

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO MUNICÍPIO DE FRANCA (SP)**

Jéssica Finardi Ramos

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Rio Claro (SP)

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

JÉSSICA FINARDI RAMOS

## CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO MUNICÍPIO DE FRANCA (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro - SP

2021

R175c

Ramos, Jéssica Finardi

Caracterização Hidroquímica do Município de Franca (SP) / Jéssica Finardi Ramos. -- Rio Claro, 2021

66 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Chang Hung Kiang

1. Hidrogeologia. 2. Química da água. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.  
Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.  
Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

JÉSSICA FINARDI RAMOS

## CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DO MUNICÍPIO DE FRANCA (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Dr. Flávio de Paula e Silva

Dra. Márcia Regina Stradioto

Rio Claro, 11 de março de 2021.

Assinatura da aluna



Assinatura do orientador



“Scars remind us where we’ve been. They don’t have to dictate where we’re going.”

Joe Mantegna

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer inicialmente aos meus pais que lutaram muito para que eu pudesse estar na faculdade e tivesse sempre a melhor educação possível. Sou grata por todo apoio que meu pai me deu e todo encorajamento para que eu pudesse buscar meus sonhos mesmo quando não pareciam possíveis, e por me apresentar a arte, que foi fonte de calma em muito caos. Agradeço imensamente a minha mãe por estar do meu lado mesmo quando minhas escolhas e nossas opiniões divergiam, por ter me confortado tantas vezes mesmo que só com sua voz pelo telefone. Tenho imenso orgulho e me inspiro muito em vocês.

Sou grata por todo apoio, conselho, ajuda e conforto que meu irmão me deu, sendo minha força para enfrentar desafios e inspiração como profissional. Com toda certeza só consegui chegar até aqui na graduação por causa de você e todas as nossas conversas. Agradeço também a minha cunhada que sempre me aconselhou e me acalmou, além de ser uma inspiração acadêmica.

Sou muito grata ao meu orientador, que me guiou com muita paciência e me ajudou a atingir o objetivo final. Agradeço também todos do LEBAC e laboratórios que me ajudaram, tornando possível a existência desse trabalho.

Agradeço ao meu grupo de amigos que fizeram com que fosse possível sobreviver a todas as dificuldades da faculdade, que me fizeram gargalhar, que me acolheram, que me ajudaram, que me protegeram e que foram os melhores companheiros possíveis. Vocês sabem quem são e sempre estarão no meu coração.

Por último, mas não menos importante, agradeço ao meu melhor amigo e companheiro de vida que me protegeu, aconselhou, guiou, escutou, confortou, animou, acalmou e fez tantas outras coisas por mim. Esse trabalho só foi possível porque você me ajudou em campo e me deu todo apoio psicológico mesmo quando eu pensei em desistir. Meu tempo de graduação não teria sido tão bom se não fosse por você, e mesmo antes de ser meu companheiro, já era meu melhor amigo e anjo.

## RESUMO

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) compreende uma importante reserva subterrânea de água na Bacia do Paraná, atualmente muito usada para consumo humano devido à sua boa qualidade físico-química e bacteriológica. Esse aquífero se encontra aflorante no município de Franca, nordeste do estado de São Paulo, o qual foi escolhido como área de estudo. Franca atualmente é abastecida majoritariamente por água superficial e só utiliza água subterrânea em casos de crise, retirando essa água do Sistema Aquífero Guarani (SAG). O intuito desse estudo foi identificar se o SASG pode ser uma alternativa de abastecimento e qual é a influência do mesmo para as águas superficiais. Foram coletadas amostras de água de poços do SASG para classificação hidroquímica e análise da viabilidade de uso dessas águas. Além disso, amostras de nascentes e rios também foram analisadas para a melhor compreensão da interação das águas subterrâneas e superficiais na área. Os diagramas de Piper e Stiff, construídos a partir dos resultados hidroquímicos, permitiram classificar as águas do SASG nessa região como Bicarbonatadas cálcio-magnésiana e Bicarbonatadas sódicas. A distribuição em área desses dados indica o provável fluxo do SASG e uma área de recarga e descarga onde há influência de água atmosférica. Os resultados mostram que a maioria das águas estudadas são próprias para consumo humano, segundo Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde.

**Palavras chave:** Água Subterrânea, Sistema Aquífero Serra Geral, Interação Água Subterrânea e Água Superficial, Hidroquímica

## **ABSTRACT**

The Serra Geral Aquifer System (SGAS) is an important subsurface water resource in Paraná Basin, which is currently widely used for human consumption due to its good physical-chemical and bacteriology quality water. This aquifer is outcropping in the municipality of Franca, northeast of the state of São Paulo and was chosen as the study area. Franca is currently supplied mainly by surface water and it only uses groundwater during water crisis, extracting from the Guarani Aquifer System (GAS). The purpose of this study is to identify whether the SGAS can be an alternative for supply as well as its influence on surface water. Samples of wells from SGAS were analysed to determine the hydrochemical classification and for potential use of the SGAS. In addition, samples of springs and rivers were analysed for a better understanding of the interaction of groundwater and surface water in the area. The Piper and Stiff diagrams, made with the hydrochemical results, allowed the classification of the SGAS water in the area as Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> type and Na- HCO<sub>3</sub> type. The distribution of this results in maps indicate a probable flow and a recharge/discharge area, where the atmospheric water influences is observed. The hydrochemical results show that most of the waters are suitable for human use according to Consolidation nº5 from Brazilian Health Ministry.

**Keywords:** Groundwater, Serra Geral Aquifer System, Groundwater and Surface Water Exchange, Hydrochemistry

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Ilustração do ciclo da água e seus caminhos.....                                                                       | 17 |
| Figura 2 -Esquemas dos tipos de trocas entre água superficial e subterrânea.....                                                  | 22 |
| Figura 3 - Impacto da topografia no fluxo dos aquíferos. ....                                                                     | 23 |
| Figura 4 - Exemplo de condutividade, recarga e descarga entre litologias diferentes<br>.....                                      | 23 |
| Figura 5 - Mapa de localização do município de Franca (SP) .....                                                                  | 24 |
| Figura 6 - Mapa da geologia do município de estudo.....                                                                           | 25 |
| Figura 7 - Mapa pedológico do estado de São Paulo.....                                                                            | 31 |
| Figura 8 - Mapa de localização da UGRHI-08 no estado de São Paulo.....                                                            | 32 |
| Figura 9 - Mapa das sub-bacias hidrográficas da Bacia UGRHI-08 .....                                                              | 33 |
| Figura 10 - Aquíferos do estado de São Paulo com zoom na área de estudo .....                                                     | 34 |
| Figura 11 - Mapa do índice de Potencial Poluidor e Áreas Contaminadas do estado<br>de São Paulo.....                              | 38 |
| Figura 12 - Mapa de pontos sobre a geologia local.....                                                                            | 40 |
| Figura 13 - Tipos químicos de água distribuídos no diagrama de Piper .....                                                        | 43 |
| Figura 14 - Diagrama de Stiff .....                                                                                               | 43 |
| Figura 15 - Diagramas de Piper .....                                                                                              | 46 |
| Figura 16 - Mapa de detalhe da área com os diagramas de Stiff plotados em seus<br>respectivos pontos .....                        | 48 |
| Figura 17 - Esquema de profundidade dos poços e as formações geológicas .....                                                     | 50 |
| Figura 18 - Mapa com diagramas de Stiff dos pontos do SASG amostrados para o<br>estudo e os pontos de Gastmans et al. (2016)..... | 51 |
| Figura 19: Gráfico com o resultado de isótopos .....                                                                              | 53 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Quantidade de poços em cada formação geológica. ....            | 44 |
| Tabela 2 - Contabilidade de cada tipo de dado encontrado no SIAGAS .....   | 45 |
| Tabela 3 - Cotas dos poços e relação das cotas de base com a geologia..... | 49 |
| Tabela 4 - Valor Máximo Permitido .....                                    | 54 |

## SUMÁRIO

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                  | <b>13</b> |
| 1.1      | Objetivo.....                                            | 14        |
| <b>2</b> | <b>CONCEITOS GERAIS.....</b>                             | <b>15</b> |
| 2.1      | Ciclo da água .....                                      | 15        |
| 2.2      | Aquíferos fraturados.....                                | 18        |
| 2.3      | Conexão água subterrânea e superficial.....              | 20        |
| <b>3</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA.....</b>                 | <b>24</b> |
| 3.1      | Área de Estudo .....                                     | 24        |
| 3.2      | Geologia .....                                           | 24        |
| 3.2.1    | Unidades Mesozoicas .....                                | 25        |
| 3.2.2    | Unidades Recentes .....                                  | 29        |
| 3.2.3    | Tectônica Regional.....                                  | 29        |
| 3.3      | Geomorfologia, Pedologia e Vegetação .....               | 30        |
| 3.4      | Clima e Hidrografia .....                                | 31        |
| <b>4</b> | <b>HIDROGEOLOGIA.....</b>                                | <b>34</b> |
| 4.1      | Aquífero Franca .....                                    | 35        |
| 4.2      | Sistema Aquífero Serra Geral .....                       | 35        |
| 4.3      | Sistema Aquífero Guarani .....                           | 37        |
| 4.4      | Risco de Contaminação.....                               | 38        |
| <b>5</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                  | <b>38</b> |
| 5.1      | Dados do SIAGAS e SABESP .....                           | 39        |
| 5.2      | Análise de imagens de satélite e mapas .....             | 39        |
| 5.3      | Coleta de amostras .....                                 | 39        |
| 5.4      | Classificação de Águas: Diagramas de Piper e Stiff ..... | 42        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                      | <b>43</b> |
| 6.1      | Discussão Dados do SIAGAS .....                          | 43        |
| 6.2      | Dados Hidroquímicos – Diagrama de Piper .....            | 45        |

|          |                                                                         |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.3      | Dados Hidroquímicos – Diagrama de Stiff .....                           | 47        |
| 6.4      | Interpretação das Classificações – Poços.....                           | 48        |
| 6.5      | Interpretação das Classificações – Nascentes e Águas Superficiais ..... | 51        |
| 6.6      | Dados Isotópicos .....                                                  | 52        |
| 6.7      | Análise dos Padrões de Consumo do CONAMA e Contaminação .....           | 53        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                                   | <b>55</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                 | <b>58</b> |
|          | <b>ANEXO.....</b>                                                       | <b>64</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de água pela humanidade vem aumentando a cada dia, e se torna necessário o conhecimento sobre todas as fontes aproveitáveis de água na Terra. Devido a problemas climáticos, os reservatórios superficiais de água vêm sofrendo com a diminuição de seu volume ou até desaparecimento. Dessa forma, a água subterrânea vem sendo cada vez mais empregada no abastecimento de populações. Os aquíferos que armazenam essas águas variam muito em suas características geológicas e, conseqüentemente, a composição das águas neles acumuladas.

Sabe-se que rochas vulcânicas como basaltos podem ser bons aquíferos devido à boa qualidade físico-química e bacteriológica das águas neles contidas e devido às boas vazões encontradas em regiões com grande densidade de fraturas e zonas de alteração. No mundo existem diversos exemplos de aquíferos basálticos importantes, como os de Decan Plateau na Índia, as Montanhas de Golan em Israel, Atheron Tablelands na Austrália e Columbia River Plateau na América do Norte (FARACINI, 2013). Na América do Sul, a Formação Serra Geral, constituída principalmente por derrames basálticos, se estende amplamente pela Bacia do Paraná; essa unidade é resultado de um grande evento magmático ocorrido durante o Mesozoico, conhecido como um dos maiores do mundo. O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), cujo arcabouço rochoso é formado pela Formação Serra Geral, é importante no Brasil nos estados de Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo, sendo várias cidades de todos esses estados abastecidas por esse sistema aquífero.

Na região nordeste do estado de São Paulo, alguns estudos foram feitos sobre: a capacidade da Formação Serra Geral ser um aquífero economicamente viável; sua relação com o Sistema Aquífero Guarani que se encontra abaixo; sua composição hidroquímica; suas características de fluxo e vazão, dentre outros temas (GASTMANS et al., 2016; GALLO & SINELLI, 1980; FERNANDES et al., 2010; 2012; entre outros). Porém, as áreas mais próximas da divisa com o estado de Minas Gerais não possuem muitos estudos.

Buscando ampliar os estudos sobre o SASG na região, foi escolhido como foco deste estudo o município de Franca (SP), que se localiza a 15 km da divisa com

Minas Gerais, e constitui importante polo industrial do estado de São Paulo. O município de Franca está localizado em uma das principais áreas de afloramento da Formação Serra Geral na região nordeste do estado de São Paulo, porém apresenta poucos estudos geológicos e nenhum sobre hidrogeologia.

Nesse contexto, é importante que sejam efetuados estudos hidrogeológicos na área, já que a mesma está localizada em uma área onde o SASG é aflorante. Além disso, a falta de conhecimento sobre este sistema aquífero se comparado com outros presentes na região, como é o caso do Sistema Aquífero Guarani (SAG), traz relevância ao estudo aqui empreendido. O detalhamento desse sistema pode viabilizar o uso do mesmo como importante fonte para o abastecimento público de pequena escala na área de estudo.

Mais especificamente no município de Franca esse estudo se mostra importante devido ao fato de o abastecimento público da cidade provir em sua maior parte de águas superficiais, que podem ser afetadas por questões climáticas e sofrer drásticas quedas de volume, acarretando uma crise no abastecimento. Dessa forma, as águas subterrâneas seriam uma alternativa para o uso público. O SASG não é homogêneo, e por isso estudos localizados são importantes para analisar a potencialidade de seu uso e para que sua exploração não gere problemas devido à extração excessiva. Atualmente, indústrias e culturas agrícolas utilizam a água dos aquíferos da região em seus processos, além de muitos proprietários de sítios e chácaras utilizarem poços para abastecimento e lazer.

As águas subterrâneas também são responsáveis pelo abastecimento dos sistemas hidrológicos superficiais. Por isso, é importante avaliar a interação entre águas superficiais e subterrâneas, de modo entender a contribuição de cada aquífero no escoamento dos rios da região.

### **1.1 Objetivo**

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização das águas do município de Franca, focando em dados hidroquímicos, de forma que se torne possível identificar as interações entre águas superficiais e subterrâneas, e identificar possíveis usos para as águas. Para tanto, foram analisados dados hidroquímicos de amostras de águas superficiais e subterrâneas.

O estudo pretendeu identificar as características gerais do SASG, os tipos químicos de água encontrados na região, a possível contribuição do SASG no escoamento dos rios, a distribuição geográfica dos tipos hidroquímicos identificados e a qualidade das águas para uso humano. Esses dados gerados no trabalho podem ser posteriormente usados para implementação de políticas hídricas municipais e conscientização da população, de modo que o uso das águas seja feito da forma racional e sustentável.

## **2 CONCEITOS GERAIS**

A seguir serão tratados os conceitos mais importantes para o entendimento do trabalho. São conceitos teóricos principalmente sobre o funcionamento da circulação de água em superfície e em subsuperfície.

### **2.1 Ciclo da água**

A água presente em nosso planeta faz parte de um ciclo natural complexo chamado de ciclo hidrológico. Esse ciclo se baseia principalmente em: evaporação, precipitação, escoamento, infiltração e movimento das águas. Mas dentro de cada uma dessas etapas existem outros processos muito importantes como transpiração de plantas, os diferentes tipos de escoamento, a interação entre os processos etc. (TUNDISI, 2003). Para que esse ciclo ocorra são necessárias algumas fontes de energia; as principais são, a energia solar e a força gravitacional (SILVEIRA, 2007).

Por se tratar de um ciclo, não existe um ponto inicial ou final, mas por motivos didáticos tende-se a explicar o ciclo tendo como começo a evaporação da água dos oceanos, e como final o retorno das águas continentais para o oceano (SILVEIRA, 2007).

O processo começa quando parte da água líquida do oceano evapora, ou seja, passa pela mudança de fase e se transforma em vapor de água, que possui um peso molecular muito menor e, devido a isso, pode ser transportado por grandes distâncias e chegar até o continente. Porém, parte da água evaporada se precipita no próprio oceano e retorna diretamente a ele (SILVEIRA, 2007).

A porcentagem de vapor de água que é deslocada para o continente, quando a atmosfera oferece as condições necessárias, se condensa e precipita no continente em forma líquida ou sólida (neve ou granizo).

Quando a água que chega ao continente, precipitada no estado líquido, cai sobre o solo e pode passar por processos variados (SILVEIRA, 2007). Quando a água da chuva fica retida nas camadas mais superficiais do solo, em um curto período de tempo tende a se evaporar e voltar para a atmosfera. Também o processo de transpiração das plantas faz com que a água retorne para a atmosfera. À junção desses dois processos se dá o nome de evapotranspiração (SILVEIRA, 2007). Além desses processos, a água pode escoar superficialmente, ou seja, se mover por sulcos e ravinas, pela parte superior do solo. Nesse caso, ela tende a se deslocar para depressões no solo, onde passam por evaporação, infiltração ou são absorvidas pelas plantas. O restante da água que teve força gravitacional suficiente e conseguiu continuar o seu processo de transporte se move até encontrar um corpo de água como um rio ou lago (SILVEIRA, 2007).

O último processo que pode ocorrer com a água que precipita no continente é o de infiltração, que a leva até um aquífero, onde ocorre o escoamento subterrâneo, que é o movimento lento dessa água até outros corpos superficiais de água, como rios e lagos, ou até mesmo diretamente ao oceano. A água em aquíferos também pode ser usada por plantas e voltar a atmosfera por transpiração. (SILVEIRA, 2007).

O ciclo, esquematizado na figura 1, pode parecer algo constante tanto em tempo quanto em quantidade, mas ele varia muito, pois depende de fatores como clima, disponibilidade local de água, diferentes tipos de solos e rochas, diferentes coberturas vegetais e questões espaciais como a rotação e inclinação da Terra (SILVEIRA, 2007).

