBN 9788535230468.

FEITOSA, F.A.C. 2000. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza, CPRM, LABHID-UFPE, 412p.

FERNANDES, F. B. P; ANDRADE, E. M; FONTENELE, S. B.; MEIRELES, A. M.; RIBEIRO, J. A. **Análise de agrupamento como suporte à gestão qualitativa da água**

**subterrânea no semiárido cearense.** *Revista Agro@ambiente On-line*, v. 4, n. 2, p. 86-95, jul-dez, 2010.

FRAGA, C.G. Origem de fluoreto em águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Botucatu e Serra Geral da Bacia do Paraná. São Paulo, 1992. Tese (Doutorado) USP.

FREITAS, M. A. E MACHADO, J. L. F. **Hydrochemistry of Serra Geral Aquifer In Western Santa Catarina State.** *1st Joint World Congress on Groundwater.* Anais. Fortaleza. 31/07 a04/08 de 2000. Publicação digital.

FRISCHKORN, H., Santiago, M.F. e Serjo, A.N. 1989 - **Isotope study of wells in crystalline rock of the semi-arid northeast of Brazil.** In: *Regional Seminar for Latin America on the use of isotope techniques in hydrology*, 1989, Ciudad de México. Abstracts... Cidade de México, OIEA, p. 73-89.

GASTMANS, Didier ; ALBERTO, M.C. ; BUFFON, A.G. M. ; MORAES, F. T. ; SANTOS, M. M. ; SILVA, J.R. M. ; CHANG, H.K. **Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas.** In: *XIV Encontro Nacional de Perfuradores e II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste*, 2005, Ribeirão Preto. Anais II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste, 2005.

GEYH, M. **Groundwater, saturated and unsaturated zone.** in: MOOK, W. G.(ed.) *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications*, Paris, v. IV, 2000.

GIARDIN, A.. **Hidrogeologia das Rochas Fraturadas.** DNPM/ABAS. Florianópolis. Apostila. 43p. 1997.

GLYNN, P., PLUMMER, L., 2005. **Geochemistry and the understanding of ground-water systems.** *Hydrogeol. J.* 13, 263–287.

GULER, C., THYNE, G.D., MCCRAY, J.E., TURNER, A.K., 2002. **Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data.** *Hydrogeology Journal* 10, 455–474.

HAUSMAN, A.. **Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul.** *Boletim Paranense de Geografia.* nº18/20 p. 177-215. 1966.

HAUSMAN, A. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS. Estudos Tecnológicos: **Acta Geológica Leopoldensia**, Série Mapas. Nº 2. P-1-127, 1995.

HEM, L. D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. **U.S Geological Survey Water-Supply Paper 2254**, 3ª edição, 1985.

HENRIKSEN, H., BRAATHEN, A., 2006. **Effects of fracture lineaments and in situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, western Norway.** *Hydrogeology Journal* 14 (4), 444–461.

HOSONO, T., WANG, C.-H., UMEZAWA, Y., NAKANO, T., ONODERA, S.-ICHI, NAGATA, T., YOSHIMIZU, C., ET AL. (2011). **Multiple isotope (H, O, N, S and Sr) approach elucidates complex pollution causes in the shallow groundwaters of the Taipei urban area.** *Journal of Hydrology*, 397(1-2), 23-36. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.11.025.

IAEA—International Atomic Energy Agency, **Isotope Hydrology Information System, the ISOHIS Database**, 2004. Disponível em: <<http://isohis.iaea.org>>.

KIMMELMANN, A.A.; REBOUÇAS, A.C. & SANTIAGO, M.M.F. 1988. **<sup>14</sup>C dating of the Botucatu aquifer system in Brazil.** In: INST. RADIOCARBON CONF., 13 Dubrovnik, Iugoslávia. *Abstracts*. Dubrovnik, p. 110.

KIMMELMANN, A.A.; SILVA, R.B.G.; REBOUÇAS, A.C. & SANTIAGO, M.M.F. 1986. **Hidrologia isotópica e química do aquífero Botucatu - Bacia do Paraná - Brasil.** In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, 1986, Brasília, DF. Anais. Brasília, ABAS, p. 1-25.

LISBOA, N.A. 1996. **Fácies, estratificações hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos, em unidades hidrogeológicas do sistema aquífero Serra Geral, na bacia do Paraná, Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1996. *Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 135p. il.

LISBOA, N.A.. **Compartimentação Hidrogeológica e Diferenciação Hidrogeoquímica em Aquíferos do Extremo Sul do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 10°, Gramado/RS, 1993. Anais. p.539-548. 1993.

MACHADO, J.L.F.; FREITAS, M.A. de. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final.** Porto Alegre. CPRM. 65p. il. mapa. 2005.

MACHADO, J. L. F., **Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul** [Tese], Programa de Pós-Graduação em Geologia—Área de Concentração em Geologia Sedimentar, Universidade do Vale do Rio Dos Sinos, São Leopoldo, Brasil, 2005.

MALDANER, C.H. 2010. **Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP).** 95 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MARTINS, V.T.S. 2008. **Aplicação de isótopos de Pb, Sr, H e O como traçadores da recarga e da contaminação de aquíferos metropolitanos: um exemplo da Bacia do Alto Tietê : um exemplo da Bacia do Alto Tietê.** 220 p. *Tese de Doutorado*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

MANASSES, F. ROSA FILHO, E. F., BITTENCOURT, A. V. L. **Estudo Hidrogeoquímico da Formação Serra Geral na Região Sudoeste do Estado do Paraná.** *Águas Subterrâneas*, v.21, n.02, p. 49-58, 2007.

MILLOT, R., GUERROT, C., INNOCENT, C., NÉGREL, P., e SANJUAN, B. (2011). **Chemical, multi-isotopic (Li–B–Sr–U–H–O) and thermal characterization of Triassic formation waters from the Paris Basin.** *Chemical Geology*, 283(3-4), 226-241.

MINARDI, P.S.P.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; BOMTEMPO, V.L.; COTA, S.D.S.; RODRIGUES, P.C.H. **Técnicas isotópicas aplicadas em estudos hidrogeológicos no município de Araguari.** *XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.* Minas Gerais, 2008.

