

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

*Estudo hidroquímico e radiométrico do
Aquífero Bauru em São José do Rio Preto
(SP)*

Thiago Oliveira Santos

Orientador: Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto

Tese de Doutorado elaborada junto ao
Programa Pós-Graduação em Geologia Regional, para
obtenção do título de Doutor em Geologia Regional.

Rio Claro (SP)
2013

THIAGO OLIVEIRA SANTOS

*Estudo hidroquímico e radiométrico do
Aquífero Bauru em São José do Rio Preto
(SP)*

Tese de Doutorado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em
Geologia Regional.

Comissão Examinadora
Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto
Prof. Dr. Fernando Brenha Ribeiro
Prof. Dr. Francisco Yukio Hiodo
Prof^a.Dr. Maria Margarita Torres Moreno
Prof. Dr. Antonio Roberto Saad

Situação: Aprovado

Rio Claro, SP: 23 de outubro de 2013

**“E ainda se vier noites traiçoeiras,
Se a cruz pesada for, Cristo estará contigo.
O mundo pode até fazer você chorar,
Mas Deus te quer sorrindo.”**

**Aos meus pais Francisco e Francisca,
Aos meus irmãos Amanda e Lucas,
a minha esposa Diana.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Daniel Marcos Bonotto pela orientação e pela dedicação não somente nesta pesquisa, mas durante todo o período que estamos trabalhando juntos.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo financiamento deste trabalho, dando suporte necessário para que essa pesquisa fosse realizada.

Aos meus pais Francisco e Francisca, por terem me dado sempre o suporte e as melhores condições possíveis ao longo da minha vida como estudante e também por sempre estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos Amanda e Lucas, por mesmo longe sempre estarem presente e aguentando os meus dias de humor ruim e pouca paciência.

Aos meus amigos da graduação Henrique Giacomeli, Vítor Barsotti, Paola Arab, por sempre estarem ao meu lado quando mais precisei, pois amigos de verdade, conhecemos no momento de dificuldade.

Ao meu cunhado José Ricardo Melges Bortolin, por ter ajudado na confecção dos mapas e em outras dúvidas que surgiram durante a realização desta pesquisa.

A minha colega de trabalho Juliana, pela ajuda durante os trabalhos de campo.

Ao técnico de laboratório e amigo Bruce Tessari, pela ajuda com os equipamentos e análises químicas durante a realização desta pesquisa.

Ao amigo e professor Edson Gomes de Oliveira (em memória), por ter ajudado na melhora desta tese.

A grande amiga e minha psicóloga Claudia Bianchini, pois se estou aqui hoje, devo muito a todos os seus ensinamentos e as suas várias ajudas.

E deixei por último a pessoa que mesmo sabendo pouco o que é geologia, sempre me incentiva em busca dos meus objetivos, sempre ajudando e preocupada comigo e foi fonte de inspiração da parte mais importante desta pesquisa que foi escrever sobre os resultados, minha flor e amor Diana Moraes Bonafé Santos.

SUMÁRIO

ÍNDICE.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABELAS E ANEXOS.....	VIII
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. CONCEITOS BÁSICOS DE RADIOATIVIDADE.....	3
3. CONCEITOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGIA.....	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
5. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	29
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
7. CONCLUSÕES.....	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
9. ANEXOS.....	96

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
2. CONCEITOS BÁSICOS DE RADIOATIVIDADE.....	3
2.1. Isótopos.....	3
2.2. Radioatividade.....	3
<i>2.2.1. Partículas Alfa.....</i>	<i>4</i>
<i>2.2.2. Partículas Beta.....</i>	<i>5</i>
<i>2.2.3. Radiações Gama.....</i>	<i>5</i>
2.3. Decaimento Radioativo.....	5
<i>2.3.1. Lei do Decaimento Radioativo.....</i>	<i>5</i>
<i>2.3.2. Atividade.....</i>	<i>6</i>
<i>2.3.3. Meia-Vida.....</i>	<i>7</i>
2.4. Séries Radioativas.....	7
2.5. Radônio.....	8
3. CONCEITOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGIA.....	10
3.1. Ciclo Hidrológico.....	11
3.2. Água Subterrânea.....	12
3.3. Aquífero.....	13
<i>3.3.1. Classificação dos Aquíferos Segundo a Pressão da Água.....</i>	<i>13</i>