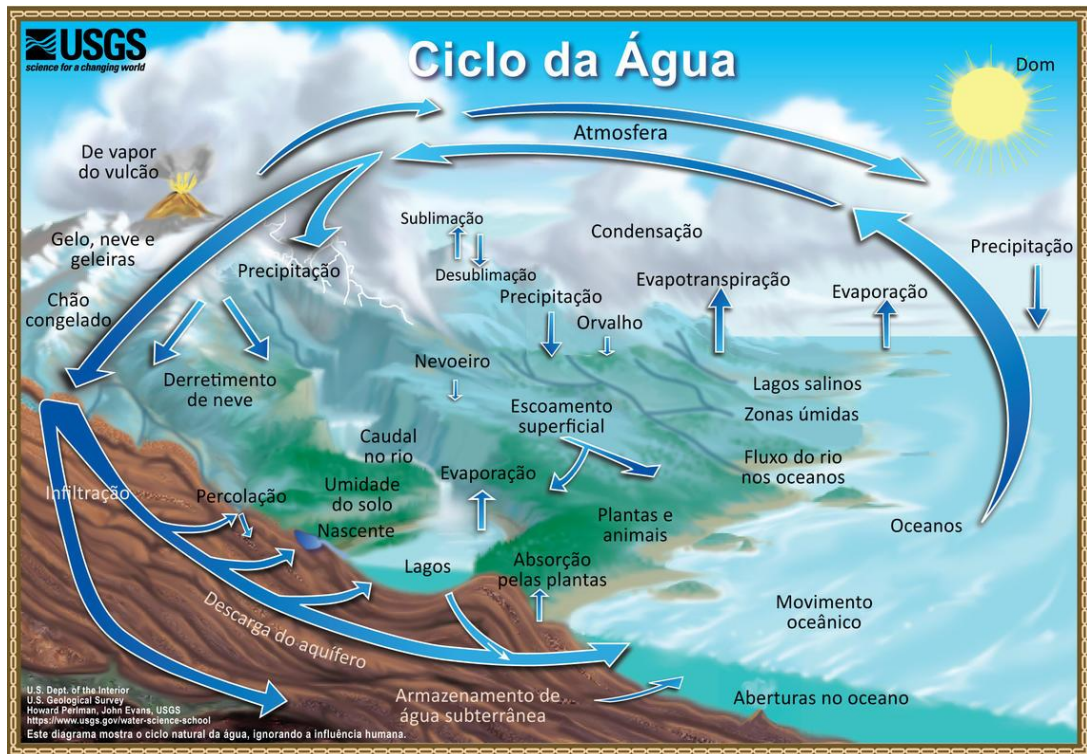


Figura 1 - Ilustração do ciclo da água e seus caminhos. Fonte: USGS.

O ciclo hidrológico como apresentado na figura 1 é extremamente simplificado e não contempla a interferência humana. O agente antropogênico vem sendo apontado como um dos fatores mais importantes na variação do ciclo da água (ABBOTT et al., 2019; GLEESON et al., 2016, 2020; entre outros). Segundo Gleeson et al. (2020), os humanos interferem nos diversos sistemas terrestres e seus impactos diretos ou indiretos afetam o ciclo. Como exemplo, os autores mostram que o desmatamento de uma floresta tropical geraria menor evaporação, o que causaria seca em diversas áreas que recebem a umidade dessa floresta por meio de movimentação atmosférica. A seca levaria a diversos problemas climáticos, como aumento das temperaturas; problemas no ciclo hídrico, que teria menor entrada de água, e no ciclo do carbono, já que as florestas tropicais e as águas superficiais são grandes captadoras de carbono atmosférico. Portanto, a interferência humana na Terra pode impactar outras esferas, já que todas estão conectadas.

O uso e a ocupação do solo, o desmatamento, a poluição e o uso não consciente das águas são ações humanas que levam o sistema terrestre a passar por mudanças em suas dinâmicas, de forma que se adapte às novas condições, ou mesmo gere mudanças irreversíveis (GLEESON et al., 2020). A falta de modernização e inclusão de dados nos diagramas de ciclo hídrico, e principalmente

a falta de inserção do fator antropogênico, leva a uma interpretação errônea de que toda água é renovável, própria para uso humano, e que as reservas subterrâneas seriam capazes de suprir os déficits superficiais. Não visualizando as consequências causadas pela ação humana, a sociedade tende a não saber manejar o uso da água de forma correta, sustentável, e passa a acreditar que os sistemas devem se adaptar ao funcionamento da sociedade e não o contrário (ABBOTT et al., 2019).

## **2.2 Aquíferos fraturados**

Os aquíferos fraturados são aquíferos que ocorrem em rochas magmáticas ou metamórficas. Esse tipo de rocha normalmente não possui muita porosidade, tendo seu valor de porosidade em rochas densas raramente superior a 2%, o que é quase insignificante, já que muitas vezes esses poros não são interligados, levando a uma permeabilidade muito baixa (FREEZE & CHERRY, 1979).

Um exemplo é o caso dos granitos que normalmente têm permeabilidade de  $10^{-3}$  milidarcy ( $10^{-11}$  m/s). Nesse caso, para a maioria dos problemas de hidrogeologia essas rochas são consideradas impermeáveis (FREEZE & CHERRY, 1979).

Portanto, para que haja o fluxo de água nessas rochas são necessárias estruturas, que se formam durante diversos eventos que ocorrem na história geológica, e normalmente são causadas por variação do regime de estresse, por condições de resfriamento ou eventos tectônicos. As mudanças nesses regimes fazem com que se formem fraturas nas rochas antes maciças. Nesses casos, podem constituir os denominados aquíferos fraturados. Essas fraturas tendem a se concentrar mais perto da superfície, a poucas dezenas de metros de profundidade. Porém, em alguns casos, conseguem alcançar poucas centenas de metros (FREEZE & CHERRY, 1979).

Além da conexão entre as fraturas, o mais importante para o fluxo e a vazão nesse tipo de aquífero é a largura da abertura. Normalmente essas aberturas tendem a ter 1 mm de largura. Esse valor pode variar muito devido ao tipo de rocha e às condições de estresse pela qual a rocha passou. A diferença do diâmetro de abertura faz com que a vazão varie drasticamente (FREEZE & CHERRY, 1979). Além disso, com o tempo essas estruturas geradas podem ser alargadas por

processos de dissolução, ou fechadas por processos de precipitação de minerais que obstruem o fluxo de água pelas fraturas (DAVIS, 1969).

Como citado anteriormente, a maior parte das fraturas se localiza mais perto da superfície devido à maior suscetibilidade ao estresse dessa região. Portanto, normalmente a parte mais próxima da superfície tende a ser mais permeável. Já a porção mais profunda usualmente se mostra menos permeável, pois suas fraturas tendem a se fechar devido a tensões verticais e laterais causadas por sobrecarga ou por tectônica (FREEZE & CHERRY, 1979). Mas também nessa porção mais profunda podem se formar fraturas maiores, capazes de armazenar grande quantidade de água. Uma prova disso é que na maioria das minas profundas de rochas cristalinas há significativa surgência de água (FREEZE & CHERRY, 1979).

O fluxo subterrâneo se dirige para porções mais baixas dos terrenos, onde as águas se acumulam, e além disso essas regiões normalmente possuem estruturas propícias ao armazenamento de água, o que faz com que a produção nessas regiões seja maior (FREEZE & CHERRY, 1979).

No caso específico de aquíferos em rochas básicas vulcânicas, o esfriamento do magma extravasado faz com que uma série de fraturas sejam formadas (fraturas de resfriamento) (DOMENICO & SCHWARTZ, 1998). Outra estrutura importante gerada por esse tipo de magmatismo são as amígdalas, que ocorrem devido ao resfriamento rápido e maior escape de gases. Essas amígdalas tendem a se concentrar na camada mais superficial de cada derrame. Além dessas estruturas as rochas formadas pelo magmatismo extrusivo básico normalmente resultam de vários pulsos de lava. Esses eventos lançam lavas sobre os derrames anteriores; nesse processo, o novo derrame pode exercer uma pressão capaz de fraturar e arrastar consigo camadas de rocha já resfriadas, fazendo com que sejam formadas camadas com blocos fraturados de rocha. Nesse caso, a estrutura fragmentária da rocha tende a apresentar maior porosidade. Existem também descontinuidades entre os derrames que podem armazenar água. Esses quatro tipos de estruturas são muito importantes para tornar certas camadas do derrame porosas e permeáveis. (DAVIS, 1969).

Davis (1969) ainda mostra que o fluxo da água subterrânea geralmente é paralelo ao antigo fluxo de magma, e que a permeabilidade normalmente é maior na direção do mergulho original mais íngreme.

Toda essa permeabilidade gerada durante o resfriamento do basalto pode ser fechada ao longo do tempo geológico devido à cimentação e ao soterramento profundo que gera pressões capazes de fechar os espaços vazios (FREEZE & CHERRY, 1979).

O basalto, como outras rochas cristalinas, tem sua permeabilidade e porosidade distribuída de forma muito anisotrópica. Algumas camadas do derrame podem ser extremamente permeáveis e porosas, já outras podem ser muito maciças, e podem funcionar como aquitardos regionais (FREEZE & CHERRY, 1979).

Estudos hidroquímicos e geofísicos sobre as colinas de Golan, os derrames de Decan Plateau, da bacia Karoo e do Columbia River Plateau (HEARN et al., 1985; HELM-CLARK et al., 2004; DAFNY et al., 2006) comprovam o padrão de fluxo por fraturas e as diferenças de permeabilidade entre o centro e as camadas superficiais de cada derrame nos diferentes corpos rochosos.

### **2.3 Conexão água subterrânea e superficial**

Como em todo o resto do ciclo hidrológico, existe um trânsito de duplo sentido entre a água subterrânea e a superficial, ou seja, a água subterrânea pode voltar à superfície, ou a superficial se move em direção aos aquíferos subterrâneos (WOESSNER, 2020).

Essas trocas entre as águas superficiais e subterrâneas ocorrem em várias escalas e tempos diferentes. Além disso, essa troca normalmente ocorre entre as águas subterrâneas mais rasas, que não estão confinadas, e os corpos de água na superfície. A diferença de elevação entre o nível freático e o nível de água superficial, a composição geológica e pedológica da área, e as características hidráulicas de cada camada são algumas das razões para existência dessa troca (WOESSNER, 2020).

Quando a água superficial flui para o aquífero, ocorre um processo de perda e o corpo hídrico superficial é chamado influente. Quando a água do aquífero flui e

alimenta o corpo superficial, ocorre um processo de ganho e o corpo hídrico superficial é chamado efluente. Existem casos ainda em que a água passa pelo corpo superficial, mas seguindo o fluxo retorna ao aquífero (WOESSNER, 2020; CONANT et al., 2019). A seguir serão detalhados os condicionantes e o processo para a ocorrência de cada tipo de troca.

No caso de perda, o corpo de água superficial, por exemplo um rio, se encontra em um nível de água superficial mais alto do nível freático. Considerando-se, portanto, um ambiente isotrópico, a água superficial fluiria para o aquífero devido ao gradiente hidráulico (WOESSNER, 2020). A figura 2a ilustra esse caso.

Já quando ocorre um processo de perda, o nível freático está mais alto que o nível de água superficial, de forma que a água tende a sair do aquífero e alimentar o rio, também devido ao gradiente hidráulico (WOESSNER, 2020). Exemplo desse processo está ilustrado na figura 2b.

Se o nível freático varia de altura nos diferentes lados do rio, a água tende a sair do aquífero, passar pelo rio e voltar para o ambiente subterrâneo, já que o fluxo de água busca sempre a menor gradiente hidráulico. Como pode ser observado na figura 2c, o nível freático na esquerda está mais alto que o nível de água do rio, portanto o sentido do fluxo é do aquífero para o rio. Porém, no lado direito da imagem o nível freático está mais baixo que o nível de água do rio, o que faz com que o fluxo seja do rio para o lençol freático. Nesse processo, o fluxo da água passa pela superfície momentaneamente e retorna ao aquífero (WOESSNER, 2020).

Existem ainda casos em que os níveis, do rio e freático, são os mesmos, de forma que não existe gradiente hidráulico; consequentemente não há troca entre águas superficiais e subterrâneas (WOESSNER, 2020), como pode ser observado na figura 2d.

Esses conceitos de conexão são válidos considerando-se um meio homogêneo, mas esse não é o caso na natureza, por isso vários processos diferentes podem ser encontrados ao longo de um único rio (WOESSNER, 2020).

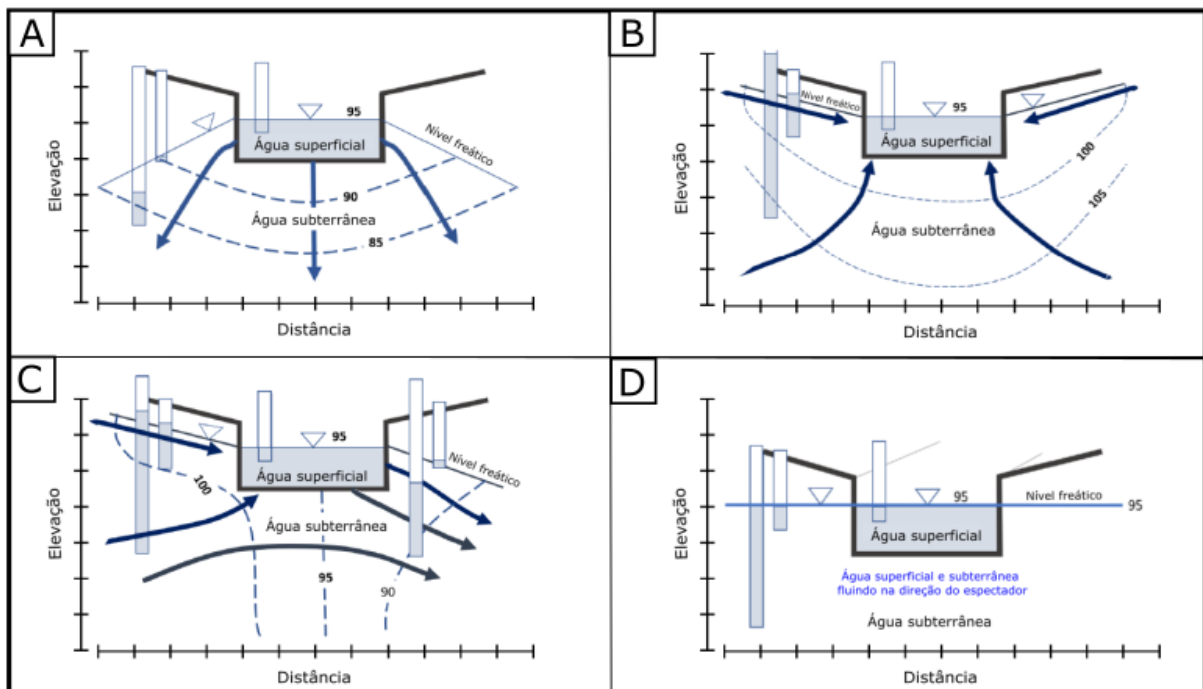


Figura 2 -Esquemas dos tipos de trocas entre água superficial e subterrânea. A) Perda B) Ganho C) Fluxo Passante D) Mesmo nível. Fonte: modificado de Woessner (2020).

Os processos de troca são influenciados pelo fluxo dentro dos aquíferos, devido a entrada e saída de água no sistema. A entrada de água no aquífero, por infiltração ou processo influente, é chamada de recarga, e a saída, por processo efluente, é conhecida como descarga. Os processos de troca entre águas superficiais e subterrâneas podem ser influenciados por três fatores principais: oferta de água, relevo e geologia. Considerando-se somente o fator relevo, é sabido que o nível freático tende a acompanhar a topografia. Nesse caso, o nível do freático varia muito, conforme a variação do relevo; por isso acabam sendo criados diversos pequenos sistemas de fluxos, em que as áreas mais altas são de recarga e as mais baixas de descarga. A esses fluxos menores e mais complexos é dado o nome de fluxo local. Já no caso de terrenos mais aplainados ou quando o nível freático não segue a topografia, o fluxo tende a ser mais contínuo, gerando um sistema de fluxo conhecido como regional (FREEZE & CHERRY, 1979). Ambos são mostrados na figura 3.

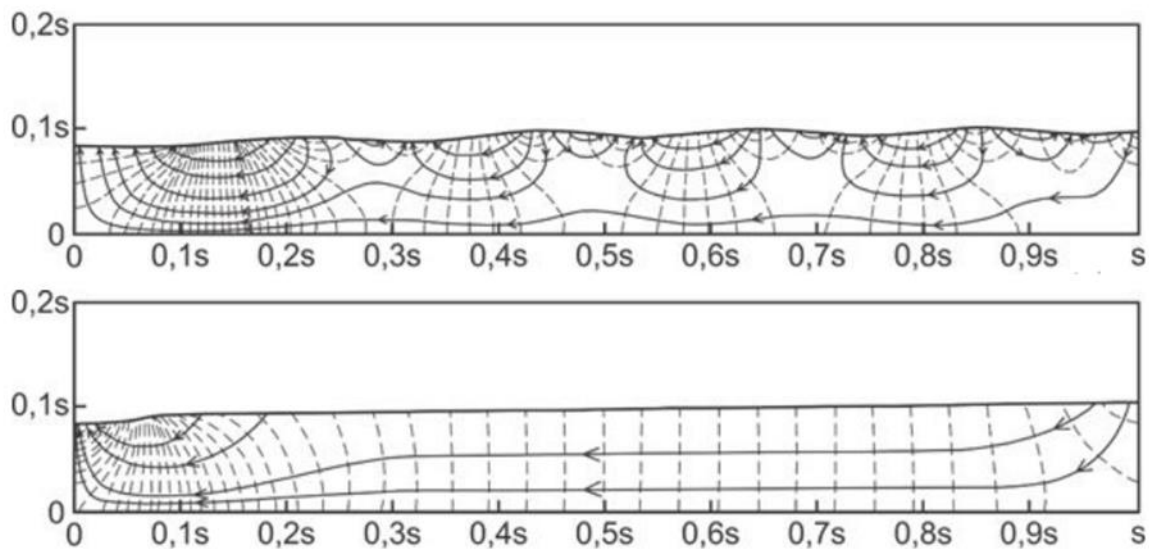


Figura 3 - Impacto da topografia no fluxo dos aquíferos. Na figura acima, o relevo irregular gera fluxos localizados. Na figura abaixo, a topografia mais plana gera fluxo regional. Fonte: Freeze & Cherry (1979).

Considerando-se a geologia, diferentes arranjos litológicos podem gerar diferentes tipos de fluxo. O entendimento do fluxo nesse caso se baseia na condutividade hidráulica dos litotipos. É observado que quanto maior a diferença de condutividade hidráulica mais a camada de condutividade alta tende a formar um fluxo regional e a de condutividade baixa tende a formar fluxos locais. Camadas com condutividades muito diferentes, quando associadas ao um relevo ondulado podem gerar no aquífero um fluxo horizontal muito forte, (Figura 4), que age como um “duto” e faz com que se criem sistemas regionais muito amplos e aquíferos de grande extensão e complexidade (FREEZE & CHERRY, 1979).