MIZUNO, Moema Guimarães Morgado. **Hidroquímica das águas subterrâneas do Distrito Federal.** 2012. iv, 131 f., il. *Dissertação (Mestrado em Geologia)*- Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MOBÜS, G. **Análise estrutural e hidrogeológica do aquífero fraturado da Formação Serra Geral-Região noroeste do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre. 1987. IPHUFGRS. Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. 124 p.. *Dissertação de Mestrado.*

MOCELIN, R. C., FERREIRA, F. J. F. Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no sudoeste do estado do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, Volume 39 (3), 2009.

MONTEIRO, A. B.; CORREIA FILHO, F. L.; FREIRE, P. K. C.; DE SOUZA, N. G.; SOARES FILHO, A. R. (2010). “**Análise Estatística Multivariada de Dados Hidroquímicos do Aquífero Cabeças – Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba – PI.**” In: *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços.* São Luís, MA.

MORIN, R.H., SAVAGE, W.Z., 2003. **Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA.** *Hydrogeology Journal* 11, 100–112.

MORTIMER L, AYDIN A, SIMMONS CT, LOVE AJ (2011) **Is in situ stress important to groundwater flow in shallow fractured rock aquifers?** *J Hydrol* 399:185–200

NANNI, A. S., BINOTTO, R. B., FREITAS, M. A. DE, RODRIGUES, A. L. M., **Avaliação da Influência das Atividades Antrópicas na Qualidade das Águas Subterrâneas no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* Volume 17 n.2 - Abr/Jun 2012, 43-51.

NANNI, A. et al. **Fluoride characterization by principal component analysis in the hydrochemical facies of Serra Geral Aquifer System in Southern Brazil.** *An. Acad. Bras. Ciênc.* [online]. 2008, vol.80, n.4, pp. 693-701. ISSN 0001-3765.

NANNI, A. S. **O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico.** *Tese de Doutorado.* Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em geociências. Porto Alegre, 2008. 127f.

NANNI, A.S. ROISENBERG, A. HOLLANDA, M. H. B. M., MARIMON, M. P. C., VIERO, A. P., SCHEIBE, L. F. “**Fluoride in the Serra Geral Aquifer System: Source Evaluation Using Stable Isotopes and Principal Component Analysis,**” *Journal of Geological Research*, vol. 2013, Article ID 309638, 9 pages, 2013. doi:10.1155/2013/309638

NEVES, M.A., MORALES, N., 2007. **Well productivity controlling factors in crystalline terrains of southeastern Brazil.** *Hydrogeology Journal* 15, 471–482.

PIPER A.M. **A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses.** *Transactions of the American Geophysical Union*, 25:914-928, 1944.

PORTELA FILHO, C. V.; FERREIRA, F. J. F.; ROSA FILHO, E. F.; BUCHMANN, A. C.; ROSTIROLLA, S. P. ; “**Estudo preliminar da conexão entre os aquíferos Serra Geral e Guarani com base em dados aeromagnetométricos e hidroquímicos,**” in *XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, vol. 1, pp. 74–86, Editora da ABAS, São Paulo, Brasil, 2002.

PORTELA FILHO CV, FERREIRA FJF, ROSA FILHO EF AND ROSTIROLLA SP. 2005. **Compartimentação magnética-estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral e sua conectividade com o Sistema Aquífero Guarani na região central do arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná).** *Rev Bras Geocienc* 3: 369-381.

REBOUÇAS, A. 1988. Groundwater in Brazil. *Episodes* 11(3): 209-214

REGINATO, P.A.R. 2003. **Integração de Dados Geológicos para Prospecção de Aquíferos Fraturados em Trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS).** *Tese de Doutorado em Engenharia*. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 254p.

REGINATO, P.A.R.; AHLERT, S. FINOTTI, A. R., SCHNEIDER, V. E., GILIOLI, K. C. **Qualidade das águas subterrâneas de diferentes aquíferos associados à formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** *XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*. São Luís, MA. Agosto de 2010.

REGINATO, P. A. R. ; STRIEDER, Adelir José. **Caracterização Hidrogeológica e Potencialidades dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** *In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004, Cuiabá. ANAIS DO XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. SÃO PAULO: ABAS, 2004. v. 1.

REGINATO, P.A.R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K.C.; CEMIN, G. **Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre do manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul.** *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 7, n. 1, p. xx-xxx, 2012. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.903>)

REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A.J. 2006. **Caracterização Estrutural dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** *Revista Brasileira de Geociências*. 36(1):13-22, março de 2006.

REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A.J. 2006. **Integração de Dados Geológicos na Prospecção de Aquíferos Fraturados na Formação Serra Geral.** *Águas Subterrâneas – Revista da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas*. 20(1):1-14, junho de 2006.

REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A.J. **Caracterização Hidrogeológica dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** In: *1º SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL*. Santa Maria (RS). 2005. 1 CD-ROM.

REGINATO, P.A.R. & GOTTARDO, E. 1994. **Mapeamento Hidrogeológico do Município de Veranópolis.** Secretaria da Agricultura/Prefeitura Municipal de Veranópolis (RS). *Relatório Técnico de Estágio*. 30 pgs

REGINATO, P. A. R.; AHLERT S.; SCHNEIDER, V. E.; **Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul.** *Águas Subterrâneas* (2013) 27(1): 65-78.

ROISENBERG, A.; VIERO, A.P. 2002. **O Vulcanismo Mesozoico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul.** In: Holz, M.; De Ros, L.F. (Edit.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/UFRGS. Porto Alegre, 2000. 444p. il.- Edição Revista, 2002.

ROISENBERG, C. VIERO, A. P. ROISENBERG, A. SCHWARZBACH, M. S. R., MORANTE, I. C. ROISEBORG. **Caracterização Geoquímica e Gênese dos Principais Íons das Águas Subterrâneas de Porto Alegre, RS.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 8 n.4 Out/Dez 2003, 137-147.

ROSA FILHO E.F., SALAMUNI R., BITTENCOURT A.V.L. 1987. **Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos do Estado do Paraná.** *Boletim Paranaense de Geociências*, 37:22-52.

ROSA FILHO, E. F., MONTANO, J. X., DUARTE, U.; “**Estudo do movimento das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) através de isótopos, no Paraná, São Paulo e no Uruguai,**” *Revista Latino Americana de Hidrogeologia*, pp. 109–121, 2007.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. (1993). Isotopic patters in modern global precipitation, In: Swart, P. K.; Lohmann, K. C.; McKenzie, J.; Savin, S. (ed.) **Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophysical Monograph Series**, 78, pp. 1-36, AGU, Washington, DC.