3.3.1.1. Aquíferos Livres ou Freáticos.....	15
3.3.1.2. Aquíferos Artesianos ou Confinados....	15
3.3.2. <i>Classificação Segundo a Geologia do Material Saturado</i>	15
3.3.2.1. Aquíferos Porosos.....	16
3.3.2.2. Aquíferos Fraturados ou Fissurados.....	16
3.3.2.3. Aquíferos Cársticos.....	17
3.4. Propriedades Hidráulicas do Fluxo Subterrâneo....	17
3.4.1. <i>Porosidade</i>	17
3.4.2. <i>Permeabilidade</i>	18
3.4.3. <i>Transmissividade</i>	19
3.5. Bombeamento de Poço.....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1. Levantamento Bibliográfico e Coleta de Dados Básicos.....	21
4.2. Seleção de Poços.....	22
4.3. Amostragem.....	22
4.4. Análises Físico-Químicas.....	23
4.4.1. <i>Análises de Cátions</i>	23
4.4.2. <i>Análise de Ânions</i>	24
4.4.3. <i>Processamento dos Dados Hidroquímicos</i>	25
4.5. Análises de Radônio/Rádio.....	26
4.5.1. <i>Correção do Decaimento do Radônio</i>	28

4.6. Análise e Tratamento dos Dados Obtidos.....	29
5. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO.	29
5.1. Localização da área e vias de acesso.....	29
5.2. Clima.....	31
5.3. Bacia Hidrográfica.....	32
5.4. Geomorfologia.....	33
5.5. Pedologia e Uso da terra.....	34
5.6. Geologia Regional.....	37
6.1.1. Grupo Bauru.....	37
6.1.1.1. Formação Santo Anastácio.....	41
6.1.1.2. Formação Araçatuba.....	41
6.1.1.3. Formação Adamantina.....	42
5.7. Geologia Estrutural.....	43
5.8. Aspectos Hidrogeológicos Regionais.....	46
5.9. Aspectos Hidrogeoquímicos Regionais.....	51
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
6.1. Características Hidráulicas dos Poços.....	52
6.1.1. Nível Estático.....	54
6.2. Classificação das Águas Subterrâneas.....	59
6.3. Principais Parâmetros Analisados.....	60
6.3.1. pH, Condutividade elétrica e STD.....	61
6.3.2. Carbonatos, Bicarbonatos e Nitrato.....	63

6.3.3. Cloreto e Sulfato.....	64
6.3.4. Cálcio e Magnésio.....	66
6.3.5. Bário e Sódio.....	69
6.3.6. Potássio e Sílica.....	71
6.4. Parâmetros Radiométricos.....	73
6.4.1. Radônio dissolvido na Água Subterrânea.....	75
6.4.2. Rádio dissolvido na Água Subterrânea.....	79
7. CONCLUSÕES.....	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Núcleos e tipos de Radiações.....	4
Figura 2: Séries Radioativas Naturais.....	8
Figura 3: Ciclo da água.....	11
Figura 4: Zonas de ocorrência da água no solo.....	14
Figura 5: Esquema de sistema artesiano.....	15
Figura 6: Tipos de Aquíferos quanto à porosidade.....	17
Figura 7: Exemplos de relação entre a litologia e a permeabilidade das rochas.....	19
Figura 8: Principais expressões relativas aos testes de poços.....	20
Figura 9: Coleta das amostras em campo.....	23
Figura 10: Aparelho DR/2000 para as análises dos cátions e ânions.....	24
Figura 11: Diagrama de Piper com a classificação dos tipos hidroquímicos	26
Figura 12: Aparelho Alpha Guard montado para análise das amostras de água.....	27
Figura 13: Localização e vias de acesso à área de estudo.....	30
Figura 14: Temperatura e Precipitação média.....	31
Figura 15: Mapa Esquemático da Bacia Hidrográfica Turvo/Grande.....	33
Figura 16: Geomorfologia da área de estudo.....	34
Figura 17: Mapa dos solos da região de estudo.....	35
Figura 18: Mapa de uso do solo na região estudada.....	36
Figura 19: Distribuição do Grupo Bauru na área de estudo.....	38
Figura 20: Proposta clássica de subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru.....	39