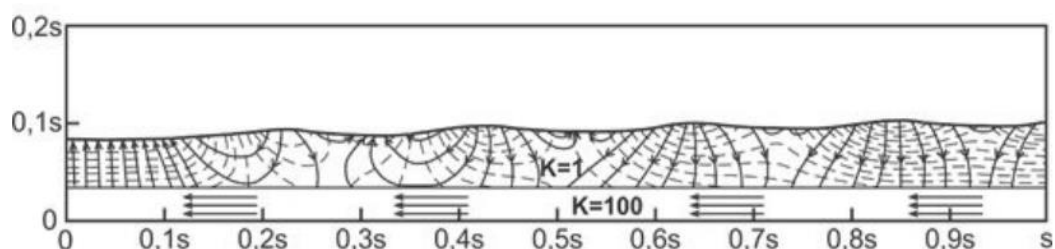


Figura 4 - Exemplo de condutividade, recarga e descarga entre litologias diferentes. Fonte: Freeze & Cherry (1979).

Todo esse processo (de conexão entre águas superficiais e subterrâneas) é muito influenciado pela ação humana porque qualquer variação dos condicionantes, como rebaixamento do nível freático devido à exploração de poços ou à canalização de rios, muda as dinâmicas de trocas entre essas águas (WOESSNER, 2020).

### 3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

#### 3.1 Área de Estudo

O município de Franca se localiza no nordeste do estado de São Paulo, próximo à divisa com Minas Gerais (Figura 5). A área do município está situada sobre rochas da Bacia do Paraná e constitui uma das áreas de afloramento da Formação Serra Geral no estado.

#### Localização Município de Franca (SP)

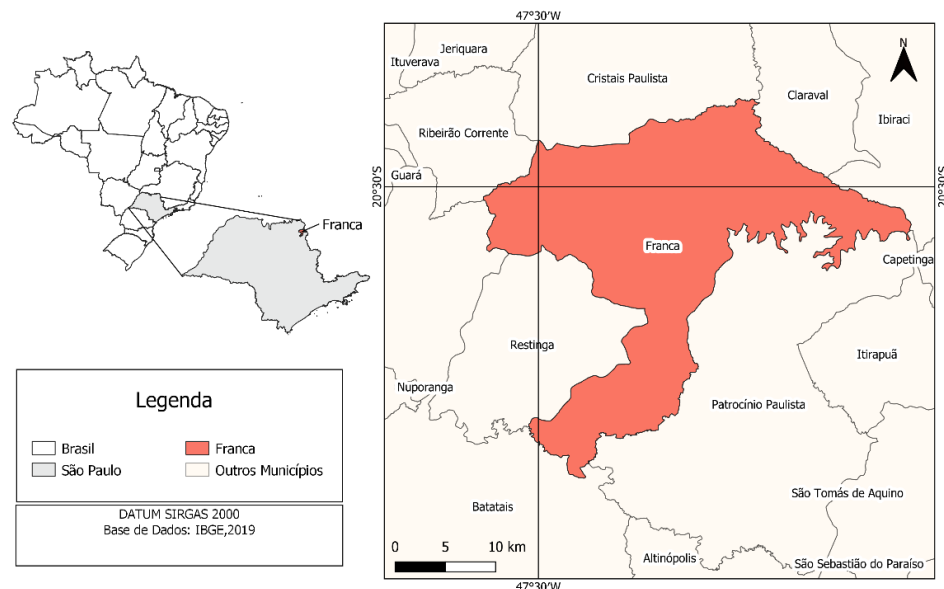


Figura 5 - Mapa de localização do município de Franca (SP), escolhido como área de estudo. Fonte: modificado pela autora.

A seguir características fisiográficas da região serão abordadas com mais detalhes.

#### 3.2 Geologia

O município de Franca se localiza próximo à atual borda erosiva da Bacia do Paraná (SOARES et al., 1973). Essa bacia tem idade entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo e abrange uma área de mais de 1.500.000 Km<sup>2</sup>. É dividida estratigraficamente em formações Furnas, Ponta Grossa, Itararé, Tatuí, Irati, Corumbataí, Piramboia, Botucatu, Serra Geral e Grupo Bauru (MILANI, 1994). Na área estudada são encontrados afloramentos das sequências mais superiores da bacia, de idade do Mesozoico, que compõem o Grupo São Bento, formado pelas Formações: Piramboia, Botucatu e Serra Geral (SOARES et al, 1973). Além dessas

formações também é encontrada a Formação Franca, colocada por Hellmeister (1997) junto ao Grupo São Bento, e não com o Grupo Bauru, como em IPT(1990a), Cabral et al. (1992) e Tanno (1995) haviam colocado anteriormente. Neste trabalho será adotada a visão de Hellmeister (1997).

Depósitos cenozoicos, terciários e quaternários também são encontrados nessa região (SOARES et al.,1973). Todas as unidades podem ser observadas no mapa a seguir (Figura 6).

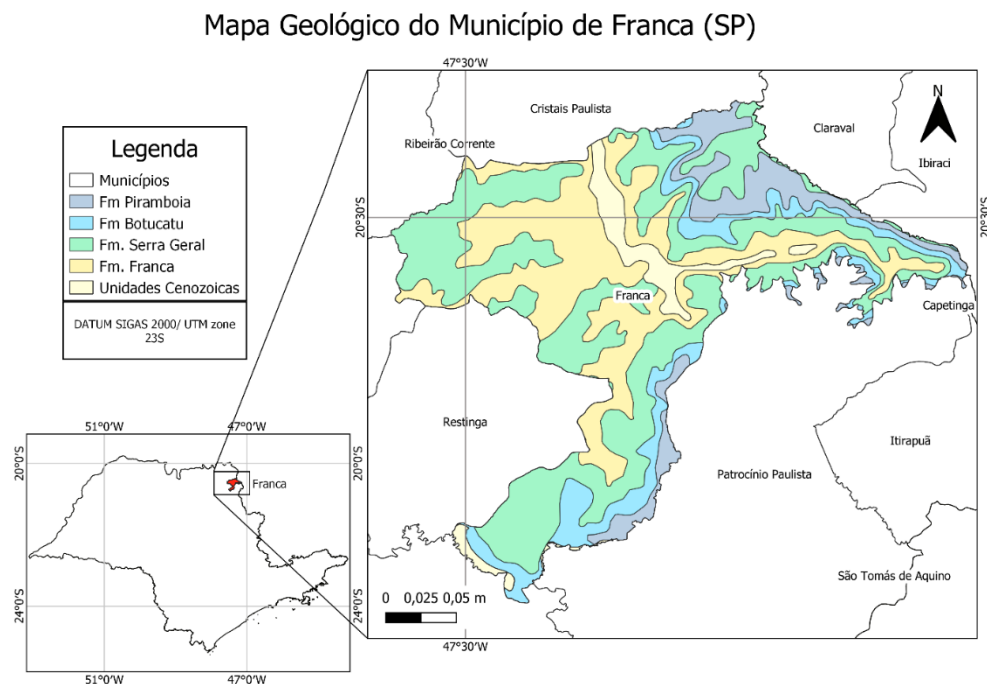


Figura 6 - Mapa da geologia do município de estudo. Base de dados: IBGE, 2019 e CPRM, 2003. Fonte: modificado pela autora.

As unidades geológicas são detalhadas a seguir:

### 3.2.1 Unidades Mesozoicas

Segundo Landim et al. (1980), a coluna mesozoica da Bacia do Paraná pode ser dividida em: parte inferior, formadas de arenitos fluviais e eólicos; parte central, formada de basaltos; e parte superior, formada de arenitos eólicos e fluviais.

Uma descrição generalizada das formações encontradas na área dada a seguir.

#### 3.2.1.1 Formação Piramboia

Essa formação aflora na parte leste e sul do município de estudo e tem área de afloramento distribuída em uma pequena faixa.

A Formação Piramboia é constituída de arenitos que podem ser divididos em puros, argiloso ou conglomeráticos, e também podem ser encontrados lamitos (MASSOLI, 2007).

Os arenitos puros possuem granulometria de muito fino a fino e coloração avermelhada, amarelada ou acinzentada. O restante dos arenitos é predominantemente médio (MASSOLI, 2007).

Os arenitos conglomeráticos podem ser usados como marco estratigráfico do contato entre a Formação Piramboia e Botucatu (MASSOLI, 2007).

Os arenitos mostram acamamento plano-paralelo e estratificação cruzada planar de pequeno a médio porte, tangente a base. Mais raramente podem ser encontradas estratificações cruzadas acanaladas. São comuns corpos de diabásio introduzidos nessa formação. Na área estudada a espessura total dessa unidade não ultrapassa 60m (SOARES et al., 1973).

A Formação Piramboia tem idade entre o Triássico inferior e o Jurássico Superior. Seu ambiente de formação foram rios meandrantos, sendo que na região nordeste do estado de São Paulo são encontradas mais as fácies dos canais desses rios (SOARES et al., 1973). Outros autores como Caetano-Chang et al. (1993) afirmam que o ambiente deposicional do Pirambóia tenha sido eólico com formação de dunas e lagoas interdunas temporárias. No geral, os sedimentos foram depositados em um ambiente oxidante (SOARES et al., 1973).

#### 3.2.1.2 Formação Botucatu

A Formação Botucatu é formada predominantemente de arenitos de granulação fina a média, com coloração avermelhada e acastanhada. Possui os mesmos tipos de litofácies da formação anterior, sendo a mais importante a de arenitos puros (MASSOLI, 2007).

É dominante na formação a estratificação cruzada planar de grande porte e tangencial na base (SOARES et al., 1973).

Em áreas onde a Fm. Botucatu está intercalada com corpos magmáticos e tem pouca espessura, ocorre o processo de cimentação silicosa, provocado pela precipitação de sílica que estava em solução na água subterrânea. Esse processo é mais recente e forma escarpas subverticais na frente da cuesta, o que pode ser observado na Serra de Franca (SOARES et al., 1973).

Sua espessura na região nordeste do estado de São Paulo é de 60m em média (SOARES et al., 1973).

Devido a sua interdigitação com os derrames basálticos se atribui a idade de Jurássico Superior a Cretáceo Inferior à Formação Botucatu. Seu ambiente de deposição foi desértico, formando campos de dunas. (SOARES et al., 1973).

Na região de estudo essa formação aflora no lado leste e sul em pequenas faixas. Existem poucos dados de subsuperfície dessa formação nos dados de poços cadastrados no SIAGAS, porém nos que possuem informações, como por exemplo o poço do Horto Florestal da cidade, a formação Botucatu é descrita como sendo um arenito médio.

#### 3.2.1.3 Formação Serra Geral

É caracterizada por um conjunto de derrames vulcânicos de caráter básico toleítico. Os derrames ocorreram, em parte, concomitantes com a deposição de arenitos da Formação Botucatu, sendo possível encontrar camadas arenosas finas entremeadas derrames. Os diques e sills que cortam outras formações mais antigas da bacia também são incluídos na Formação Serra Geral. Na área de estudo podem chegar a centenas de metros e formam na paisagem morros-testemunho ou superfícies elevadas aplainadas com as bordas formando escarpas (HELLMEISTER, 1997). Analisando o mapa geológico é possível observar que essa formação aflora em quase todo o município. Com os dados de poços cadastrados no SIAGAS e o perfil construtivo do poço da SABESP é possível estimar que a espessura da formação na área de estudo pode chegar até cerca de 500m, sendo que são encontradas diversas camadas arenosas trapeadas no basalto de até 10m.

Acredita-se que a extrusão de lavas ocorreu devido a divisão da África e América do Sul que ocorreu no Cretáceo (ALMEIDA, 1967). Na região de estudo, os

derrames foram datados pelo método Ar/Ar e mostram a idade de 132 Ma (ERNESTO et al., 1999).

A estrutura dos derrames é maciça, mas pode apresentar amígdalas que são preenchidas com minerais secundários como zeólitas, quartzo, calcedônia, celadonita, calcita e argila (GONÇALVES, 1987).

Em termos geoquímicos, na região sul de ocorrência da unidade predominam basaltos com menor quantidade de titânio ( $\text{TiO}_2 \leq 2\%$ ) e elementos incompatíveis (NARDY et al., 2005). Já na área de estudo são observadas maiores concentrações de titânio, e foram classificadas como andesi-basaltos ricos em titânio. Na composição das rochas basálticas dessa região é encontrado magnetita, ilmenita, titanomagnetita, olivina, hornblenda, apatita, andesina, labradorita, augita, pigeonita e quartzo. (GONÇALVES, 1987).

Normalmente são encontrados dois conjuntos de fraturas principais no basalto. Fraturas horizontais, de espaçamento métrico a decimétrico, são encontradas nos contatos entre derrames e se devem ao resfriamento. Já as disjunções ou fraturas verticais a subverticais foram causadas por tectônica (FERNANDES et al., 2006).

#### 3.2.1.4 Formação Franca

Anteriormente conhecida como Unidade Franca, ganhou o título de Formação após estudo detalhado de Hellmeister (1997). Anteriormente era considerada parte do Grupo Bauru ou Formação Itaqueri. O autor afirma que se trata de uma unidade mapeável na escala 1:25000, de corpos contínuos, e pertencente ao Grupo São Bento.

Sua composição é predominantemente arenosa, com granulometria e seleção variada. São em geral maciças e raramente apresentam estruturação. São frequentemente encontrados conglomerados polimíticos com seixos de até 20 cm de diâmetro. Bancos de lamitos arenosos são encontrados com frequência, já argilitos são mais raros (HELLMEISTER, 1997).

O ambiente de deposição foi majoritariamente de alta energia, típico de leques fluviais, envolvendo muitos depósitos de fluxos de massa. Secundariamente

houve deposição por canais, lençóis de escoamento e lacustre (HELLMEISTER, 1997).

Hellmeister (1997) acredita que o paleoclima na época de deposição era árido a semi-árido, pois são encontrados minerais instáveis em clima úmido. O autor também conclui que as unidades fonte para a Formação Franca foram as formações Botucatu, Pirambóia e Serra Geral, além de rochas cristalinas do sul do estado de Minas Gerais.

Em muitas áreas o autor descreve interdigitação da unidade com os derrames basálticos, o que sugere que foram contemporâneos e coloca a Formação Franca com idade de Cretáceo Inferior (HELLMEISTER, 1997).

No mapa geológico da região de estudo essa formação aflora majoritariamente no lado oeste. Segundo dados de perfis construtivos de poços na área de estudo, a formação pode ter espessura de algumas poucas dezenas de metros e é constituída de arenitos e siltitos, com alguns conglomerados.

### 3.2.2 Unidades Recentes

Essas unidades afloram principalmente na parte mais central do município e tem sua espessura, quando somada a Formação Franca, estimada como sendo cerca de 40m. Existem unidades mais recentes que são constituídas basicamente por areias variadas com raras presenças de camadas argilosas. Recobrem extensos chapadões e espigões (SOARES et al, 1973).

Normalmente são geradas por retrabalhamento das unidades inferiores sendo pouco consolidadas e muito porosas. Existem camadas com limonitização devido à grande variação do freático. Nessas unidades eram encontrados os diamantes explorados na região nordeste do estado de São Paulo, provindos de sedimentos vindos de formações do sul de Minas Gerais (SOARES et al, 1973).

### 3.2.3 Tectônica Regional

A área possui uma história tectônica simples. Os falhamentos são de caráter normal, com rejeitos modestos. As falhas representam um reajuste da fragmentação dos blocos cristalinos do embasamento. Não são encontradas evidências de falhas

de transcorrência na bacia, mas falhas de gravidade parecem ter sido geradas. Os alinhamentos observados tendem a ter direção noroeste e não são homogêneos na área (SOARES et al., 1973).

A subsidência da bacia teve vários ciclos e foi complexa, causando impactos principalmente na borda, onde pelos contatos erosivos fica evidente uma flutuação do nível de base da bacia. Outro responsável pelo arranjo estrutural da bacia foram os derrames basálticos que fraturaram e bascularam camadas durante sua ascensão (SOARES et al, 1973).

Durante a subsidência, a maior concentração de tensões se dá na borda da bacia, e é intensificada pela flutuação da subsidência. Portanto, nessa área existe um falhamento mais marcado, devido a essas forças excessivas e a pequena espessura dos pacotes de rocha que facilitam o falhamento por extensas distâncias. As falhas normalmente não possuem rejeito maior que 50 m. Durante o tempo geológico mais recente a região parece permanecer mais calma em relação a tectônica (SOARES et al, 1973).

Foi observado por Soares et al. (1973) que mesmo tendo uma grande atividade de faturamento na região nordeste do estado de São Paulo, esta diminui em direção ao norte. Portanto, a área de estudo desse trabalho possui menor presença de falhas se comparado com áreas mais a sul como Ribeirão Preto, mas ainda apresenta falhamento significativo.

### **3.3 Geomorfologia, Pedologia e Vegetação**

Segundo a divisão feita por Almeida (1956), Franca se localiza na província geomorfológica de Cuesta Basáltica, província de plataformas basálticas que formam escarpas proeminentes na borda da Depressão Periférica do estado de São Paulo. O relevo encontrado nessa província é de colinas médias e amplas, morros amplos e arredondados, além das escarpas. A cidade está a cerca de 1.000 m de altitude, sendo assim uma das mais altas do estado (EMBRAPA, 2020). No município de Franca existem morros-testemunho de basalto e arenito, como o Morro do Sapecado, e se destacam no relevo de colinas (TANNO, 1995). O relevo de todo o derrame basáltico foi muito entalhado por rios e trabalhado erosivamente durante os processos poligênicos que ocorreram na Região Sudeste no final do Cretáceo e no Terciário Superior (IPT, 1981).