SANTIAGO, M. F.; FRISCHKORN, H.; Silva, C. M. S. V. , 2008. **Métodos Isotópicos** in FEITOSA F. A. C. et. al., 2008, *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*, CPRM, 812 p. Il. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

SAUNDERS, A.D., STOREY, M., KENT, R.W., NORRY, M.J. 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: Storey, M., Alabaster, A., Pankhurst, R.J. (eds.).



*Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. Bath. **Geological Society of London**, p. 41-60. (Special Publication, 68).

SCHOELLER, H. **Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparasion des eaux souterraines**. *Société Géologie Comptes Rendus Sommaire et Bulletin Série 5(5): 651-657*. 1935.

SCHOFIELD, S., e JANKOWSKI, J. (2004). Hydrochemistry and isotopic composition of Na-HCO<sub>3</sub>-rich groundwaters from the Ballimore region, central New South Wales, Australia. **Chemical Geology**, 211(1-2), 111-134.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES. **Software Visual Poços Pro**. Canadá, 1998.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES. **Software AcquaChem 5.1**. Canadá, 2008.

SCOPEL, R. M.; TEIXEIRA, E. C; BINOTTO, R. B. Caracterização hidrogeoquímica de água subterrânea em área de influência de futuras instalações de usinas hidrelétricas: bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas/RS, Brasil. **Quím. Nova**, São Paulo , v. 28, n. 3, Jun 2005.

SILVA, R.B.G.; KIMMELMANN, A.A. & REBOUÇAS, A.C. 1985. **Estudo hidrogeoquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu - resultados parciais para a região norte da bacia do Paraná**. In: *SIMP. REG. DE GEOLOGIA*, 5, 1985, São Paulo. Atas São Paulo. v.2, p.489-502.

SILVEIRA, C. S. e SILVA JUNIOR, G. C. da. **O uso de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos no Brasil: uma resenha crítica**. *Anu. Inst. Geocienc.* [online]. 2002, vol.25, pp. 25-43. ISSN 0101-9759.

STIFF, H.A. **The interpretation of chemical water analysis by means of patterns**. *Journal of Petroleum Technology* **3(10):15-17**. 1951.

STRADIOTO, M. R.; KIANG, C. H. Caracterização hidroquímica e isotópica das águas superficiais, pluviais e subterrâneas do município de Rio Claro/SP. *XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*. São Paulo, 2010.

SYSTAT. **Statistical and Graphical Software**. 2007.

VICINI, L.; SOUZA, A.M., 2005. **Análise multivariada da teoria à prática**. Senior design project. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, CCNE, Manual.

VIERO, Ana Cláudia; SILVA, Diogo Rodrigues Andrade da (Orgs.). **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 1 DVD. Programa Geologia do Brasil - PGB. Levantamento da Geodiversidade.

VIVIANI-LIMA, J.B. 2007. **Estimativa de recarga em áreas urbanizadas: estudo de caso na Bacia do Alto Tietê**. *Tese de Doutorado*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 219 p.

WILDNER, W.; ORLANDI FILHO, V.; GIFFONI, L.E. 2006. **Itaimbezinho e Fortaleza, RS e SC- Magníficos Cânions Esculpidos nas Escarpas Aparados da Serra do Planalto Vulcânico da Bacia do Paraná.** In: *Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.T.; Campos, D.A.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S. (Edit.). Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil.* Disponível em: <<http://www.unb.br/ig/sigep/sitio050/sitio050.pdf>>. Publicado em: 01 jul. 2006. Acesso em: 02 jan. 2013.

## **ANEXO A**

### **CADASTRO DE POÇOS**

Código Projeto	Coordenada N	Coordenada E	Cota do Terreno	Uso	Situação	Prof.(m)	Diâmetro (mm)	Revestimento Tipo	Revestimento Profundidade	Altura da Boca do Poço (m)	Filtro	Derrame	Entrada de água (m)	Altitude Entrada de Água (m)	Teste Bombeamento	Análise	NE (m)	ND (m)	Vazão(m³/h)	Cap. Específica (m³/h/m)	T (m³/h)
CBA02	6759202	451327	679	Abast.	Bombeamento	74,8	8	Galvanizado	6,3	0,3	Não	Ácidas	15,5 e 52,7	663,5 e 626,3	Não	Sim	30,3	38,4	13,655	-	0,0357
CBA03A	6759347	451140	638	Abast.	Bombeamento	163,65	8	Geomecânico	10,28	0,3	Sim	Ácidas e Básicas	21,26 e 159 (25 a 35)	617, 612, 479	Sim	Sim	22,23	110	45	0,594	0,4
CBA04A	6759400	450989	631	Abast.	Bombeamento	162	8	Geomecânico	14	0,7	Não	Ácidas e Básicas	158	473	Sim	Sim	44,84	85	35	0,89	1,1125
CBA05A	6758327	450814	610	Abast.	Bombeamento	216	8	Geomecânico	26,6	0,35	Não	Ácidas e Básicas	40	570	Sim	Não	6,25	40	12	0,29	0,705
CBA06	6758515	451330	618	Abast.	Bombeamento	40	8	Galvanizado	11,08	0,7	Não	Ácidas	37	581	Sim	Sim	3,54	25,48	16	-	0,293
CBA09	6759879	451756	648	Abast.	Bombeamento	71,5	8	Galvanizado	15,96	0,28	Sim	Ácidas	19 e 23,5 e 53,5 (15,96 a 27,52)	629, 624,5, 594,5	Sim	Sim	0,79	30	22	-	1,13
CBA10	6760184	451388	650	Abast.	Equipado	90	8	Galvanizado	14,34	0,2	Sim	Ácidas	8,5 e 16 (14,34 a 22,99)	634	Não	Não	1,86	17,55	32,15	-	1,27
CBA11	6760389	451435	640	Abast.	Bombeamento	98	8	Galvanizado	14,25	1	Sim	Ácidas	14 e 22 (14,25 a 21,25)	626, 618	Sim	Sim	1,28	27	20	-	0,597
CBA12	6760624	452086	660	Abast.	Bombeamento	86	8	Galvanizado	13,73	0,98	Sim	Ácidas	5,21,61 (13,73 a 20,23)	639, 599	Sim	Sim	10,27	24	20	-	0,493
CBA16	6760102	450406	614	Abast.	Bombeamento	114	8	Galvanizado	53,35	0,15	Sim	Ácidas	(53,35 a 59,20)	560,65, 554,8	Sim	Sim	1,36	45,96	25	0,568	0,344
CBA17	6760118	449954	609	Abast.	Bombeamento	141,5	8	Geomecânico	11	0,3	Não	Ácidas e Básicas	3 e 101	508	Sim	Sim	0,15	36	24	3,051	0,785
CBA18	6758291	450651	592	Abast.	Bombeamento	150	8	Geomecânico	1,69	0,3	Não	Ácidas e Básicas	56 e 80	536, 512	Sim	Sim	2,54	87,85	9	0,1061	0,114
CBA19	6760136	450638	619	Abast.	Bombeamento	122	8	Galvanizado	2,44	0,26	Não	Ácidas e Básicas	34,38,112	585, 581, 507	Sim	Sim	2,44	26	50	0,4697	1,27
CBA20	6758492	450100	597	Abast.	Bombeamento	140	8	Geomecânico	3,09	0,54	Não	Ácidas e Básicas	74	523	Sim	Sim	0,13	40	20	0,201	0,52
CBA26	6757724	451391	661	Abast.	Bombeamento	150	8	Cimento	35	-	Não	-	32,7	-	Sim	Sim	5,78	70	10	0,0952	0,019
CBA34	6758423	451246	634	Abast.	Bombeamento	180	8	Geomecânico	30	0,51	Não	Ácidas e Básicas	48,60,71	586, 574, 563	Sim	Sim	6,99	70	12	0,19	0,427
CBA05	6758367	450804	594	Abast.	Equipado	57	8	Galvanizado	8,72	0,75	Não	Ácidas	5,13,19	581, 575	Sim	Sim	0,8	18,31	12,86	0,734	0,343
CBA14	6760448	451154	654	Abast.	Fechado	168	8	Galvanizado	5,29	0,73	Não	Ácidas e Básicas	28	626	Sim	Não	6,82	102,2	2,47	-	0,0096
CBA15	6757627	451985	635	Abast.	Equipado	181	8	Galvanizado	11	0,95	Não	Ácidas e Básicas	18,5	616,5	Sim	Sim	1,58	96,76	4,26	-	0,018