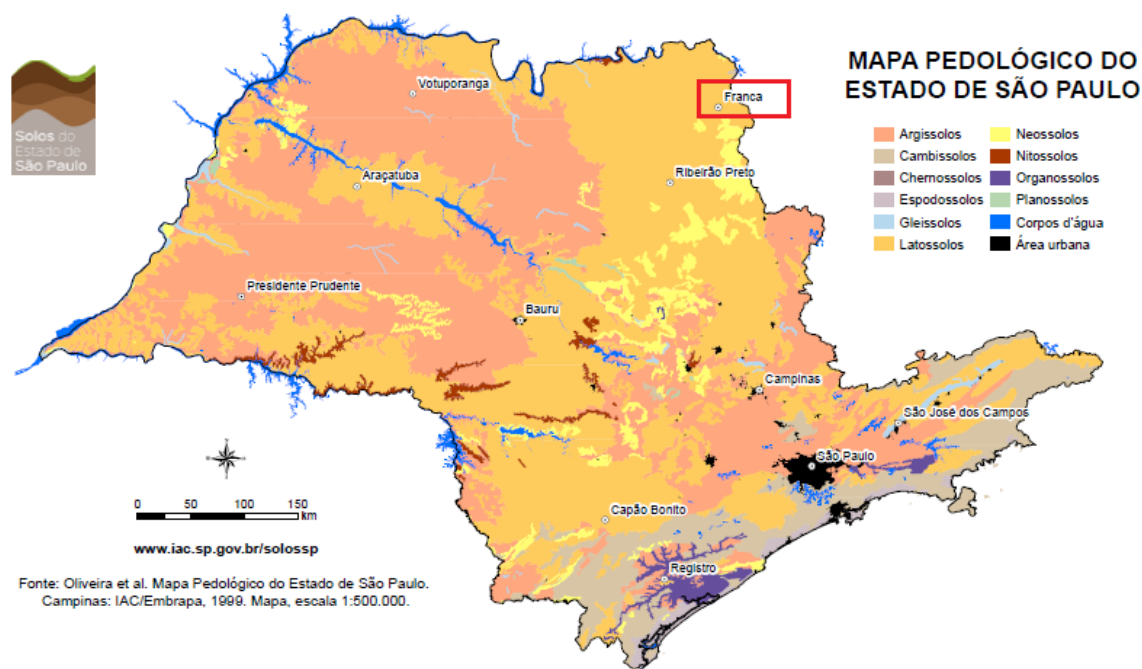


Figura 7 - Mapa pedológico do estado de São Paulo. A cidade de Franca destacada em vermelho.  
Fonte: Oliveira et al. (1999).

O solo da área é classificado, segundo o mapa de solos do estado de São Paulo (Figura 7), como latossolo vermelho (OLIVEIRA et al., 1999). Esse tipo de solo é resultado de intemperismo do basalto, possui grandes teores de Fe e Al, é capaz de armazenar muita umidade, tem boa drenagem, boa porosidade e grande espessura, principalmente no horizonte B. Esse solo se mostra muito importante para o desenvolvimento agrícola da região, já que possui várias propriedades químicas e físicas que o torna fértil e apropriado para o cultivo (SOUSA & LOBATO, 2005). Em algumas áreas é possível encontrar um solo mais arenoso chamado de Neossolo. Esse tipo de solo é derivado de depósitos arenosos, tem baixa capacidade agrícola e alta suscetibilidade a erosão (SOUSA & LOBATO, 2005), com ocorrência de voçorocas.

A vegetação do município de Franca é composta por cerrado em áreas de solo mais arenoso, matas latifoliadas e subcadifólias em áreas com relevo mais acidentado e florestas-galeria em áreas com rios ou mais úmidas (ENDRES et al., 2006).

### 3.4 Clima e Hidrografia

O clima da região do município de Franca é temperado e quente, sendo classificado como Cwa na classificação de Köppen-Geiger, ou seja, possui clima mesotérmico com inverno seco e verão quente. A temperatura média é de cerca de

20°C e a precipitação média anual varia entre 1500 mm e 1600 mm. No período seco pode atingir precipitações menores que 20 mm (EMBRAPA, 2020).

Quanto à hidrografia, segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica dos rios Sapucaí Mirim/ Grande (2013), o município se encontra na bacia hidrográfica Sapucaí-Mirim (Figura 8), que tem como maior rio o Sapucaí-Mirim, que não chega até o município de Franca. No total a bacia possui seis rios principais, vários córregos, ribeirões e algumas represas utilizadas em usinas hidrelétricas, resultando em uma área de drenagem de 9.125 km<sup>2</sup>. Sua divisa superior dos limites da bacia é marcada pelo Rio Grande, que também marca a divisa com o estado de Minas Gerais (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016).



Figura 8 - Mapa de localização da UGRHI-08 no estado de São Paulo. Fonte: SigRH (2012).

O município de Franca (área rural e urbana) se encontra entre três sub-bacias (Figura 9): Alto Sapucaí, Médio Sapucaí (principal por abrigar área urbana) e Rio Canoa (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016). Os rios principais encontrados no

município são então: Sapucaí, Rio Canoas e o Ribeirão Pouso Alegre e o Córrego dos Bagres.



Figura 9 - Mapa das sub-bacias hidrográficas da Bacia UGRHI-08. Destacado em vermelho o município de Franca. Fonte: Relatório Técnico 393/08 (MINUTA). Equipe do CPTI/IPT. Franca, SP, Novembro, 2008.

A densidade de rios na região de Franca é mediana como na maioria das sub-bacias que estão incluídas na bacia Sapucaí Mirim/Grande (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016). Os principais rios da bacia confluem para o Rio Grande (GIOMETTI & CARVALHO, 2006).

A área urbana de Franca é cortada por quatro cursos de água menores que atravessam boa extensão da cidade, sendo dois deles localizados nas duas principais avenidas da cidade. Esses são o Córrego dos Bagres e o Córrego Cubatão, e os outros são o Córrego Espreado e o Córrego Coqueiros (GIOMETTI & CARVALHO, 2006). Segundo informações informais da Sabesp de Franca, devido ao fato de apenas cursos pequenos cortarem a cidade todo o abastecimento vem dos rios maiores que se localizam em sua zona rural, sendo eles o Rio Canoas e o Ribeirão Pouso Alegre. Um poço localizado no município vizinho de Restinga (SP) só é utilizado em momentos de maior necessidade de água.

A disponibilidade hídrica superficial da bacia Sapucaí Mirim/Grande é 6.626,36 m<sup>3</sup>/ano.hab o que está dentro do considerado ideal pela UNESCO (2.500

m<sup>3</sup>/ano.hab). A disponibilidade hídrica subterrânea é de 816,95 m<sup>3</sup>/ano.hab. Franca apresenta disponibilidade média per capta classificada como ruim, com menos de 1500 m<sup>3</sup>/ano.hab, sendo o único município nessa situação na região (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016).

Segundo o Comitê de Bacia UGRHI-08 (2016), o índice de qualidade da água (IQA) da maior parte da bacia é classificado como Bom.

A maioria das outorgas no município de Franca são para uso industrial e urbano. A maioria das outorgas subterrâneas se localizam na área urbana e as superficiais em área rural (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016).

#### 4 HIDROGEOLOGIA

Hidrogeologicamente o município de Franca apresenta como principais unidades o Aquífero Franca, o Sistema Aquífero Serra Geral e o Sistema Aquífero Guarani (Figura 10).

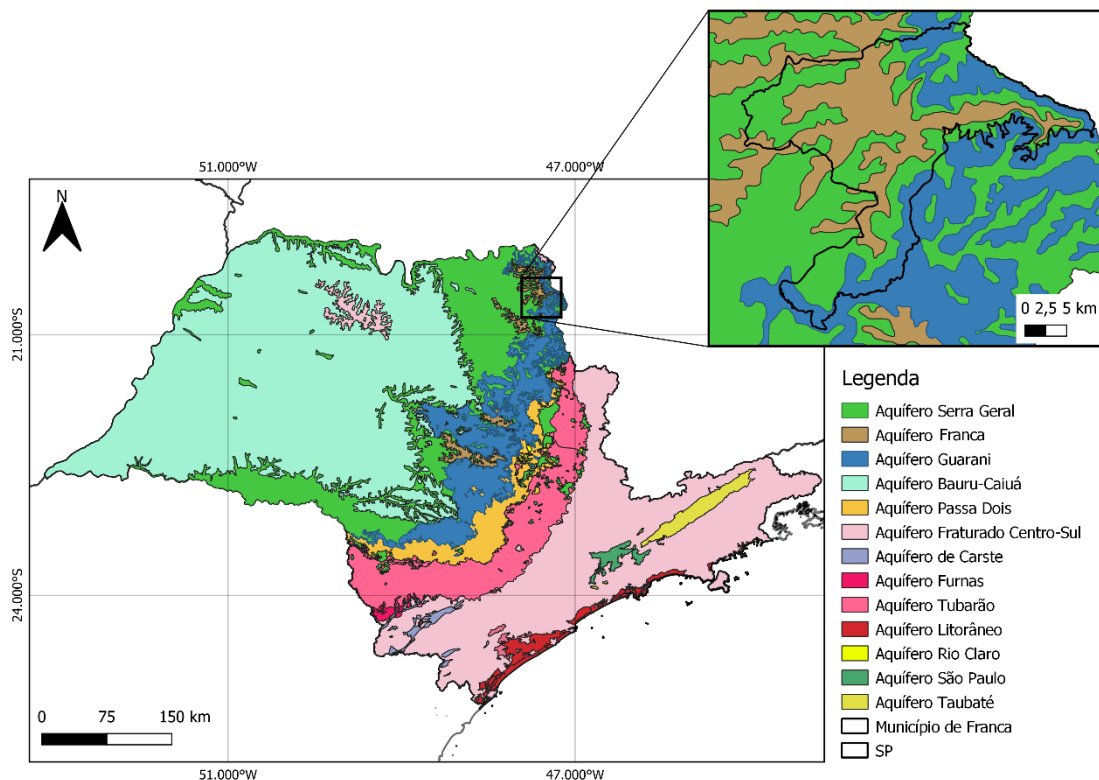


Figura 10 - Aquíferos do estado de São Paulo com zoom na área de estudo. Base de dados: ANA, 2016; IBGE, 2019. Fonte: modificado pela autora.

#### **4.1 Aquífero Franca**

O Aquífero Franca não possui grande extensão e tem suas características variando com as diferentes formas geológicas locais. É explorado com poços muito rasos e de vazão média de 1,6 m<sup>3</sup>/h, porém não são frequentes poços nesse aquífero no município (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016). Com os dados do SIAGAS é observável que espessura desse aquífero varia de cerca de 5m a 40m.

#### **4.2 Sistema Aquífero Serra Geral**

O Sistema Aquífero Serra Geral é um aquífero fraturado, normalmente recoberto por camadas arenosas no estado de São Paulo. O SASG aflora como aquífero livre em uma área de cerca de 31.900 km<sup>2</sup> no estado, e pode ser observado em cidades como Franca, Jaú, Sertãozinho e Ourinhos (CETESB, 2014). É constituído de rochas basálticas, que se formaram durante extenso magmatismo Bacia do Paraná, entre 133 e 132 milhões de anos atrás (ERNESTO et al., 1999). As rochas geradas nesse evento são na maioria basálticas, mas exemplares de rochas mais ácidas são encontrados ao sul da Bacia do Paraná, onde se iniciaram os derrames (NARDY et al., 2002). No estado de São Paulo, a espessura desse pacote de derrames pode chegar a 2.000 m no depocentro magmático, próximo do Pontal do Paranapanema (MILANI, 2004).

O fluxo de água nesse tipo de aquífero ocorre pelas diversas fraturas originadas pelo resfriamento da lava, descontinuidades entre os derrames, ou por fraturas geradas por movimentos tectônicos posteriores. Além dessas estruturas principais, outras feições como amígdalas, vesículas e lentes arenosas podem também contribuir na circulação de água (FERNANDES et al., 2006).

A profundidade dos poços que atingem esse sistema aquífero tende a variar em torno de 150 m. A vazão dos poços no SASG é muito variável devido ao fato de ser muito anisotrópico (FERNANDES et al., 2006).

A água retirada desse aquífero é utilizada em sua maioria para abastecimento privado ou público, nos estados do Sul do país, no Mato Grosso do Sul e em São Paulo. As águas apresentam bom padrão de qualidade, tanto para consumo humano quanto para outros usos (GASTMANS et al., 2017a). Na maioria das vezes a água é classificada como Bicarbonatada Cálcio-Magnésiana, mas também pode ser Bicarbonatada Sódica, Bicarbonatada Cálcica e Bicarbonatada Sódica-Magnésiana.

O pH da água nesse sistema aquífero pode variar entre 5 e 10,8 no Brasil, e no estado de São Paulo normalmente varia de 7,2 a 10,2 (QUAGGIO et al., 2018). Algumas vezes são encontradas anomalias de fluoreto advindo de fluoritas formadas em amígdalas (GIAMPÁ & SOUZA, 1982).

Na área de estudo as águas do SASG possuem de 0.76 mmol L<sup>-1</sup> a 6.75 mmol L<sup>-1</sup> de sólidos dissolvidos, condutividade elétrica que varia entre 27.2 µScm<sup>-1</sup> e 370 µScm<sup>-1</sup>, e pH variando de 5.7 a 9.9. Em relação à composição química, as águas são classificadas como Bicarbonatada Cálcio-Magnesiânica e Bicarbonatada Sódica. A água se encontra na maioria das vezes em um ambiente oxidante; por meio de análise de isótopos, verificou-se que a água de recarga do aquífero provém principalmente de chuvas de verão. A maior parte da água no aquífero possui conteúdo em isótopos semelhante ao das águas de chuva, indicando que há grande entrada de água recente no aquífero (GASTMANS et al., 2016).

O SASG é vulnerável a contaminação devido a maior facilidade de percolação, pelas fraturas e descontinuidades das rochas, de águas contaminadas provenientes da superfície. As contaminações normalmente são causadas por atividades agrícolas, vazamento sanitário e manejo inadequado de resíduos sólidos (QUAGGIO et al., 2018).

Do ponto de vista econômico, o Sistema Aquífero Serra Geral é o que apresenta melhor custo-benefício no estado de São Paulo, devido ao fato de que os furos podem ser de diâmetro pequeno, normalmente entre 150 mm e 200 mm; dispensam, normalmente, colocação de filtros e de pré-filtro; e não são muito profundos (GIAMPÁ & SOUZA, 1982).

Na região de Ribeirão Preto, a Formação Serra Geral tem cerca de 100m de espessura e pode ser dividida em quatro derrames distintos. Cada derrame tem espessura variando entre 45 m e 80 m. São encontradas fraturas horizontais e verticais com espaçamento métrico a decimétrico e disjunções centimétricas. (FERNANDES et al., 2010).

Através dos dados do SIAGAS é possível observar que no município de estudo o SASG possui espessura máxima de cerca de 150m. No basalto são encontrados diversos corpos de arenitos trapezoidais que variam de cerca de 5m até quase 10m.

Normalmente nas faixas de contato entre derrames, predominantemente no topo da camada interior, existem horizontes de vesículas e amígdalas, preenchidas por quartzo, calcita, zeólitas e calcedônia/ágata (FERNANDES et al., 2010). Esse horizonte dificulta a transmissão de tensão, o que faz com que as falhas verticais sejam mais escassas, e predominem fraturas horizontais. Já a camada central possui predomínio de fraturas, ou disjunções verticais, sendo a maioria causada pelo resfriamento do magma. O maior fluxo normalmente se dá em fraturas horizontais. (FERNANDES et al., 2006).

As fraturas encontradas na Formação Serra Geral nessa região costumam apresentar quatro *trends* direcionais principais: N20-40E, N55-N65E, N55-75W, N30-N40W (FERNANDES et al., 2006). Segundo estudos estruturais feitos por Fernandes et al. (2012), é possível distinguir três eventos tectônicos principais de idade terciária e quaternária, responsáveis por gerar essas fraturas, sendo que todos possuem caráter transcorrentes e são verificados em outras regiões do estado de São Paulo. A autora também conclui que a direção de  $\sigma_1$  dos eventos são respectivamente: N45-55E, N60-80W e N15-25E e geraram fraturas subverticais a sub-horizontais. Além desses eventos principais, um outro evento de caráter extensional foi responsável pela geração de fraturas com ângulos intermediários. Em regiões onde os eventos transcorrentes e extensionais se sobrepõem, há uma maior abertura nas fraturas, o que faz com que haja um fluxo de água mais intenso (FERNANDES et al., 2012).

#### **4.3 Sistema Aquífero Guarani**

O Sistema Aquífero Guarani é composto pelas formações Piramboia e Botucatu. Na região de estudo o SAG se apresenta tanto confinado quanto livre (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016). A recarga ocorre na faixa aflorante dessas unidades estratigráficas, e nessa região o aquífero tem cerca de 100 m de espessura. Na área de estudo quando confinado, está recoberto pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral ou por sedimentos da Formação Franca. As espessuras nas partes confinadas são maiores e aumentam para oeste (CETESB, 2014). As cidades da região nordeste do estado de São Paulo que utilizam água subterrânea para abastecimento captam água desse aquífero devido a sua boa qualidade e produtividade (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016).

Hidroquimicamente o SAG tem sua água classificada na região como Bicarbonatada Sódica e Bicarbonatada Cálcica (CONCEIÇÃO et al., 2009; DAEE, 1976).

#### 4.4 Risco de Contaminação

A área de estudo apresenta alto risco de contaminação (Figura 11) devido às atividades ali exercidas. A maior fonte de risco é a indústria de tratamento de couro, que lida com diversos produtos químicos. Além disso, atividade agrícola, usinas alcooleiras e postos de gasolina são outras fontes de risco (COMITÊ DE BACIA UGRHI-08, 2016).

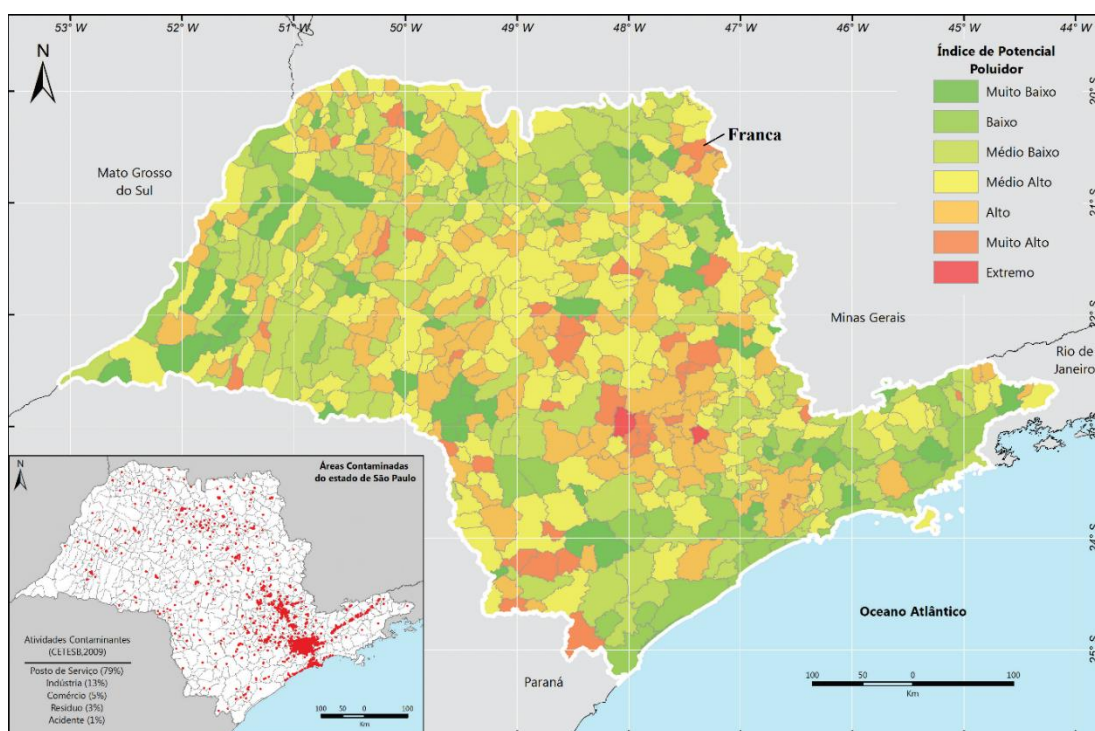


Figura 11 - Mapa do índice de Potencial Poluidor e Áreas Contaminadas do estado de São Paulo. Município de Franca identificado. Fonte: modificado DAEE/LEBAC (2013).

## 5 METODOLOGIA

As metodologias utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho são descritas a seguir. Os dados foram obtidos a partir de bancos de dados abertos à população, pela solicitação de dados via SIC (Sistema Integrado de Informações ao Cidadão) e pela coleta e análise laboratorial de amostras de água.

### **5.1 Dados do SIAGAS e SABESP**

O SIAGAS é um sistema de informações sobre água subterrânea desenvolvido pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM. Foi feito um levantamento de todos os poços cadastrados no município de Franca neste sistema. Foram encontrados 64 poços onde somente 44 possuíam algum tipo de dado. Destes foram obtidos dados sobre vazão, nível freático, litologias e químicos. Esses dados serviram de base para tomada de decisão dos passos seguintes deste estudo, indicando possíveis locais de coleta e quais os aquíferos explorados na área.

Além dos dados dos poços do SIAGAS também foram obtidos, através do Sistema Integrado de Informação do estado de São Paulo (SIC), dados construtivos de um poço localizado na divisa entre o município de Franca e o município de Restinga, usado pela empresa SABESP para o abastecimento público em casos de emergências hídricas. Esses dados foram usados na identificação da estratigrafia local e na definição de topo e base das camadas.

### **5.2 Análise de imagens de satélite e mapas**

Para o estabelecimento dos pontos de coleta de áreas de nascentes e corpos hídricos superficiais foram usados mapas de rios e nascentes fornecidos pelo Comitê de Bacia Sapucaí Mirim/Grande, associados a imagens do satélite Landsat 8, obtidas através do programa Google Earth, na segunda semana de abril de 2020.

As nascentes foram identificadas por meio de fotointerpretação, focando nas características vegetais e de declive que normalmente acompanham as nascentes e drenagens. Foram procuradas áreas que exibissem densa vegetação nativa, com cortes que mostrassem a passagem de drenagem e áreas mais íngremes ou de maior cota local.

A delimitação de áreas para coleta de corpos superficiais foi feita pela identificação de áreas com mata nativa mais densa e rios em imagens de satélites.

Posteriormente, os mapas e dados obtidos foram organizados de forma gráfica para apresentação nesse trabalho utilizando o *software* Qgis.

### **5.3 Coleta de amostras**

Devido à falta de dados completos de análises hidroquímicas dos poços do SIAGAS, se tornou necessária à coleta de águas subterrâneas. Além disso já era

previsto a coleta de águas de nascentes e superficiais. Os prováveis pontos de coletas foram definidos analisando os dados anteriores. Durante o trabalho de campo alguns pontos tiveram que ser modificados. Os 14 pontos finais de coleta são mostrados na Figura 12.

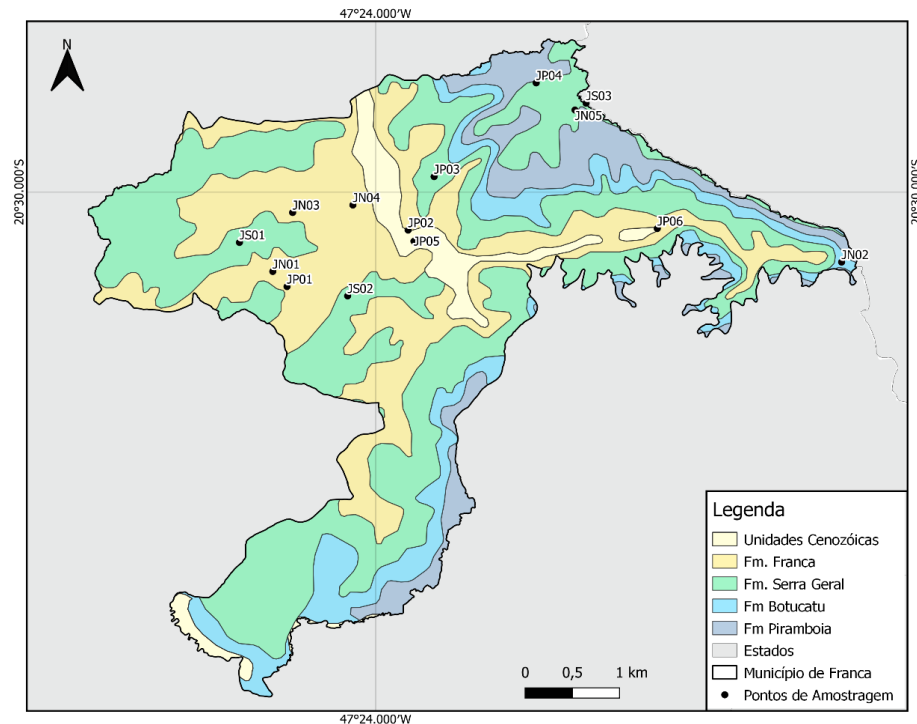


Figura 12 - Mapa de pontos sobre a geologia local. Base de Dados: CPRM, 2003; IBGE, 2019 e dados coletados pela autora. Fonte: modificado pela autora.

Foram coletadas amostras de água para análises químicas (ânions e cátions) e de isótopos. Além disso, em todos os pontos foram medidos: condutividade, pH e temperatura das amostras *in situ*.

Cada amostra consistiu de 2 frascos plásticos de 500 ml de água direto do ponto de coleta, 1 frasco de plástico de 100 ml de água filtrada por bomba de vácuo, 1 tubo plástico de 50 ml com ácido nítrico, também filtrado, e um frasco de vidro âmbar, fechado de forma que não houvesse ar dentro, para análise de isótopos. Todos os recipientes utilizados já haviam sido previamente lavados com água destilada e preparados para coleta; no caso da água filtrada por bomba de vácuo, os frascos foram lavados antes e depois de cada filtração, também com água destilada. Os frascos plásticos foram refrigerados, já o tubo de amostra de água com ácido nítrico e o frasco de vidro âmbar foram mantidos em temperatura ambiente.

Para as medições de condutividade e temperatura foi usado o condutivímetro da Digimed, modelo DM-3P. Já para leitura de pH foi usado o pHmetro da Digimed, modelo DM-2P. Em ambos os casos o processo de medição consistia na coleta de água em copos onde eram mergulhados os eletrodos dos aparelhos, que haviam sido previamente lavados em água destilada e secos. O aparelho fazia a leitura e quando a medição se estabilizava o valor era anotado.

Todos esses processos foram repetidos para os 14 pontos coletados. Algumas especificações de como as amostras foram coletadas são abordadas em seguida.

- Poços

As amostras de poços foram coletadas em área urbana e rural. Em todos os pontos, caso não estivesse ativo, o poço era ligado e somente depois de 15 minutos de fluxo a água era coletada. A amostra era coletada da saída de água do poço ou da saída mais próxima antes da ida para caixa d'água ou qualquer armazenamento que pudesse causar decantação.

- Nascentes

A maioria das nascentes da região são do tipo olho d'água, ou seja, no seu local de exudação não havia grande fluxo, por isso, a coleta foi feita no ponto mais próximo da exudação em que houvesse corrente, mesmo que mínima. Em alguns casos não foi possível a coleta de água mais límpida devido à localização da nascente e uso do local, portanto algumas amostras possuem maior presença de fragmentos vegetais ou sedimento.

- Superficial

No caso das coletas superficiais em rios e córregos, as amostras foram obtidas nas partes com correnteza, a pelo menos 10 cm da margem do rio. Buscou-se sempre coletar amostras de áreas com menor quantidade de sólidos possível.

Após a coleta, as amostras dos frascos plásticos foram encaminhadas para o Laboratório de Hidrogeologia e Hidrogeoquímica – H<sub>2</sub>L, localizado dentro da Unesp Rio Claro. A alcalinidade foi obtida pelo método titulométrico, os íons (F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) foram obtidos por cromatografia de íons, e os cátions (Li, Na, NH<sub>4</sub>, K, Al, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Si, Sn, Sr, V, Zn)

foram medidos por ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometer). As análises de alcalinidade e de cátions foram feitas seguindo a norma SMEWW, com os métodos 2320B e 3120B, respectivamente. Já a análise de íons segue a norma EPA, método 300.0 – 300.1. Os dados obtidos em laboratório são mostrados no ANEXO.

Os dados obtidos foram posteriormente inseridos no programa Diagrammes, oferecido gratuitamente pelo Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (LHA), para a obtenção de diagramas de Piper e Stiff.

Já as amostras dos vidros âmbar, foram encaminhadas para o Laboratório de Isótopos Estáveis do Departamento de Geologia Aplicada, na Unesp Rio Claro. No laboratório foram obtidos os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e de  $\delta^2\text{H}$  através da técnica de Espectroscopia a Laser empregando analisadores de isótopos. Os resultados foram posteriormente plotados em um gráfico com o auxílio do programa Excel, juntamente com os dados da linha meteórica global e a linha meteórica de Rio Claro, retirados da International Atomic Energy Agency (IAEA). Os dados da linha meteórica de Rio Claro são de precipitações de janeiro de 2013 a dezembro de 2018.

#### **5.4 Classificação de Águas: Diagramas de Piper e Stiff**

Os diagramas são muito usados para análise química e classificação das águas. Para tal, dois diagramas principais são utilizados:

- Piper: O diagrama de Piper é baseado em dois diagramas triangulares basais e um losango que combina os dados dos triângulos basais. As formas são subdivididas de modo que cada aresta possui linhas perpendiculares, com variações de 20 em 20, que representam a concentração de um ânion/cátion, dada em porcentagem, e os vértices representam 100% de um ânion/cátions, ou ainda a combinação de dois ou mais. As linhas das concentrações de cada ânion, convergem em um ponto, e isso se repete em cada um dos triângulos. Da reflexão e combinação desses pontos no losango maior se obtém o tipo de química da água (SÁNCHEZ, 2017). A figura 13 ilustra as regiões do diagrama de Piper e os diferentes tipos hidroquímicos.

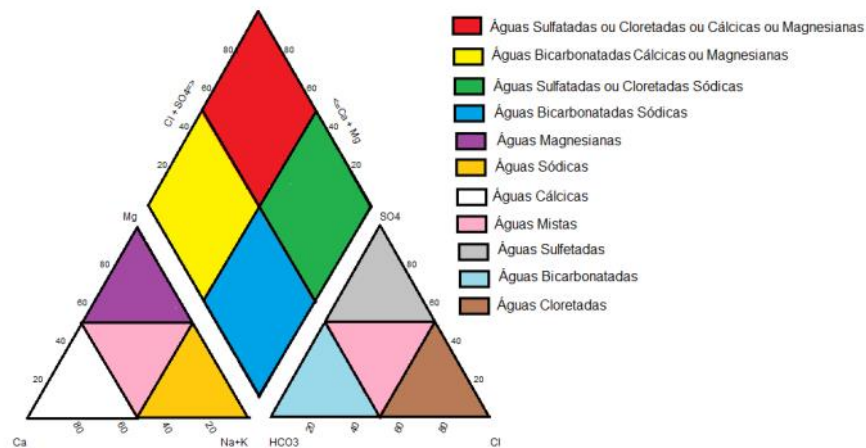


Figura 13 - Tipos químicos de água distribuídos no diagrama de Piper. Fonte: modificado de Fernandes et al. (2013).

- Stiff: O diagrama de Stiff se apresenta como polígonos, sendo um para cada análise, que normalmente são sobrepostos a mapas de forma a mostrar a distribuição geográfica da composição de determinado tipo hidroquímico. Em sua forma simplificada pode ser representada por linhas, em que os extremos serão no lado direito ânions e no lado esquerdo cátions, com escalas arbitrárias, sendo escolhida segundo as maiores concentrações. Cada valor, em meq/L, é representado nessas linhas, e a junção dos pontos gera o polígono (SÁNCHEZ, 2017). Um exemplo é mostrado na figura 14.

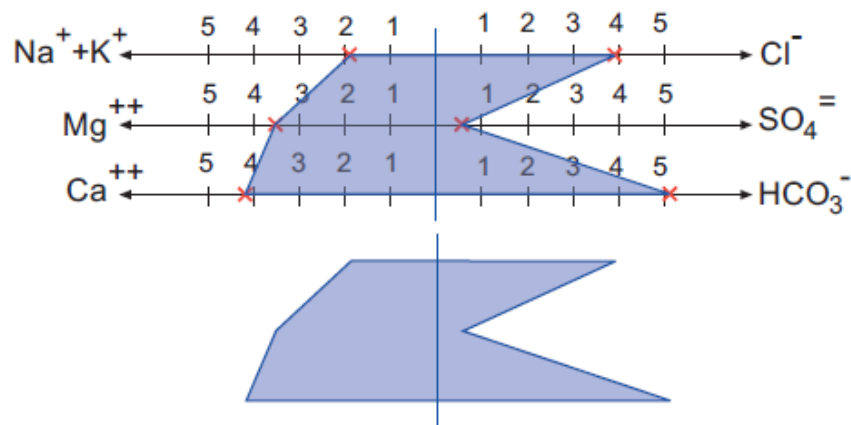


Figura 14 - Diagrama de Stiff. Fonte: Sánchez (2017).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Discussão Dados do SIAGAS

Os poços tendem a variar entre 60 m e 216 m de profundidade e se encontram em cotas variando entre 604 m e 1015 m. As informações obtidas no

SIAGAS nem sempre são completas, o que dificulta interpretações. Com os 44 poços selecionados foi feita uma análise da geologia encontrada no perfil, que serviu para separar os poços nas categorias da tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Quantidade de poços em cada formação geológica.

|                                | <b>Fm. Franca<br/>ou Fm.<br/>Botucatu</b> | <b>Solo + Fm.<br/>Serra Geral</b> | <b>Fm. Serra<br/>Geral com<br/>lentes<br/>areníticas</b> | <b>Fm. Serra<br/>Geral + Fm.<br/>Botucatu</b> |
|--------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Quantidade<br/>de Poços</b> | 8                                         | 27                                | 7                                                        | 2                                             |

A maior parte dos poços possuem somente rochas básicas da Formação Serra Geral, recoberta por uma camada de solo, que pode ser de alteração do basalto (latossolos), ou um solo mais arenoso formado a partir de depósitos recentes. Em alguns poços é possível encontrar lentes de arenito de espessura muito variada, mas sempre de poucos metros. A presença desses arenitos é explicada pela contemporaneidade entre a deposição da Formações Botucatu e o evento magmático Serra Geral, fazendo que entre os intervalos dos pulsos magmáticos fosse possível a deposição de arenitos que posteriormente eram recobertos por um novo pulso e ficavam trapeados. Os poços que perfuram somente a Formação Serra Geral se encontram normalmente em cotas mais elevadas, o que faz sentido quando correlacionado à geologia e ao relevo da área. A cota média desses poços é de 932 m, sendo que existem somente cinco poços com cotas menores de 900 m.

Os poços que não apresentam a Formação Serra Geral são normalmente de cotas mais baixas, sendo constituídos por arenitos da Formação Botucatu, ou apresentam pouca profundidade e consistem na camada deposicional mais superior da região, equivalente à Formação Franca. Como existem poucos exemplares desse tipo de poços e alguns dados estão incompletos, não há muitas análises que possam ser feitas.

Como citado anteriormente, os cadastros no SIAGAS nem sempre são completos, o que faz com que algumas análises fiquem incompletas ou tenham uma

margem de erro maior do que a desejada. Dos 44 poços com dados básicos, 36 deles são na Formação Serra Geral e possuem algum dado sobre testes de bombeamento ou análises químicas. Na tabela 2 são mostrados quantos poços possuem cada tipo de dado.

Tabela 2 - Contabilidade de cada tipo de dado encontrado no SIAGAS

|                        | <b>Somente<br/>Nível<br/>Estático</b> | <b>Somente<br/>Vazão Após<br/>Estabilização</b> | <b>Teste de<br/>Bombeamento<br/>Completo</b> | <b>Análise<br/>Química</b> |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Nº de<br/>Poços</b> | 5                                     | 3                                               | 22                                           | 15                         |

A maior parte dos poços possuem o teste de bombeamento completo, o que é importante para o melhor entendimento do poço e do aquífero. No entanto, muitos dos poços com teste de bombeamento não possuem análise química ou vice-versa.

No caso específico das análises químicas, existe uma variação muito grande dos critérios usados. Muitos poços possuem análises completas dos cátions e ânions, outros possuem análises de elementos específicos, como Fe, NO<sub>3</sub>, Cl, Al e Cr. Essa discrepância nas informações faz com que o uso desses dados seja inviável para o seguimento do trabalho. A maior parte dos dados não se correlaciona e parece que algumas análises foram feitas somente para viabilizar o uso específico da água em alguma atividade produtiva ou lazer.

Com os todos os dados obtidos no SIAGAS, excluindo somente os poços que não possuem a Formação Serra Geral ou que não possuem dados litológicos, verifica-se que o nível estático médio é de 38,43 m, o nível dinâmico médio é de 76,54 m, a vazão específica média é de 0,3239 m<sup>3</sup>/h/m e a vazão estabilizada média é de 6,7872 m<sup>3</sup>/h.

## **6.2 Dados Hidroquímicos – Diagrama de Piper**

Com os dados obtidos, foram construídos diagramas de Piper para a classificação química das amostras. Devido ao fato de terem sido analisados três grupos distintos de água (nascentes, poços e superficiais), serão apresentados três

diagramas individuais, com as amostras de cada grupo específico, e por último um diagrama geral para correlação entre as composições.