Código Projeto	Coordenada N	Coordenada E	Cota do Terreno	Uso	Situação	Prof.(m)	Diâmetro (mm)	Revestimento Tipo	Revestimento Profundidade	Altura da Boca do Poço (m)	Filtro	Derrame	Entrada de água (m)	Altitude Entrada de Água (m)	Teste Bombeamento	Análise	NE (m)	ND (m)	Vazão(m³/h)	Cap. Específica (m³/h/m)	T (m²/h)
CBA21	6758445	449776	587	Abast.	Reserva Técnica	96	8	Geomecânico	10	0,5	Não	Ácidas e Básicas	50,75,84	537, 512, 503	Sim	Sim	6,9	82	30	0,39	0,266
CBA22	6758053	451235	637	Abast.	Inativo	124	8	Geomecânico	14	0	Não	Ácidas	30,78,112	607, 559, 525	Sim	Sim	1,62	78	20	0,195	0,395
CBA22A	6758061	451234	639	Abast.	Inativo	126	8	Galvanizado	33,5	0,45	Não	Ácidas	66, 78	573, 561	Sim	Sim	6,21	35	12	0,35	0,288
CBA33	6760938	452716	683	Abast.	Reserva Técnica	174	8	Galvanizado	14	0,4	Não	Ácidas	52	631	Sim	Sim	22,71	50	25	0,916	0,267
CBA22B	6758065	451236	640	Abast.	Tamponado	132	6	-	-	-	Não	Ácidas	28	612	Não	Não	-	-	-	-	-
CBA35	6759313	452208	670	Abast.	Selado	232	8	-	-	-	Não	Ácidas e Básicas	-	-	Não	Não	-	-	-	-	-
CBA36	6759286	449923	627	Abast.	Selado	186	8	-	-	-	Não	Ácidas e Básicas	-	-	Não	Não	-	-	-	-	-
CBA37	6759086	452376	639	Abast.	Não Informado	120	8	Geomecânico	28	0,6	Não	Ácidas	34-40, 50-53, 68-70, 106-108	604, 587, 570, 532	Sim	Sim	29,86	98,28	9,32	-	0,1
IJ286	6757764	451440	635	Abast.	Não Instalado	150	8	Galvanizado	36,5	0,65	Não	Ácidas e Básicas	34, 70	601, 565	Não	Não	6,09	70	11	0,172	-
IJ287	6757368	452086	638	Abast.	Fechado	-	-	-	-	0,95	Não	-	-	-	Não	Não	-	-	-	-	-
IJ291	6759447	450981	641	Abast.	Bomb.	101	8	Galvanizado	17	0,3	Sim	Ácidas e Básicas	17,18.5,26.5,28.64,35.59, 39.92,70	623, 614, 604, 571	Não	Não	2,8	24,04	6,184	0,291	-
IJ301	6753105	444912	472	Abast.	Fechado	201	8	Galvanizado	12	0,42	Não	Básicas	4.5,65,85,143.5	407, 387, 329	Não	Não	61,02	83,9	3,01	0,132	-
G15 CB1	6759282	451531	-	Abast.	Não Informado	80	8	-	7,05	-	Não	-	68,5	-	Não	Sim	29,5	42,4	3,4	-	-
G690 CB7	6758300	451250	-	Abast.	Não Informado	123	8	-	-	-	Não	-	17.5, 34, 100	-	Sim	Não	15,13	105	4,58	-	0,0414
G716 CB8	6758444	450729	-	Abast.	Não Informado	116	8	-	-	0,5	Não	-	-	-	Sim	Sim	1,86	73,41	4,762	-	0,044
G1230 CB13	6761024	452037	-	Abast.	Não Informado	155	8	-	-	-	Não	-	-	-	Não	Não	-	-	-	-	-
COR CB23	-	-	-	Abast.	Fechado	162	8	-	-	-	Não	-	-	-	Não	Não	-	-	2	-	-
COR CB24	-	-	-	Abast.	Fechado	150	8	Geomecânico	16	-	Não	-	-	-	Não	Não	-	-	1	-	-
COR CB25	-	-	-	Abast.	Fechado	48	8	-	-	-	Não	-	-	-	Não	Não	-	-	2	-	-

Código Projeto	Coordenada N	Coordenada E	Cota do Terreno	Uso	Situação	Prof.(m)	Diâmetro (mm)	Revestimento Tipo	Revestimento Profundidade	Altura da Boca do Poço (m)	Filtro	Derrame	Entrada de água (m)	Altitude Entrada de Água (m)	Teste Bombeamento	Análise	NE (m)	ND (m)	Vazão(m³/h)	Cap. Específica (m³/h/m)	T (m²/h)
G2458 CB25A	-	-	-	Abast.	Fechado	150	8	-	-	-	Não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COR CB27	6757374	452056	-	Abast.	Fechado	174	8	Geomecânico	12	-	Não	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-
COR CB28	-	-	-	Abast.	Fechado	136	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COR CB29	6759977	450209	-	Abast.	Fechado	168	8	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
COR CB30	-	-	-	Abast.	Fechado	192	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5	-	-
COR CB31	-	-	-	Abast.	Fechado	174	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
COR CB32	-	-	-	Abast.	Fechado	164	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IJ302	6759451	453586	588	Abast.	Bomb.	127	6	Galvanizado	6	0,5	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IJ303	6759845	453357	661	Abast.	Bomb.	150	6	Galvanizado	6	0,3	Não	Ácidas	42,78,90,108,120,132	619, 583, 571, 553, 541, 529	-	-	43	120	3,9	0,051	-
IJ304	6759661	452639	666	Abast.	Bomb.	163	-	-	-	0,49	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IJ305	6758975	453050	593	Abast. e Indústria	Bomb.	-	-	-	-	0,15	Não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR732	6757909	449658	613	Pecuária	Bomb.	96	6	Galvanizado	6	0,28	Não	Ácidas	70	543	-	-	27	32,15	8,1	1,67	-
IR734	6762701	452416	701	Pecuária	Bomb.	76	6	Galvanizado	6	0,1	Não	Ácidas	50	651	-	-	43	55,05	5,4	0,448	-
IR734	6763103	455286	675	Pecuária	Bomb.	60	6	Galvanizado	12	0,3	Não	Ácidas	50	625	-	-	11,45	33	9,5	0,441	-
IR668	6757877	449890	595	Abast.	Bomb.	78	6	Geomecânico	12	0,21	Não	Ácidas	-	-	-	-	7	50	13	0,535	-
IR669	6759176	445126	578	Abast.	Bomb.	61	6	Geomecânico	12	0,35	Não	Ácidas	-	-	-	-	0	30	30	1	-
IR670	6756869	440820	609	Abast.	Bomb.	70	6	Geomecânico	40	0,65	Não	Ácidas	-	-	-	-	2	30	28	1	-
IR671	6757182	439185	623	Abast.	Não Instalado	90	-	-	-	0,4	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR672	6757409	442947	521	Abast.	Não Instalado	115	6	Geomecânico	12	0,42	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	20	70	3	0,06	-
IR673	6756923	438900	569	Abast.	Bomb.	85	6	Geomecânico	15	0,5	Não	Ácidas e Básicas	33,4	535,6	-	-	25	50	15,75	0,63	-

Código Projeto	Coordenada N	Coordenada E	Cota do Terreno	Uso	Situação	Prof.(m)	Diâmetro (mm)	Revestimento Tipo	Revestimento Profundidade	Altura da Boca do Poço (m)	Filtro	Derrame	Entrada de água (m)	Altitude Entrada de Água (m)	Teste Bombeamento	Análise	NE (m)	ND (m)	Vazão(m³/h)	Cap. Especifica (m³/h/m)	T (m²/h)
IR674	6756879	438842	573	Abast.	Abandonado	118	6	Galvanizado	40	0,41	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	5	-	9	-	-
IR676	6756621	439212	585	Lavagem, Outros	Bomb.	116	6	Geomecânico	20	0,2	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR677	6756743	439043	587	Industrial	Bomb.	120	6	Geomecânico	25	0,48	Não	Ácidas e Básicas	63,66,72	524, 521, 515	-	-	-	-	-	-	-
IR678	6752958	440438	473	Abast.	Bomb.	216	6	Geomecânico	8	0,45	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR679	6753322	439526	491	Abast.	Bomb.	52	-	-	-	0,35	Não	Básicas	-	-	-	-	7,5	29,7	12,77	0,575	-
IR680	6753256	439864	481	Abast.	Bomb.	55	-	-	-	0,4	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR681	6753397	439545	496	Abast.	Abandonado	-	-	-	-	0,7	Não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR682	6753605	441735	353	Abast. Dess.	Bomb.	76	-	-	-	0,25	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR683	6753558	441735	352	Abast.	Bomb.	73	-	-	-	0,27	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR684	6753386	442050	312	Abast. Dess.	Bomb.	130	6	Geomecânico	-	0,28	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR685	6752832	442057	314	-	Bomb.	130	6	Galvanizado	3	0,26	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR686	6753104	442435	353	Abast. Dess.	Bomb.	176	6	Galvanizado	3	0,54	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR687	6753149	442701	357	Abast. Dess.	Bomb.	180	6	Galvanizado	6	0,48	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR688	6751972	445640	461	Abast.	Bomb.	80	6	Geomecânico	10	1	Não	Básicas	18,26,47,74	443, 435, 414, 387	-	-	7	30	8	0,348	-
IR689	6753247	445380	472	Abast.	Não Instalado	100	6	Geomecânico	12	0,47	Não	Básicas	-	-	-	-	5	40	2	0,057	-
IR690	6752936	447815	663	Abast.	Bomb.	80	6	-	-	0,24	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR691	6752877	448029	671	Abast.	Não Instalado	100	6	Galvanizado	6	0,65	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR692	6752890	447710	667	Pecuária	Bomb.	-	-	-	-	0,3	Não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR693	6752510	446874	540	Abast.	Bomb.	85	6	Geomecânico	10	0,45	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	15	40	7,8	0,312	-
IR694	6751877	445721	493	Abast.	Fechado	138	6	Geomecânico	6	0,33	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR695	6750302	443752	468	Abast.	Bomb.	117	6	Galvanizado	3	0,5	Não	Básicas	3,10,52	458, 416	-	-	-	-	-	-	-