As amostras foram designadas pela sigla JN para águas de nascentes (círculos), JP para água dos poços (quadrados) e JS para as águas superficiais (triângulos). Junto à sigla foi adicionado um número para distinção das diferentes amostras dentro de cada grupo. Essas amostras são apresentadas na Figura 15.

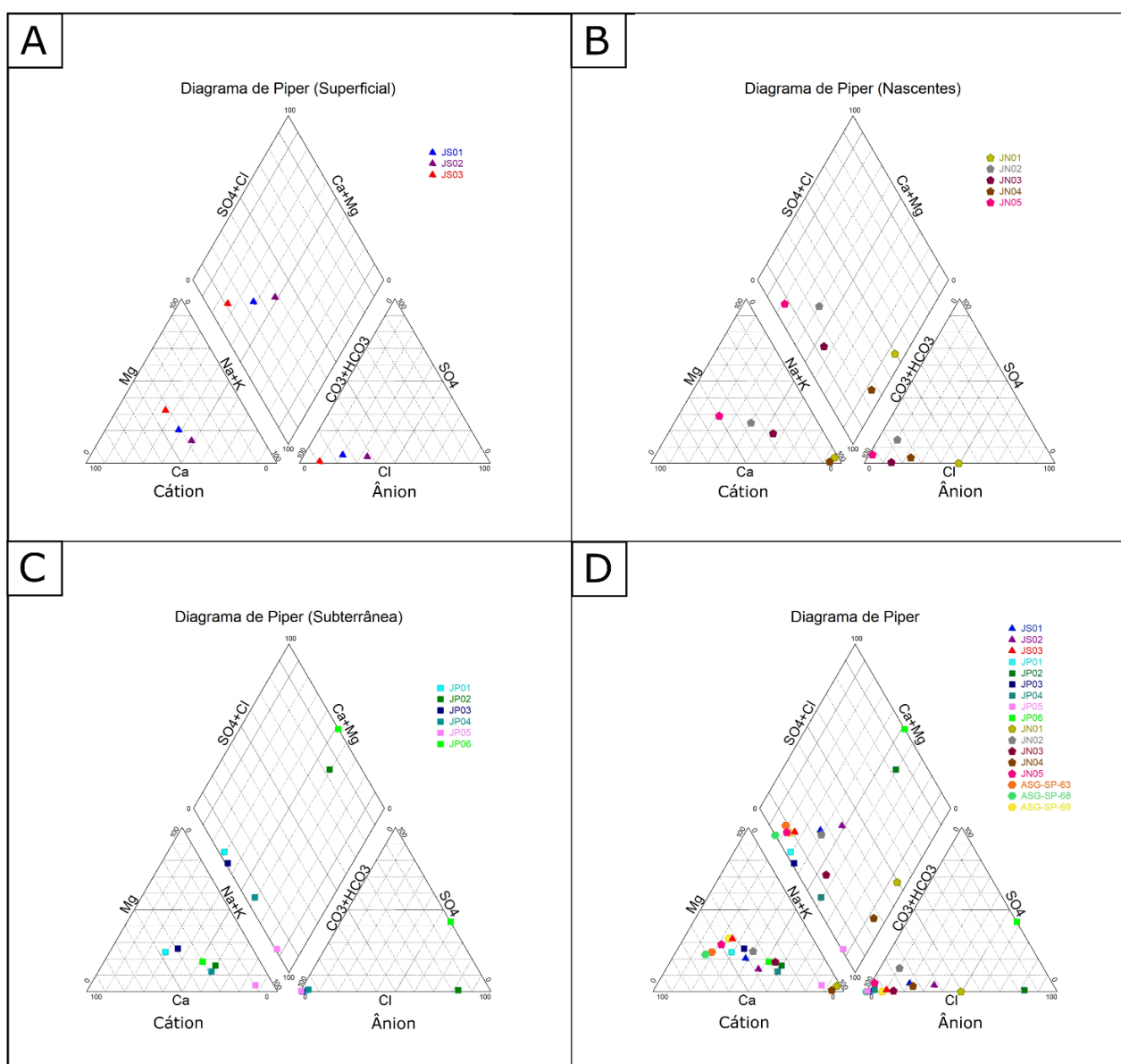


Figura 15 - Diagramas de Piper. A) Água Superficial B) Nascentes C) Água Subterrânea D) Diagrama geral. Fonte: elaborado pela autora.

As amostras de água superficial foram coletadas no Córrego Engenho queimado (JS01), em área urbana do distrito industrial, no Ribeirão dos Bagres (JS02), também em área urbana, e no Rio Canoas (JS03), em área rural. Os pHs

variam de 6 a 7,9 e a condutividade elétrica varia de 42  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 152  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . As águas superficiais foram classificadas, de acordo com o diagrama de Piper, como Bicarbonatadas Cálcio-magnesianas, Figura 15a.

As amostras de nascentes foram coletadas em sua maioria em áreas dentro do perímetro urbano (JN01, JN03 e JN04), motivo pelo qual a vegetação nativa em volta é menor e a influência antrópica, direta. O pH varia de 3 a 6,5 e a condutividade elétrica varia de 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 70  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Duas amostras foram coletadas em áreas rurais (JN02 e JN05), sendo ambas nascentes do Rio Canoas, em diferentes pontos. Pela análise do diagrama, as duas amostras das nascentes do Rio Canoas são Bicarbonatadas Cálcio-magnesianas. As amostras JN03 e JN04 são Bicarbonatadas Sódicas e a JN01 está exatamente na transição entre a Bicarbonatadas Sódicas e Cloretada e/ou Sulfatada Sódica (Figura 15b).

As águas subterrâneas, coletadas em poços, apresentam pH variando de 5 a 6,9 e condutividade elétrica variando muito, de cerca de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  até 160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Os poços se localizam em área urbana ou urbanizada, como bairro de chácaras. Três desses poços em área urbana são mais propícios à contaminação devido a atividade exercida no local: fábrica de manufatura de couro (JP01), lava jato (JP02) e posto de combustível (JP05). Os poços JP03, JP04 e JP06 se localizam em chácaras em diferentes saídas da cidade. As águas dos poços JP01 e JP03 foram classificadas como Bicarbonatadas Cálcio-magnesianas, dos poços JP04 e JP05, como Bicarbonatadas Sódicas, e dos poços JP02 e JP06, como Cloretada e/ou Sulfatada Sódica (Figura 15c).

Na Figura 15d podem ser observados três pontos (ASG-SP-63, ASG-SP-68, ASG-SP-69), retirados de Gastmans (2016), que são os mais próximos da área de estudo, para comparação dos dados.

Nos tópicos mais a frente, será discutido o que essas classificações podem indicar e como as águas podem ser correlacionadas através delas.

### **6.3 Dados Hidroquímicos – Diagrama de Stiff**

Com os dados químicos obtidos também foram gerados diagramas do tipo Stiff. Esses diagramas foram dispostos sobre o mapa da área para melhor compreensão espacial da química da água subterrânea e nascentes (Figura 16).

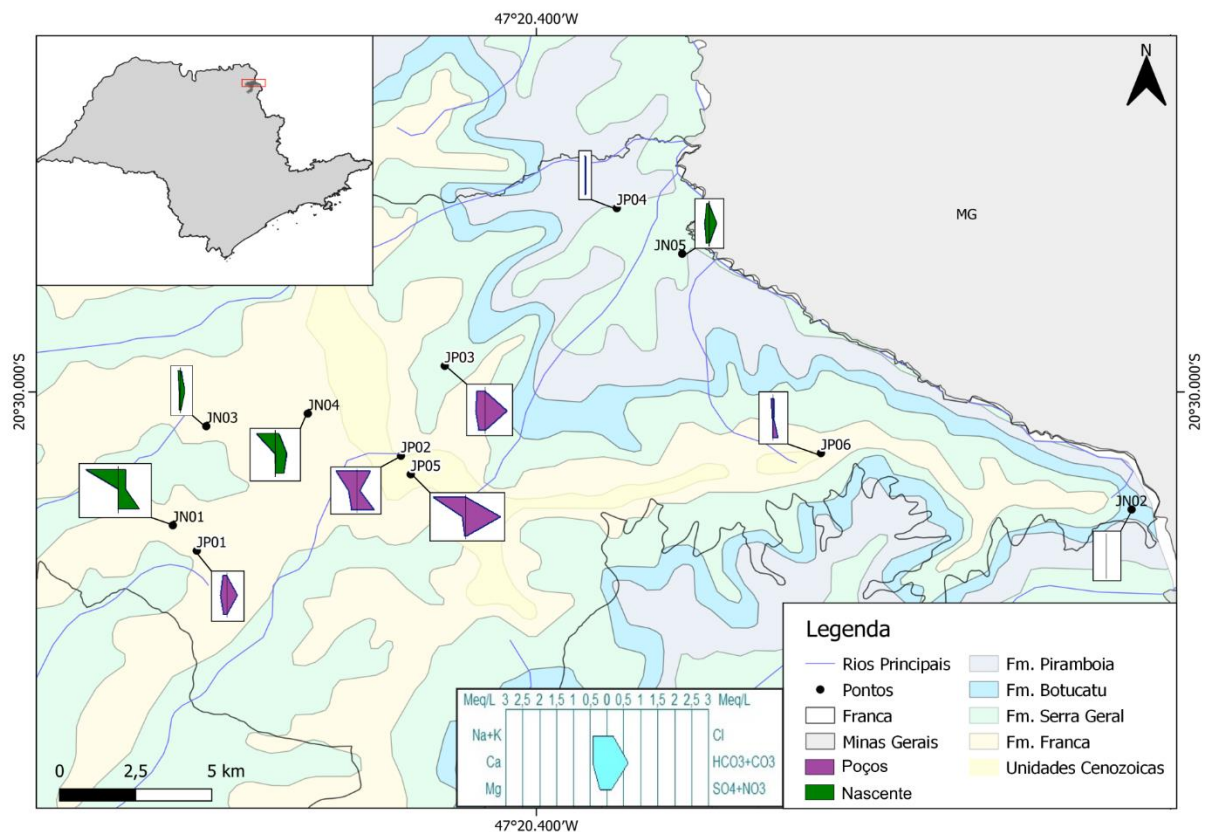


Figura 16 - Mapa de detalhe da área com os diagramas de Stiff plotados em seus respectivos pontos. Fonte: elaborado pela autora.

Observando os diagramas verifica-se que as amostras da porção leste são mais delgadas e, portanto, indicam águas menos mineralizadas. Em contrapartida, os diagramas da porção oeste são mais amplos e indicam águas mais mineralizadas. Nas seções a seguir serão feitas maiores interpretações sobre todos esses dados.

Além disso, é visível que o ponto JP05 possui um diagrama diferente do restante devido a maior presença de  $\text{CO}_3^{2-}$  e Na.

#### 6.4 Interpretação das Classificações – Poços

As análises hidroquímicas podem auxiliar na identificação de qual aquífero está sendo explotado. Cada aquífero possui características químicas específicas, que podem variar entre regiões, mas que tendem a manter certos padrões. Na área de estudo três aquíferos são encontrados, Sistema Aquífero Guarani (SAG), Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o aquífero das unidades mais recentes.

Segundo alguns autores (GASTMANS et al., 2016, 2017a; Giampá & Sousa, 1982; entre outros), as águas do SASG são normalmente classificadas

como Bicarbonatadas cálcio-magnesianas no estado de São Paulo. Porém, são secundariamente encontradas águas classificadas como Bicarbonatadas sódicas, que podem ser geradas devido a processos de interação com a rocha e decomposição de minerais, ou por mistura com águas do SAG, ou por interação da água com arenitos trapeados. As águas do SAG são classificadas na literatura como Bicarbonatadas cálcica e Bicarbonatadas sódica, como citado anteriormente.

Na falta de dados geológicos foi feita a análise de cotas altimétricas para que em conjunto com os dados hidroquímicos a indicação de qual aquífero supre cada ponto de amostragem seja a mais precisa possível. Utilizando o perfil do poço de Restinga, foi definido que a base da Formação Serra Geral está próxima da cota de 437 m. Já com base em um perfil retirado do SIAGAS (JP05), as camadas superficiais (Formação Franca e Depósitos Recentes) têm sua base a cerca de 955 m. Em todos os pontos de coleta a altimetria foi medida e informações da profundidade do poço foi obtida. Assumindo constância na espessura das formações, foi feita uma comparação entre a cota base das unidades e a profundidade que o poço atingia. Caso o poço ultrapassasse a base da Formação Serra Geral, seria assumido que a água era coletada no aquífero inferior (SAG). Os dados altimétricos são apresentados na tabela 3. Um esquema das cotas e poços é apresentado na figura 17.

Tabela 3 - Cotas dos poços e relação das cotas de base com a geologia

| <b>Ponto</b> | <b>Cota na Superfície (m)</b> | <b>Profundidade (m)</b> | <b>Cota de Base do Poço (m)</b> | <b>Formação Geológica da Base</b> |
|--------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| JP01         | 980                           | 150                     | 830                             | Fm. Serra Geral                   |
| JP02         | 1000                          | 15                      | 985                             | Fm. Franca/<br>Unidades Recentes  |
| JP03         | 1005                          | 142                     | 863                             | Fm. Serra Geral                   |
| JP04         | 800                           | 60                      | 740                             | Fm. Serra Geral                   |
| JP05         | 1030                          | 198                     | 832                             | Fm. Serra Geral                   |
| JP06         | 1120                          | 30                      | 1090                            | Fm. Franca/<br>Unidades Recentes  |

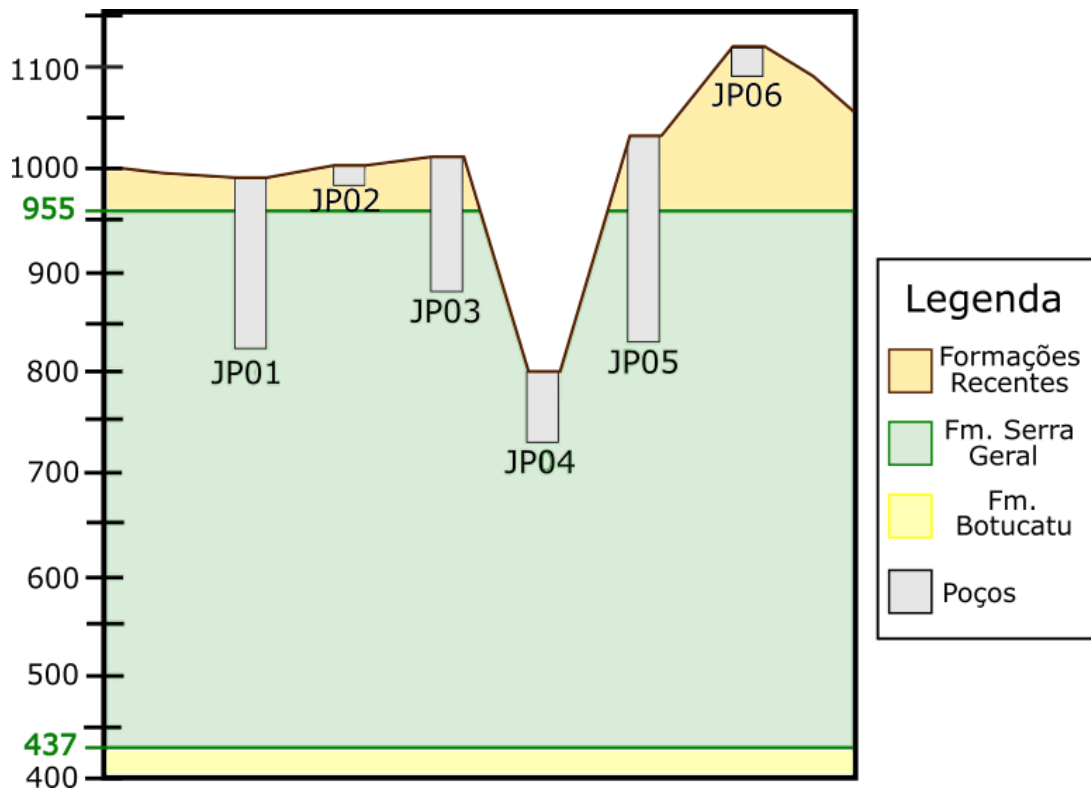


Figura 17 - Esquema de profundidade dos poços e as formações geológicas. Fonte: elaborado pela autora.

Associando-se os fatores hidroquímicos com as altimetrias dos poços, conclui-se que a maior parte dos poços tem sua produção vinda de águas do SASG e, portanto, o aquífero já tem um papel muito importante no abastecimento privado no município.

A confirmação de que a proveniência da água é do SASG pode ser feita comparando amostras JP01 e JP03 com as amostras retiradas de Gastmans et al. (2016), mostrada na figura 15d, que possuem o mesmo tipo químico de água. Somente os pontos JP02 e JP06 coletam água em sedimentos recentes por estarem totalmente em depósitos mais superficiais.

Já nos diagramas de Stiff verifica-se uma maior mineralização nos pontos mais a oeste, o que indica que houve maior tempo de interação entre água-rocha. Nessa linha de pensamento, os diagramas na porção leste são menos mineralizados e, portanto, tiveram menor tempo de interação água-rocha. Essas águas menos mineralizadas indicam a influência de água atmosférica, ou seja, águas mistas. Essa área leste funciona como zona de carga e descarga e por isso tem essa interação com as águas atmosféricas. A partir dessa interpretação do mapa e dos diagramas pode afirmar que o fluxo regional do SASG na área provavelmente vai de Leste

(nordeste) para Oeste (sudoeste). Além disso, ainda pode existir um divisor de águas no centro do município, já que as cotas dessa região são mais altas, isso geraria um fluxo local divergente da área central.

Se considerados os diagramas de Stiff de Gastmans et al. (2016) e os pontos que ficam mais a oeste na área de estudo pode concluir que ocorre realmente maior mineralização para oeste devido a maior largura dos diagramas, evidenciando maior interação entre água-rocha, e fluxo regional indo de leste para oeste (Figura 18).