Código Projeto	Coordenada N	Coordenada E	Cota do Terreno	Uso	Situação	Prof.(m)	Diâmetro (mm)	Revestimento Tipo	Revestimento Profundidade	Altura da Boca do Poço (m)	Filtro	Derrame	Entrada de água (m)	Altitude Entrada de Água (m)	Teste Bombeamento	Análise	NE (m)	ND (m)	Vazão(m³/h)	Cap. Específica (m³/h/m)	T (m²/h)
IR696	6753333	450355	672	Abast. Dess.	Bomb.	119	6	Galvanizado	4	0,82	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR697	6754001	450457	706	Abast.	Abandonado	91	6	Galvanizado	2	0,5	Não	Ácidas	-	-	-	-	67	70	3,3	1,1	-
IR698	6754925	448848	672	Abast.	Não Instalado	120	-	-	-	0,44	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR699	6754491	448712	672	Abast.	Abandonado	140	6	Geomecânico	12	0,51	Não	Ácidas	-	-	-	-	60	80	1,8	0,09	-
IR700	6754963	451185	670	Abast.	Bomb.	80	6	Geomecânico	12	0,6	Não	Ácidas	-	-	-	-	20	40	10	0,5	-
IR701	6756442	453201	634	Abast.	Bomb.	76	6	Galvanizado	5	0,35	Não	Ácidas	8,16,75	626, 618, 559	-	-	1	10	16,8	1,867	-
IR702	6755647	454132	656	Abast.	Bomb.	120	6	Geomecânico	44	0,28	Não	Ácidas	-	-	-	-	2,1	72,6	16,16	0,229	-
IR703	6755650	454125	653	Abast.	Abandonado	150	-	-	-	0,35	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR704	6756467	453699	631	Abast.	Não Instalado	90	6	Geomecânico	6	0,13	Não	Ácidas	-	-	-	-	10	50	1,5	0,038	-
IR705	6754832	457652	425	Abast.	Abandonado	110	-	-	-	0,97	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR706	6757174	455088	440	-	Seco	94	6	-	-	-	Não	Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR707	6757220	455173	424	-	Fechado	65	6	-	-	-	Não	Básicas	-	-	-	-	5	65	0,3	0,005	-
IR646	6760274	452403	642	Industrial	Abandonado	133	6	Galvanizado	0 a 6 e 34,40 a 40,45	-	Sim	Ácidas	25,70,92,105	617, 572, 550, 537	-	-	4,62	28,33	14,4	0,607	-
IR647	6760270	452396	646	Industrial	Bomb.	139	6	Geomecânico	0 a 48, 63 a 67, 79 a 95, 101 a 113, 117 a 125, 127 a 131, 133 a 139	0,22	Sim	Ácidas	9,52,70,76,97,115,133	594, 576, 570, 549, 531, 513	-	-	10,64	59,95	15	0,304	-
IR648	6760084	452593	630	Industrial	Bomb.	150	6	Galvanizado	18	0,3	Não	Ácidas e Básicas	29,42,81,111	601, 588, 549, 519	-	-	-	-	-	-	-
IR649	6760925	453180	650	Industrial	Bomb.	200	6	Galvanizado	9	0,38	Não	Ácidas e Básicas	27,69,135,167	623, 581, 515, 483	-	-	-	-	-	-	-
IR650	6760194	452101	662	Industrial	Bomb.	-	-	-	-	-	Não	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR651	6760133	451689	641	Industrial	Bomb.	100	6	Galvanizado	0 a 19,62 e 31,72 a 32,72	0,23	Sim	Ácidas	24,3 e 37,6	617, 604	-	Sim	0,5	12,05	23,3	2,017	-
IR652	6760009	451680	644	Industrial	Bomb.	100	6	Galvanizado	11,4	-	Não	Ácidas	16,72,80,88	628, 572, 564, 556	-	-	4,56	16,46	17,6	1,479	-





Código Projeto	Coordenada N	Coordenada E	Cota do Terreno	Uso	Situação	Prof.(m)	Diâmetro (mm)	Revestimento Tipo	Revestimento Profundidade	Altura da Boca do Poço (m)	Filtro	Derrame	Entrada de água (m)	Altitude Entrada de Água (m)	Teste Bombeamento	Análise	NE (m)	ND (m)	Vazão(m³/h)	Cap. Especifica (m³/h/m)	T (m²/h)	
IR715	6759477	462966	364	Abast.	Seco	200	6	-	-	-	-	Básicas	28,48,90	336, 316, 274	-	-	-	-	-	-	-	-
IR716	6757017	463306	255	Abast.	Não Instalado	85	6	Galvanizado	6	0,07	Não	Básicas	8 e 82	173	-	-	69	72	4	1,333	-	-
IR717	6755196	455705	622	Abast.	Fechado	120	6	PVC	44	-	-	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR718	6762662	454362	629	Abast.	Bomb.	90	6	Geomecânico	20	0,28	Não	Acidas	45 e 60	584, 569	-	-	30	50	10	0,5	-	-
IR719	6758459	449711	519	Abast. Dess.	Bomb.	120	6	Galvanizado	6	0,4	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR720	6757156	452899	605	Abast. Irrigação	Bomb.	170	6	Geomecânico	12	0,23	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR721	6757151	452872	583	Irrigação	Bomb.	100	6	Geomecânico	40	-	-	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR722	6763515	454694	623	Abast. Dess.	Bomb.	80	6	Geomecânico	12	0,78	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR723	6759102	451734	677	Lavanderia	Bomb.	128	6	Galvanizado	12,2	0,43	Não	Ácidas	32,47,69 e 85,9	645, 630, 608, 591	-	-	36	101,8	1,62	-	-	-
IR724	6762291	453739	649	Abast.	Bomb.	92,5	-	-	-	0,22	-	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR725	6757402	460166	590	Abast.	Não Instalado	110	6	Geomecânico	10	0,47	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	5	30	24	0,96	-	-
IR726	6757617	459056	519	Abast.	Abandonado	130	6	Geomecânico	4	-	Não	Ácidas e Básicas	25 e 55	494, 464	-	-	4	70	1,5	0,023	-	-
IR727	6758859	457491	580	Abast.	Bomb.	120	6	Galvanizado	60	0,32	Não	Ácidas e Básicas	68, 90 e 98	512, 490, 482	-	-	7	80	8	0,11	-	-
IR728	6758978	457417	579	Abast.	Fechado	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR729	6758975	457306	579	Abast.	Fechado	60	6	-	-	-	-	Ácidas	-	-	-	-	1,68	53	28	0,546	-	-
IR730	6758991	457307	583	Abast. Dess.	Bomb.	48	6	Geomecânico	12	0,55	Não	Ácidas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IR731	6761610	455200	629	Abast. Dess.	Bomb.	129,5	6	Galvanizado	12	0,44	Não	Ácidas	-	-	-	-	6	-	9	-	-	-
IR665	6755797	452409	640	Abast.	Bomb.	150	6	Geomecânico	6	0,54	Não	Ácidas e Básicas	31 e 85	609, 555	-	-	3,3	64,64	30,46	0,497	-	-
IR675	6752990	438887	537	Abast.	Bomb.	122	6	Geomecânico	2,5	-	Não	Ácidas e Básicas	-	-	-	-	5	-	9	-	-	-
IR5449	6755279	452049	-	-	Não Informado	57	6	Galvanizado	28	-	Não	-	-	-	-	-	1,5	20	4	0,216	-	-

## **ANEXO B**

### **DADOS DE ISÓTOPOS E PARÂMETROS ANALISADOS MENSALMENTE**

Poço	Data da Coleta	pH	Condutividade (uS/cm)	Temperatura (°C)	STD (mg/L)	ORP (mv)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta D$ (‰)
CBA 02	30/04/2013	6,67	200	18,4	130	728	-5,96	-32,07
CBA 05	30/04/2013	5,87	161	18,88	106	296	-3,41	-24,81
CBA 10	30/04/2013	5,81	112	18,5	73	762	-5,19	-30,29
CBA 11	30/04/2013	5,84	116	18,5	75	446	-6,66	-33,51
CBA 12	30/04/2013	5,85	98	18,62	64	400	-4,94	-29,26
CBA 16	30/04/2013	6,25	154	19,38	100	719	-4,51	-27,94
CBA 17	30/04/2013	6,18	197	19,26	128	704	-4,28	-27,91
CBA 18	30/04/2013	5,89	146	18,52	95	299	-4,81	-29,46
CBA 19	30/04/2013	6,13	156	18,9	102	752	-4,21	-28,12
CBA 20	30/04/2013	5,98	144	18,27	94	738	-3,84	-26,55
CBA 26	30/04/2013	6,02	101	18,81	66	717	-6,86	-34,84
CBA 34	30/04/2013	6,28	174	18,63	113	729	-6,04	-32,48
FONTE 1	30/04/2013	4,89	147	17,94	96	290	-4,95	-24,62
FONTE 2	30/04/2013	6,33	127	18,31	82	707	-5	-30,09
FONTE 3	30/04/2013	5,36	156	19,82	102	495	-4,91	-25,39
CBA 02	23/05/2013	6,98	191	17,79	124	709	-7,07	-36,07
CBA 05	23/05/2013	6,35	164	17,94	107	722	-6	-33,34
CBA 10	23/05/2013	6,09	107	17,61	70	741	-6,09	-33,47
CBA 11	23/05/2013	6,39	123	17,58	80	722	-4,74	-28,53
CBA 12	23/05/2013	6,41	102	17,76	66	726	-7,08	-35,77
CBA 16	23/05/2013	6,63	140	18,35	91	725	-5,04	-29,86
CBA 17	23/05/2013	6,71	190	18	124	675	-6,08	-32,6
CBA 18	23/05/2013	6,34	154	17,87	100	706	-5,03	-29,97
CBA 19	23/05/2013	6,65	146	18	95	701	-5,75	-30,22
CBA 20	23/05/2013	6,07	146	17,4	95	720	-4,9	-29,05
CBA 26	23/05/2013	6,68	108	17,7	70	694	-7,32	-36,13
CBA 34	23/05/2013	6,42	167	17,83	108	719	-7,02	-35,75
FONTE 1	23/05/2013	5,21	139	15,5	90	552	-5,43	-30,92
FONTE 2	23/05/2013	6,33	111	14,49	72	554	-4,9	-33,69
FONTE 3	23/05/2013	5,18	139	17,89	90	552	-5,38	-32,37
CBA 02	25/06/2013	6,02	194	17,87	126	715	-7,43	-40,2
CBA 05	25/06/2013	5,56	165	18,05	107	780	-6,81	-37,87
CBA 10	25/06/2013	4,88	106	17,93	68	830	-6,84	-38,63
CBA 11	25/06/2013	5,17	129	17,81	84	819	-6,97	-37,25
CBA 12	25/06/2013	5,07	98	17,84	64	834	-6,65	-38,95
CBA 16	25/06/2013	5,46	139	18,4	90	796	-6,47	-38,07
CBA 17	25/06/2013	5,54	183	18,17	119	772	-6,17	-37,5
CBA 18	25/06/2013	5,34	155	17,48	101	783	-7,42	-39,46
CBA 19	25/06/2013	5,51	152	18,19	99	800	-5,78	-35,54

Poço	Data da Coleta	pH	Condutividade (uS/cm)	Temperatura (°C)	STD (mg/L)	ORP (mv)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta D$ (‰)
CBA 20	25/06/2013	5,52	138	17,62	89	779	-5,83	-34,05
CBA 26	25/06/2013	5,44	105	17,64	68	793	-6,87	-40,45
CBA 34	25/06/2013	5,59	158	17,71	102	526	-7,6	-40,73
FONTE 1	25/06/2013	4,56	139	16,47	90	733	-7,09	-40,76
FONTE 2	25/06/2013	5,28	119	15,85	78	747	-6,92	-38,33
FONTE 3	25/06/2013	4,29	130	18,03	85	662	-6,51	-38,52
CBA 02	24/07/2013	5,78	192	17,28	125	739	-5,27	-29,11
CBA 05	24/07/2013	6,26	157	17,4	102	738	-6,85	-32,94
CBA 10	24/07/2013	5,22	105	17,09	68	780	-6,55	-30,43
CBA 11	24/07/2013	5,62	123	17,2	80	775	-6,59	-30,84
CBA 12	24/07/2013	5,74	105	16,58	68	760	-5,76	-26,92
CBA 16	24/07/2013	6,12	137	17,44	89	564	-7,08	-30,41
CBA 17	24/07/2013	6,17	181	17,3	118	733	-5,16	-25,9
CBA 18	24/07/2013	6,18	151	17,48	98	735	-4,35	-23,87
CBA 19	24/07/2013	6,03	144	17,3	93	748	-4,99	-26,05
CBA 20	24/07/2013	6,28	139	17,11	90	745	-5,66	-27,15
CBA 26	24/07/2013	6,31	104	16,32	68	710	-6,22	-29,41
CBA 34	24/07/2013	6,16	163	16,8	106	740	-6,41	-30,66
FONTE 1	24/07/2013	5,39	124	15,01	81	571	-6,91	-41,37
FONTE 2	24/07/2013	6,05	108	11,22	70	747	-6,08	-36,75
FONTE 3	24/07/2013	5,15	135	17,11	88	513	-6,56	-35,83
CBA 02	30/08/2013	5,67	192	17,62	125	729	-7,77	-40,93
CBA 05	30/08/2013	5,64	158	17,83	103	768	-7,95	-40,6
CBA 10	30/08/2013	5,62	116	18	76	766	-7,98	-39,57
CBA 11	30/08/2013	5,81	135	18,02	88	779	-7,76	-39,26
CBA 12	30/08/2013	6,08	125	17,93	81	760	-8,09	-40,2
CBA 16	30/08/2013	6,1	142	18,16	93	761	-8,18	-39,95
CBA 17	30/08/2013	6	183	17,78	119	731	-7,78	-40,14
CBA 18	30/08/2013	5,67	166	17,7	108	802	-7,95	-39,37
CBA 19	30/08/2013	6,09	145	17,83	94	745	-7,35	-38,04
CBA 20	30/08/2013	5,74	139	15,45	129	718	-7,39	-37,89
CBA 26	30/08/2013	5,44	102	17,33	66	769	-8	-40,29
CBA 34	30/08/2013	5,29	176	17,61	114	793	-7,94	-39,85
FONTE 1	30/08/2013	4,52	110	16,32	71	687	-7,03	-33,14
FONTE 2	30/08/2013	5,25	106	12,2	69	707	-8,11	-46,19
FONTE 3	30/08/2013	4,85	126	17,09	82	686	-7,86	-40,25
CBA 02	18/09/2013	6,03	195	17,56	127	714	-8,06	-39,59
CBA 05	18/09/2013	6,28	153	17,36	99	673	-7,84	-38,59
CBA 10	18/09/2013	5,46	110	17,4	71	761	-8,06	-38,6