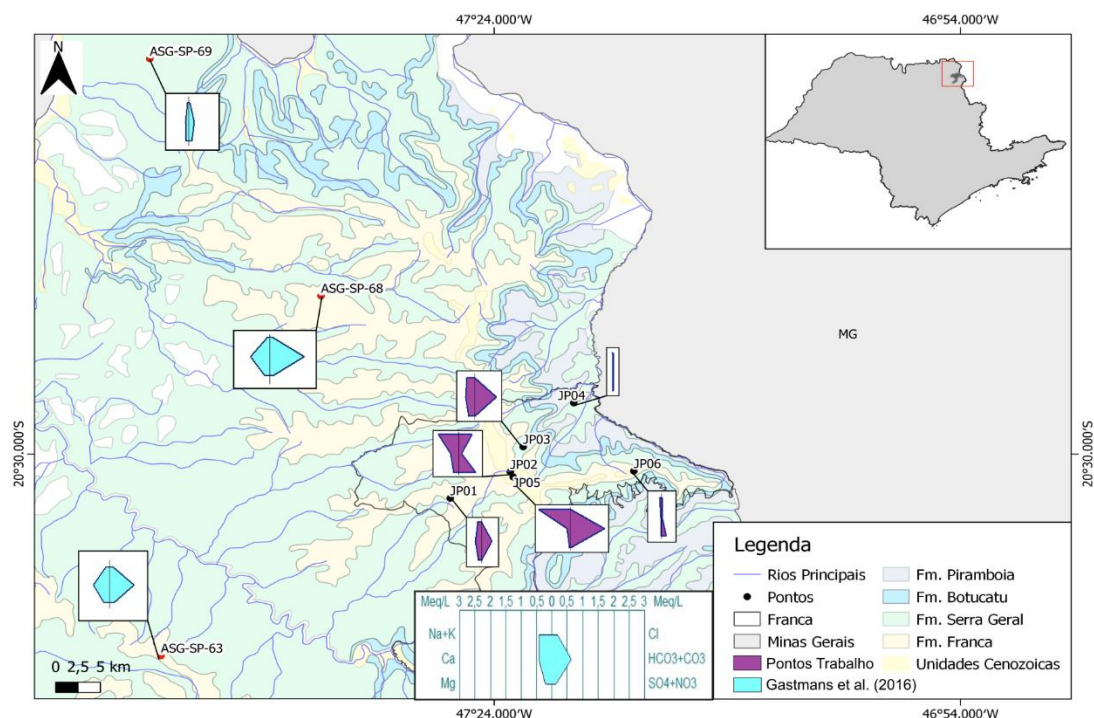


Figura 18 - Mapa com diagramas de Stiff dos pontos do SASG amostrados para o estudo (preenchimento lilás) e os pontos de Gastmans et al. (2016) (preenchimento azul claro). Fonte: Gastmans et al. (2016) e dados da autora.

Com a análise dos diagramas de Stiff também foi possível observar uma diferença química no ponto JP05, que provavelmente é gerado pelas camadas métricas de arenitos trapezados, visíveis no perfil construtivo do poço encontrado no SIAGAS.

## 6.5 Interpretação das Classificações – Nascentes e Águas Superficiais

Comparando o mapa com os diagramas de Stiff e as cotas em que cada nascente foi encontrada pode-se concluir que a maior parte das águas (JN01, JN03, JN05) são muito pouco mineralizadas e se encontram em cotas mais baixas, o que

indica que as águas tiveram pouca interação com a rocha e que provavelmente são de chuvas localizadas nessas regiões mais baixas. A amostra JN02 se encontra em uma cota mais alta, superior a 1.000 m, e também é pouco mineralizada, indicando que é uma nascente de água de chuva que se infiltra somente na parte mais superficial dos sedimentos e logo flui para a superfície, não tendo, portanto, muito tempo de interação água-rocha. Esse ponto reflete o caso mais comum de nascentes com águas recentes. O único ponto que se mostra mais mineralizado, tendo maior tempo de interação água-rocha, foi o JN04. Esse ponto também possui cota superior a 1.000 m, o que, juntamente com a maior mineralização de suas águas, pode indicar que se origina do SASG.

As nascentes JN02 e JN05 apresentam água com o mesmo tipo químico da SASG (Bicarbonatadas Cálcio-magnesianas). Como são nascentes do Rio Canoas, o rio mais importante do município, e as águas desse rio têm esse mesmo tipo químico, pode-se afirmar que provavelmente o SASG é alimentado pela mesma água nessa região, que seria a água de chuva interagindo brevemente com as rochas. Isso pode ser corroborado pela interpretação do fluxo subterrâneo visto na seção anterior, que indica que a área em que essas nascentes estão presentes, constitui uma área de recarga por ter águas menos mineralizadas.

A amostra JN01 está localizada em área urbana, perto da zona industrial e com muita interferência humana. Devido a isso, sua classificação como Cloretada e/ou Sulfatada Sódica, pode ser devido a algum tipo de contaminação.

## **6.6 Dados Isotópicos**

Os dados isotópicos foram plotados em um gráfico juntamente com linhas meteóricas para referência. O gráfico obtido é mostrado na figura 19.

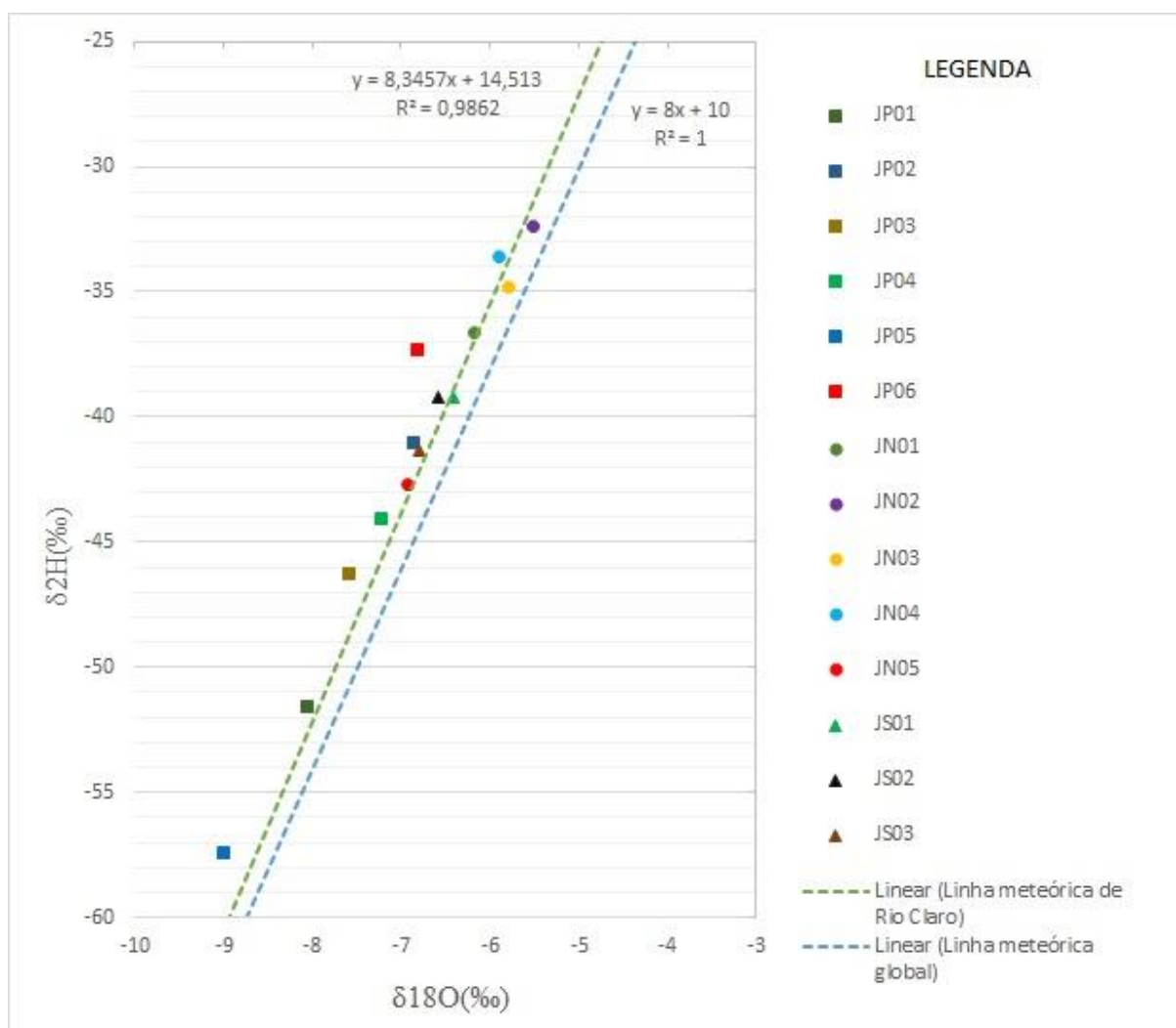


Figura 19: Gráfico com o resultado de isótopos. Todos os pontos do trabalho foram plotados e como referência existem as linhas meteorológicas de Rio Claro (verde) e Global (azul).

É possível observar que os pontos ficam bem próximos das linhas meteorológicas, o que indica que a água meteorica tem grande influência tanto nas águas superficiais quanto nas águas subterrâneas do município. Isso reforça a ideia de parte do município ser uma área de recarga/descarga do SASG e comprova que a água atmosférica alimenta os corpos superficiais e nascentes.

### 6.7 Análise dos Padrões de Consumo do CONAMA e Contaminação

Como um dos intuitos desse estudo é avaliar a qualidade do SASG no município de Franca, de forma que a mesma seja mais usada no abastecimento da cidade, bem como a qualidade da água superficial já usada, as análises químicas obtidas foram comparadas com os padrões de qualidade para consumo humano oferecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na resolução nº 396 de 2008, que trata de água subterrânea e a resolução nº357 de 2005 que trata

de água superficial. Além disso, foi usado os valores máximos de potabilidade encontrados na Consolidação nº5 do Ministério da Saúde.

A resolução CONAMA sobre água superficial divide as águas aptas para uso humano em Classe 1 e Classe 2. As Classe 1 necessitam tratamento antes do uso, porém simplificado. Já as águas da Classe 2 necessitam passar por tratamento convencional, ou seja, um tratamento mais complexo. Ambas foram consideradas na análise.

As resoluções CONAMA e Consolidação nº5 apresentam vários parâmetros usados para constatar a qualidade da água. Por exemplo, o pH deve variar entre 6 e 9,5 para águas subterrâneas e entre 6 e 9 para superficiais nas resoluções. A Tabela 4 apresenta os parâmetros que estão tanto nas resoluções quanto nas análises químicas deste trabalho, juntamente com seu valor máximo permitido.

Tabela 4 - Valor Máximo Permitido

| <b>Parâmetro</b>              | <b>Valor Máximo (mg/L)<br/>CONAMA nº396</b> | <b>Valor Máximo (mg/L)<br/>CONAMA nº357</b> | <b>Valor Máximo<br/>(mg/L) MS<br/>Consolidação nº5</b> |
|-------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| F <sup>-</sup>                | 1,5                                         | 1,4                                         | 1,5                                                    |
| Cl <sup>-</sup>               | 250                                         | 250                                         | 250                                                    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 45                                          | 45                                          | 45                                                     |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 250                                         | 250                                         | 250                                                    |
| Al                            | 0,2                                         | 0,1 – 0,2*                                  | 0,2                                                    |
| Ba                            | 0,7                                         | 0,7 – 1*                                    | 0,7                                                    |
| Be                            | 0,004                                       | 0,04 – 0,1*                                 | -                                                      |
| Cd                            | 0,005                                       | 0,001 – 0,01*                               | 0,005                                                  |
| Co                            | -                                           | 0,05 – 0,2*                                 | -                                                      |
| Cr                            | 0,05                                        | 0,05                                        | 0,05                                                   |
| Cu                            | 2                                           | 0,009 – 0,013*                              | 2                                                      |
| Fe                            | 0,3                                         | 0,3 – 5*                                    | 0,3                                                    |
| Mn                            | 0,1                                         | 0,01 – 0,5*                                 | 0,1                                                    |
| Ni                            | 0,02                                        | 0,025*                                      | 0,07                                                   |
| Zn                            | 5                                           | 0,18 – 5 *                                  | 5                                                      |

\*Valores máximos das águas superficiais das classes 1 e 2, respectivamente.

Esses valores foram comparados com os resultados químicos compilados no ANEXO.

Dentre as amostras analisadas, as JP02, JN01, JN02, JN03, JN05, JS01 e JS02 apresentam alguma irregularidade.

As amostras JP02 e JN01 apresentam valores de nitrato maiores do que os indicados pela resolução CONAMA. No caso da JN01, a água pode ter sido contaminada por efluente sanitário, por estar em área urbana e não ter sua nascente preservada. O poço JP02 se localiza em área urbanizada, de forma que a contaminação provavelmente seja por efluente sanitário. Como comentado anteriormente, a classificação química desses pontos já indicava uma possível degradação, devido à classificação como Cloretada e/ou Sulfatada Sódica. Juntando as análises do tipo químico de água segundo o diagrama de Piper e a discordância com os valores máximos permitidos pelo órgão ambiental, conclui-se que os pontos apresentam algum tipo de contaminação.

As amostras JP02, JN01, JN02, JN03, JS01 apresentam alguns parâmetros (Al, Fe, Mn) acima do valor máximo permitido para potabilidade segundo a Consolidação nº5. Se analisadas com base nos parâmetros de água Classe 1 da CONAMA nº357, todos os citados anteriormente e o ponto JS02, essas águas não poderiam ser usadas, porém, se analisadas como Classe 2, seu uso seria apropriado. Portanto, essas águas necessitam de tratamento antes da distribuição.

## **7 CONCLUSÃO**

De posse dos dados químicos foi possível a geração de algumas informações sobre o SASG e sobre a rede hídrica da região. As águas do SASG na área de estudo são classificadas como Bicarbonatadas cálcio-magnesianas quando interagem somente com rochas básicas, porém, quando há interação com arenitos que estão trapeados, as águas são classificadas como Bicarbonatadas Sódicas, comprovado pelo ponto JP05 que possui grandes camadas de arenito e teve sua água classificada desse modo. Isso ocorre devido à diferença de composição mineralógica entre as rochas que, ao interagir com a água dos aquíferos, libera elementos distintos dos seus diferentes minerais constituintes.

As águas que aqui foram classificadas como Cloretada e/ou Sulfatada Sódica devem vir do aquífero superficial. Esse aquífero é mais raso e poroso, o que aumenta a possibilidade de contaminação antrópica. Sabe-se que a presença de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  pode indicar contaminação, portanto essas águas também poderiam estar contaminadas. Essa hipótese foi confirmada para o ponto JP02, já que além da

presença desses íons indicadores ainda apresenta alto teor de nitrato, o que evidencia contaminação antrópica.

A classificação química das águas de nascentes do Rio Canoas e superficial, associadas às informações químicas das águas do SASG e aos diagramas de Stiff e o gráfico de isótopos, indicam que as nascentes e o SASG são alimentados por águas de chuva que não foram submetidas a longo período de interação água-rocha.

Os diagramas de Stiff mostram que as águas subterrâneas menos mineralizadas na área de estudo estão na mesma porção que as nascentes menos mineralizadas. As águas subterrâneas com menor tempo de interação água-rocha indicam uma zona que funciona tanto como recarga, tanto como descarga devido ao afloramento do aquífero. Nessas áreas onde o aquífero aflora é influência de águas atmosféricas, comprovada pelo gráfico de isótopos, o que faz com que as águas sejam menos mineralizadas devido a mistura. Além disso, as diferenças de mineralização podem indicar que o provável sentido de fluxo regional no SASG é de leste (águas mais recentes) para oeste (águas mais mineralizadas).

Portanto, os rios a região são alimentados por águas de chuvas e do SASG com pouca interação com as rochas do aquífero.

Por fim, as amostras superficiais, quando comparadas com os valores máximos permitidos pelo CONAMA, estão em geral, dentro dos parâmetros de Classe 2. Já quando comparadas com a Consolidação nº5 do Ministério da Saúde, algumas amostras possuem alguns desvios. Isso indica que podem ser usadas para consumo, porém necessitam de certo tratamento para adequação. A comparação também mostra que as águas subterrâneas estão dentro dos padrões exigidos (com exceção do caso de contaminação comentado anteriormente) e podem então ser usadas no consumo.

O trabalho conseguiu mostrar a importância do SASG como alternativa para o abastecimento da população em pequena escala, uma vez que apresenta pouca salinização, graças à grande influência de recarga de água de chuva, o que faz com que o aquífero tenha águas de boa qualidade para consumo. Foi constatado

também que o SASG já vem sendo usado por boa parte dos proprietários de poços do município, comprovando sua eficiência e qualidade.

Pouco conhecimento sobre o SASG é gerado e muito pouco se sabe sobre esse sistema se comparado com sistemas aquíferos como o Guarani. Devido a isso, muito ainda deve ser estudado sobre SASG, principalmente por se tratar de um aquífero fraturado que necessita de estudo mais localizados para melhor compreensão. É importante lembrar que em algumas regiões o SASG pode ser muito importante para exploração, particularmente em tempos de crise hídrica superficial. O maior conhecimento não só o viabiliza, mas também balizaria as regras que devem ser seguidas para que seu uso seja sustentável e não ameace sua perenidade ou funcionalidade. O detalhamento hídrico, tanto de superfície quanto de subsuperfície, é essencial para o manejo do abastecimento público de forma sustentável e consciente.

## REFERÊNCIAS

ABBOTT, B. W, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. **Nature Geoscience**, v. 12, p. 533-540, july 2019.

ALMEIDA, F. F. M. de. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, DNPM, 36 p. **Boletim 241**. 1967.

ALMEIDA, F.F.M. de. O Planalto basáltico da Bacia do Paraná. **Boletim Paulista de Geografia**, n. 24, p. 3-34, 1956.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF. 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 396, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF. 7 abr. 2008. Seção 1, p. 64-68.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017. **Diário oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, n.190, 03 out. 2017.

CABRAL JR.; MOTTA, M.; TANNO, J.F.M.; HELLMEISTER, L.C.JR.; COIMBRA, A.M. Revisão estratigráfica do nordeste do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCIAS BRASILEIRAS, 2, Rio Claro. **Resumos Expandidos**. Rio Claro: UNESP, p.134-136. 1992.

CAETANO-CHANG, M. R. & WU FU TAI. A composição faciológica das formações Pirambóia e Botucatu no centro-oeste paulista e a delimitação do contato entre as unidades. In: 1º Simpósio sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná. Rio Claro, **Resumos:93**. 1993.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS SAPUCAÍ MIRIM/GRANDE - UGRHI-08. Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (Sigrh). **Relatório da situação dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica dos rios Sapucaí Mirim e Grande**. São Paulo, 2016.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS SAPUCAÍ MIRIM/GRANDE. **Relatório de situação dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica dos rios Sapucaí Mirim/Grande**. São Paulo, 2013.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**. 3. ed. São Paulo: Cetesb, 2014. 100 p.