Poço	Data da Coleta	pH	Condutividade (uS/cm)	Temperatura (°C)	STD (mg/L)	ORP (mv)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta D$ (‰)
CBA 11	18/09/2013	5,76	128	17,2	83	748	-7,77	-38,35
CBA 12	18/09/2013	5,92	113	17,07	74	720	-7,81	-37,32
CBA 16	18/09/2013	6,14	145	17,8	94	746	-7,95	-38,34
CBA 17	18/09/2013	5,98	180	17,17	98	721	-7,76	-36,96
CBA 18	18/09/2013	6,21	146	17,3	95	737	-7,69	-36,51
CBA 19	18/09/2013	5,46	133	16,6	86	702	-7,87	-36,48
CBA 20	18/09/2013	6,42	141	17,58	92	734	-7,78	-37,34
CBA 26	18/09/2013	6,3	106	17,32	69	721	-8,17	-39,1
CBA 34	18/09/2013	6,17	173	17,38	112	731	-7,93	-38,2
FONTE 1	18/09/2013	5,65	119	15,69	77	604	-7,84	-38,47
FONTE 2	18/09/2013	5,99	111	13,61	72	741	-7,84	-38,37
FONTE 3	18/09/2013	5,15	124	16,58	81	547	-7,81	-37,79
CBA 02	25/10/2013	6,29	194	18,26	126	466	-8,93	-41,9
CBA 05	25/10/2013	6,17	150	18,27	97	740	-9,07	-42,51
CBA 10	25/10/2013	5,84	105	17,96	68	782	-8,82	-41,03
CBA 11	25/10/2013	5,94	120	17,73	78	753	-8,78	-41,13
CBA 12	25/10/2013	5,77	72	17,71	47	548	-8,91	-42,12
CBA 16	25/10/2013	6,39	139	18,31	90	741	-8,92	-41,87
CBA 17	25/10/2013	6,38	179	18,49	115	740	-9,13	-42,91
CBA 18	25/10/2013	6,09	146	18,14	95	760	-9,34	-49,71
CBA 19	25/10/2013	6,16	137	18,1	89	728	-9,15	-45,7
CBA 20	25/10/2013	6,31	134	18,02	87	721	-9,21	-44,33
CBA 26	25/10/2013	6,19	98	18,52	63	742	-9,18	-44,42
CBA 34	25/10/2013	6,04	166	18,24	108	754	-8,82	-42,18
FONTE 1	25/10/2013	5,37	114	18,77	73	470	-8,82	-41,72
FONTE 2	25/10/2013	5,91	123	17,89	80	774	-9,1	-42,71
FONTE 3	25/10/2013	5,06	128	18,21	83	521	-8,47	-39,4
CBA 02	27/11/2013	.	.	.	.	.	-8,75	-39,82
CBA 05	27/11/2013	6,25	158	18,62	103	746	-8,95	-41,16
CBA 10	27/11/2013	6	106	18,4	68	836	-8,97	-41,85
CBA 11	27/11/2013	5,73	128	18,2	83	796	-8,94	-41,2
CBA 12	27/11/2013	5,81	114	18,41	74	827	-9,07	-40,65
CBA 16	27/11/2013	6,31	138	18,93	90	777	-8,67	-40,13
CBA 17	27/11/2013	6,27	181	19,11	118	759	-8,77	-40,67
CBA 18	27/11/2013	6,07	137	18,26	89	766	-8,91	-41,58
CBA 19	27/11/2013	5,98	140	18,77	91	810	-8,82	-40,96
CBA 20	27/11/2013	6,36	136	18,69	88	691	-8,66	-40,27
CBA 26	27/11/2013	5,99	107	18,29	69	794	-8,98	-43,11
CBA 34	27/11/2013	5,94	167	18,43	108	790	-9,01	-41,81

Poço	Data da Coleta	pH	Condutividade (uS/cm)	Temperatura (°C)	STD (mg/L)	ORP (mv)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta D$ (‰)
FONTE 1	27/11/2013	5,36	119	19,63	77	579	-9,09	-43,53
FONTE 2	27/11/2013	5,87	126	18,75	82	750	-8,76	-41,35
FONTE 3	27/11/2013	5,49	141	18,7	91	570	-8,76	-40,28
CHUVA			-			abril	-9,56	-61,19
CHUVA			-			maio	-6,22	-34,74
CHUVA			-			junho	-7,17	-40,30
CHUVA			-			julho	-3,25	-8,63
CHUVA			-			agosto	-7,72	-37,42
CHUVA			-			setembro	-7,88	-41,27
CHUVA			-			outubro	-11,73	-61,56
CHUVA			-			novembro	-8,89	-43,85