CONCEIÇÃO, F. T.; CUNHA, R.; SARDINHA, D.S.; SOUZA, A.D.G.; SINELLI, O. Hidrogeoquímica Do Aquífero Guarani Na Área Urbana De Ribeirão Preto (SP). **Revista Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 65-77, 2009.

CONANT, B. JR.; ROBINSON, C.E.; HINTON, M.J.; RUSSELL, A.J. A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems. *Journal of Hydrology*, v.574, p. 609-627, 2019.

DAFNY, E.; BURG, A.; GVIRTZMAN, H. Deduction of groundwater flow regime in a basaltic aquifer using geochemical and isotopic data: The Golan Heights, Israel case study. **Journal of Hydrology**, v.330, p.506-524, 2006.

DAVIS, S.N. Porosity and permeability of natural materials. In: **Flow through porous media**. New York: Academic Press, p.54-89, 1969.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE)/ INSTITUTO GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS. LABORATÓRIO DE ESTUDO DE BACIAS (LEBAC). **Águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Diretrizes de Utilização e Proteção**. São Paulo: DAEE/LEBAC, 44p. 2013.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO (DAEE) **Estudos de Água Subterrânea – Regiões Administrativas 7, 8, 9 (Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba)** São Paulo: DAEE. Vol.2, 286p. 1976.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 824p.

EMBRAPA. **Banco de Dados Climáticos do Brasil**: Franca - sp. Franca - SP. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/bdclima/balanco/resultados/sp/312/balanco.html>. Acesso em: 13 ago. 2020.

ENDRES, P. F.; PISSARRA, T.C.T.; BORGES, M.J.; POLITANO, W. Quantificação Das Classes De Erosão Por Tipo De Uso Do Solo No Município De Franca - SP. **Engenharia Agrônômica**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 200-2007, jan. 2006.

ERNESTO, M.; RAPOSO, M.I.B.; MARQUES, L.S.; RENNE, P.R.; DIOGO, L.A.; MIN, A. DE. Paleomagnetism, geochemistry and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the North-eastern Paraná Magmatic Province: tectonic implications. **Journal Of Geodynamics**, v. 28, p. 321-340, 1999.

FARACINI, J. C. B. **Classificação hidroquímica das águas subterrâneas do Aquífero Serra Geral na porção centro norte do Estado de São Paulo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geografia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2013.

FERNANDES, A. J.; NEGRI, F.A.; AZEVEDO SOBRINHO, J. M.; VARNIER, C. Análise de fraturas dos basaltos do Aquífero Serra Geral eo potencial de recarga regional do Sistema Aquífero Guarani. **Boletín Geológico y Minero**, v. 123, n. 3, p. 325-339, 2012.

FERNANDES, A. J.; MALDANER, C.H.; AZEVEDO SOBRINHO, J.M.; PRESSINOTTI, M.M.N.; WAHNFRIED, I. Estratigrafia dos derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto - SP) baseada na geologia física, petrografia e geoquímica. **Geologia USP. Série Científica**, v. 10, n. 2, p. 73-99, 2010.

FERNANDES, A. J.; MALDANER, C.; WAHNFRIED, I.; FERREIRA, L. M. R.; PRESSINOTTI, M.M.N.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; HIRATA, R. Modelo conceitual preliminar de circulação de água subterrânea no Aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. **Águas Subterrâneas**, 2006.

FERNANDES, P.A.M.; ALVES, M.G.; DIAS, J.L.E.F.; SILVA, G.C.J. DIAGNÓSTICO HIDROQUÍMICO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE QUISSAMÃ - RJ. **Ciências Exatas e Engenharia**, Campos dos Goytacazes, v. 6, n. 3, p. 25-41, 2013.

FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, 1979. 604p.

GALLO, G., SINELLI, O. Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas na Região de Ribeirão Preto (SP). **Revista Brasileira de Geociências**, v.10, p. 129-140, 1980.

GASTMANS, D.; HUTCHEON, I.; MENEGÁRIO, A.A.; CHANG, H.K. Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 598-611, 2016.

GASTMANS, D.; MENEGÁRIO, A. A.; HUTCHEON, I. Stable isotopes, carbon-14 and hydrochemical composition from a basaltic aquifer in São Paulo State, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v.76, n.150, 2017a.16p.

GIAMPÁ, C. E. Q.; SOUZA, J. C. de. Potencial Aquífero Dos Basaltos Da Formação Serra Geral No Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, 1982.

GIOMETTI, A. B. R.; CARVALHO, A. V. P. de. **A água em Franca**. Franca: Unesp, 2006.

GLEESON, T.; BEFUS, K.M.; JASECHKO, S.; LUIJENDIJK, E.; CARDENAS, M.B. The global volume and distribution of modern groundwater. **Nature Geoscience**, 2016.

GLEESON, T. et al. Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. **Water Resources Research**, 2020.

GONÇALVES, N. M. M. **Transformações mineralógicas e estruturais relacionadas a alteração hidrotermal e intempérica de rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná Setentrional (região de Ribeirão Preto – SP, Brasil)**. 1987. São Paulo, 212 p. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências/USP). 1987.

HEARN, Paul P. **Geochemical controls on dissolved sodium in basalt aquifers of the Columbia Plateau, Washington**. US Department of the Interior, Geological Survey, 1985.

HELLMEISTER Jr, Z. **Aspectos geológicos e principais recursos minerais da região de Franca-Pedregulho, nordeste do estado de São Paulo**. 1997. 162 f. Dissertação de Mestrado apresentada ao de Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 1997.

HELM-CLARK, C. M.; RODGERS, D.W.; SMITH, R.P. Borehole geophysical techniques to define stratigraphy, alteration and aquifers in basalt. **Journal of Applied Geophysics**, 55, p. 3-38, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1981. **Inventário cartográfico do estado de São Paulo**. Publicação IPT Nº 1180

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1990a. **Pesquisa de argilas esmectíticas na região de Franca-Pedregulho, SP** (IPT. Rel. 28. 697). 1990.

LANDIM, P.M.B, SOARES, P. C., GAMA, E.G.Jr. Estratigrafia do nordeste da Bacia do Paraná. Curso de Especialização (**Convênio IPT – UNESP**). 1980.

LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. **Boletim FFCHL-USP**. Geologia, v. 103, n. 5, p. 1-103, 1949.

MASSOLI, Marcos. **Caracterização litofaciológica das formações Pirambóia e Botucatu, em superfície, no município de Ribeirão Preto (SP), e sua aplicação na prospecção de águas subterrâneas**. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP, Campus de Rio Claro, p. 175, 2007.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, A. D. R.; BRITONE-VES, B. B. (Ed.) **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 265-279, 2004.

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 69-82, jan./mar. 1994.

NARDY, A. J. R.; SQUISATO, E.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F. Os derrames básicos da borda leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo: considerações preliminares. In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS,. Cabo Frio. **Anais...** São Paulo: SBG, 2005, v. 1, p. 249-254, 2005.

NARDY, A.J.R., OLIVEIRA, M.A.F., BETANCOURT, R.H.S., VERDUGO, D.R.H., MACHADO, F.B. Geologia e Estratigrafia da Formação Serra Geral. **Revista Geociências**, v.21, n.2, p.15–32, 2002.

OLIVEIRA, J. B. de et al. **Mapa pedológico do estado de São Paulo: legenda expandida**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Campinas, SP (Brasil). Centro Nacional de Pesquisa de Solos Instituto Agronômico, Campinas, SP (Brasil), 1999.

QUAGGIO, C. S.; GASTMANS, D.; KIRCHHEIM, R.; BATISTA, L.V. Variações na composição das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral em território brasileiro e sua relação com anomalias hidrogeoquímicas. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 283-294, 2018.

SÁNCHEZ, F. J. **Hidrología Superficial y Subterránea**. Createspace Independent Pub., 2017. 414 p.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da Ufrgs, 2007. Cap. 2. p. 35-51.

SOARES, P.C. **O Mesozóico gonduânico no Estado de São Paulo. Rio Claro-SP**. 152p. (Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Geologia e Mineralogia da FFCL de Rio Claro). 1973.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, Edson. **Areia Quartzosa / Neossolo Quartzarênico**. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01\\_2\\_10112005101955.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_2_10112005101955.html)>. Acesso em: 26 jul. 2020.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Latossolo**. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01\\_96\\_10112005101956.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html)>. Acesso em: 26 jul. 2020.

TANNO, L. C. **Geologia e características tecnológicas das argilas esmectíticas da região de Franca-SP**. 105 f. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 1995.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

UNESCO. Água para todos, água para la vida. Paris, 2003. 36 p.

WOESSNER, W. W. **Groundwater-Surface Water Exchange**. Ontario, Canada: Groundwater Project, 158 p. 2020.

ANEXO

### Resultados das análises químicas

| Ponto | Cond.<br>μS/cm | pH   | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/L | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup><br>mg/L | OH <sup>-</sup><br>mg/L | F <sup>-</sup><br>mg/L | Cl <sup>-</sup><br>mg/L | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup><br>mg/L | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/L | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup><br>mg/L | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>mg/L | Acet.<br>mg/L | Br <sup>-</sup><br>mg/L | Li<br>mg/L | Na<br>mg/L | NH <sub>4</sub><br>mg/L | K<br>mg/L |
|-------|----------------|------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------|
| JS01  | 103            | 7,32 | 39,4                                  | -                                     | -                       | 0,10                   | 6,20                    | 0,25                                 | 7,35                                 | 0,30                                  | 2,05                                  | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 7,48       | 0,15                    | 3,50      |
| JS02  | 124            | 7,86 | 41,6                                  | -                                     | -                       | 0,18                   | 13,1                    | 0,98                                 | 20,0                                 | 0,080                                 | 2,07                                  | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 14,3       | 0,75                    | 4,52      |
| JS03  | 33,7           | 7,30 | 20,7                                  | -                                     | -                       | 0,040                  | 1,35                    | < 0,020                              | 2,22                                 | 0,021                                 | 0,20                                  | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 1,64       | 0,085                   | 1,81      |
| JP01  | 36,1           | 6,85 | 25,8                                  | -                                     | -                       | 0,16                   | 0,37                    | < 0,020                              | 0,24                                 | 1,81                                  | 0,073                                 | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 1,53       | < 0,050                 | 3,35      |
| JP02  | 123            | 5,91 | 6,42                                  | -                                     | -                       | 0,097                  | 18,2                    | < 0,020                              | 42,2                                 | < 0,015                               | 0,28                                  | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 15,7       | < 0,050                 | 5,94      |
| JP03  | 67,4           | 7,18 | 52,5                                  | -                                     | -                       | 0,14                   | 0,32                    | < 0,020                              | 0,42                                 | 1,04                                  | 0,072                                 | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 5,17       | < 0,050                 | 4,34      |
| JP04  | 4,60           | 5,17 | 2,13                                  | -                                     | -                       | 0,013                  | 0,048                   | < 0,020                              | 0,21                                 | < 0,015                               | 0,023                                 | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 0,35       | < 0,050                 | 0,34      |
| JP05  | 100            | 9,09 | 56,0                                  | 12,8                                  | -                       | 0,30                   | 0,23                    | < 0,020                              | 0,12                                 | 0,34                                  | 0,22                                  | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 28         | < 0,050                 | 2,01      |
| JP06  | 23,2           | 4,83 | -                                     | -                                     | -                       | 0,023                  | 0,70                    | < 0,020                              | 8,82                                 | < 0,015                               | 0,70                                  | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 0,99       | < 0,050                 | 1,85      |
| JN01  | 108            | 6,87 | 14,8                                  | -                                     | -                       | < 0,010                | 8,44                    | < 0,020                              | 46,8                                 | 0,43                                  | < 0,020                               | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 26,0       | < 0,050                 | 6,20      |
| JN02  | 25,8           | 5,94 | 13,1                                  | -                                     | -                       | 0,025                  | 1,02                    | 0,074                                | 3,07                                 | 0,40                                  | 1,94                                  | 0,68          | < 0,030                 | < 0,010    | 2,13       | 0,60                    | 2,30      |
| JN03  | 16,2           | 6,22 | 9,69                                  | -                                     | -                       | 0,016                  | 0,92                    | < 0,020                              | 0,10                                 | < 0,015                               | 0,062                                 | < 0,10        | < 0,030                 | < 0,010    | 1,43       | 0,052                   | 1,79      |
| JN04  | 88,0           | 6,43 | 25,3                                  | -                                     | -                       | < 0,010                | 4,54                    | < 0,020                              | 16,7                                 | 0,34                                  | 0,95                                  | 0,72          | < 0,030                 | < 0,010    | 16,5       | 0,21                    | 1,07      |
| JN05  | 22,7           | 6,64 | 17,7                                  | -                                     | -                       | 0,027                  | 0,20                    | < 0,020                              | 0,28                                 | 0,18                                  | 0,77                                  | 0,38          | < 0,030                 | < 0,010    | 1,42       | < 0,050                 | 0,64      |

| Ponto | Al<br>mg/L | Ba<br>mg/L | Be<br>mg/L | Ca<br>mg/L | Cd<br>mg/L | Co<br>mg/L | Cr<br>mg/L | Cu<br>mg/L | Fe<br>mg/L | Mg<br>mg/L | Mn<br>mg/L | Mo<br>mg/L | Ni<br>mg/L | P<br>mg/L | Pb<br>mg/L |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| JS01  | 0,055      | 0,078      | < 0,005    | 8,86       | < 0,005    | < 0,003    | < 0,003    | < 0,004    | 0,32       | 2,65       | 0,053      | < 0,005    | < 0,003    | 0,099     | < 0,005    |
| JS02  | 0,120      | 0,10       | < 0,005    | 11,5       | < 0,005    | < 0,003    | 0,003      | < 0,004    | 0,15       | 2,55       | 0,028      | < 0,005    | < 0,003    | 0,026     | < 0,005    |
| JS03  | 0,018      | 0,046      | < 0,005    | 3,91       | < 0,005    | < 0,003    | < 0,003    | < 0,004    | 0,29       | 1,81       | 0,014      | < 0,005    | < 0,003    | 0,007     | < 0,005    |
| JP01  | 0,019      | 0,025      | < 0,005    | 4,84       | < 0,005    | < 0,003    | 0,007      | < 0,004    | 0,011      | 1,51       | 0,001      | < 0,005    | < 0,003    | 0,59      | < 0,005    |
| JP02  | 0,067      | 0,37       | < 0,005    | 6,96       | < 0,005    | 0,005      | 0,007      | < 0,004    | 0,006      | 2,73       | 0,15       | < 0,005    | 0,015      | < 0,005   | < 0,005    |
| JP03  | 0,019      | 0,13       | < 0,005    | 7,57       | < 0,005    | < 0,003    | 0,005      | < 0,004    | < 0,005    | 3,10       | 0,002      | < 0,005    | < 0,003    | 0,34      | < 0,005    |
| JP04  | < 0,005    | 0,012      | < 0,005    | 0,23       | < 0,005    | < 0,003    | < 0,003    | 0,004      | 0,089      | 0,060      | 0,009      | < 0,005    | < 0,003    | < 0,005   | < 0,005    |
| JP05  | 0,030      | 0,039      | < 0,005    | 2,81       | < 0,005    | < 0,003    | 0,006      | < 0,004    | 0,009      | 0,69       | < 0,001    | < 0,005    | < 0,003    | 0,11      | < 0,005    |
| JP06  | 0,063      | 0,054      | < 0,005    | 1,05       | < 0,005    | < 0,003    | 0,003      | 0,009      | 0,028      | 0,39       | 0,082      | < 0,005    | < 0,003    | < 0,005   | < 0,005    |
| JN01  | 0,033      | 0,042      | < 0,005    | 0,56       | < 0,005    | < 0,003    | < 0,003    | < 0,004    | 0,053      | 0,56       | 0,001      | < 0,005    | < 0,003    | 0,14      | < 0,005    |
| JN02  | 0,410      | 0,17       | < 0,005    | 2,65       | < 0,005    | < 0,003    | 0,003      | < 0,004    | 0,49       | 1,13       | 0,33       | < 0,005    | < 0,003    | 0,13      | < 0,005    |
| JN03  | 0,049      | 0,019      | < 0,005    | 1,06       | < 0,005    | < 0,003    | < 0,003    | < 0,004    | 1,39       | 0,43       | 0,026      | < 0,005    | < 0,003    | < 0,005   | < 0,005    |
| JN04  | 0,036      | 0,076      | < 0,005    | 0,94       | < 0,005    | < 0,003    | < 0,003    | < 0,004    | 0,020      | 0,090      | 0,002      | < 0,005    | < 0,003    | 0,11      | < 0,005    |
| JN05  | 0,030      | 0,079      | < 0,005    | 3,62       | < 0,005    | < 0,003    | < 0,003    | < 0,004    | 0,76       | 1,27       | 0,045      | < 0,005    | < 0,003    | 0,058     | < 0,005    |

| Ponto | Si   | Sn      | Sr      | V       | Zn    |
|-------|------|---------|---------|---------|-------|
|       | mg/L | mg/L    | mg/L    | mg/L    | mg/L  |
| JS01  | 6,81 | < 0,005 | 0,069   | < 0,003 | 0,021 |
| JS02  | 5,14 | < 0,005 | 0,079   | < 0,003 | 0,018 |
| JS03  | 6,94 | < 0,005 | 0,035   | < 0,003 | 0,008 |
| JP01  | 21,7 | < 0,005 | 0,046   | 0,004   | 0,079 |
| JP02  | 5,29 | < 0,005 | 0,096   | < 0,003 | 0,055 |
| JP03  | 20,9 | < 0,005 | 0,084   | 0,010   | 0,020 |
| JP04  | 3,52 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,003 | 0,022 |
| JP05  | 21,7 | < 0,005 | 0,019   | 0,056   | 0,008 |
| JP06  | 3,80 | < 0,005 | 0,010   | < 0,003 | 0,046 |
| JN01  | 2,27 | < 0,005 | 0,006   | < 0,003 | 0,014 |
| JN02  | 4,85 | < 0,005 | 0,028   | 0,003   | 0,16  |
| JN03  | 4,10 | < 0,005 | 0,007   | < 0,003 | 0,018 |
| JN04  | 1,99 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,003 | 0,12  |
| JN05  | 6,78 | < 0,005 | 0,024   | < 0,003 | 0,080 |