Figura 21: Mapa de subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru	40
Figura 22: Mapa de contorno estrutural do topo da Formação Serra Geral.....	44
Figura 23: Localização da Depressão Rio Preto	45
Figura 24: Mapa de Localização do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo	46
Figura 25: Subdivisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Bauru	48
Figura 26: Transmissividade do Aquífero Bauru.....	51
Figura 27: Parâmetros hidráulicos dos poços tubulares na área de estudo	53
Figura 28: Mapa de isolinhas da profundidade do nível estático na área urbana do município de São José do Rio Preto – SP.....	56
Figura 29: Diagrama de Piper das 50 amostras analisadas no município de São José do Rio Preto (SP).....	60
Figura 30: Mapa de isovalores e dados estatísticos de pH e Condutividade Elétrica na área de estudo.....	62
Figura 31: Tipo de água de São José do Rio Preto nos poços amostrados.....	63
Figura 32: Mapas de isovalores dos ânions estudados.....	65
Figura 33: Correlações do cátion Ca e os ânions estudados.....	66
Figura 34: Correlações do magnésio e os ânions estudados.....	67
Figura 35: Mapas de isovalores e dados estatísticos dos cátions estudados.....	68
Figura 36: Correlações entre o bário e os ânions estudados na região.....	69
Figura 37: Correlações entre sódio e os ânions estudados.....	70
Figura 38: Correlações entre o potássio e os ânions estudados na região.....	72

Figura 39: Gráfico da concentração de radônio nas amostras analisadas.....	75
Figura 40: Mapa de Isovalores e dados estatísticos de radônio na área estudada.....	77
Figura 41: Correlações entre o radônio e os elementos químicos bário, potássio, magnésio e nitrato.....	78
Figura 42: Correlações entre os constituintes HCO_3^- , Ca, Cl, Si e SO_4^{2-} e o gás radônio.....	79
Figura 43: Dados da concentração atividade do radionuclídeo Ra-226 nas amostras analisadas.....	81
Figura 44: Mapa de isovalores e dados estatísticos para o radionuclídeo Ra-226.....	82
Figura 45: Correlação entre os elementos radônio e rádio na área de estudo.....	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Distribuição da água na Terra.....	12
Tabela 3.4.1: Porosidade total dos sedimentos e rochas sedimentares	18
Tabela 6.1.1: Histograma e dados estatísticos do nível estático.....	54
Tabela 6.4: Valores em Bq/l das 50 amostras de água analisadas para o gás radônio...73	
Tabela 6.4.2: Resultados das 50 amostras para o elemento Ra-226.....	80

ANEXOS

Anexo 1: Dados dos Poços não amostrados no Aquífero Bauru (São José do Rio Preto - SP).....	97
Anexo 2: Dados dos Poços amostrados (RP-1 A RP-50) no Aquífero Bauru (São José do Rio Preto - SP).....	108
Anexo 3: Perfis, Dados geológicos e hidrológicos dos poços amostrados (São José do Rio Preto - SP).....	111

Anexo 4: Mapa de Localização dos Poços e Geológico Simplificado (São José do Rio Preto - SP).....	163
Anexo 5: Mapa Potenciométrico dos Poços do Aquífero Bauru (São José do Rio Preto - SP).....	165
Anexo 6: Resultados das Análises das Amostras de Águas Subterrâneas.....	167
Anexo 7: Diagramas de Stiff das 50 amostras analisadas.....	172
Anexo 8: Dados de Radônio e de Rádio para as 50 amostras analisadas (São José do Rio Preto - SP).....	179
Anexo 9: Dados dos horários da coleta das 50 amostras e horários da medida do gás radônio em laboratório (São José do Rio Preto - SP).....	198

RESUMO

Devido principalmente ao aumento populacional que têm ocorrido nos últimos anos, a demanda de água para o abastecimento público no Estado de São Paulo têm sido cada vez maior. No município de São José do Rio Preto localizado na região noroeste do Estado de São Paulo, cerca de 350 poços, que atingem o Aquífero Bauru, fornecem água para o município, representando aproximadamente 70% do abastecimento local. Neste trabalho, foi quantificado o nível de concentração de radônio e rádio em amostras de águas subterrâneas do aquífero, considerando a inexistência de dados dessa natureza na região e a sua importância para a qualidade da água, do ponto de vista radiológico. Na cidade de São José do Rio Preto, que se localiza geologicamente no Grupo Bauru, foram realizados três trabalhos de campo: a) entre os dias 17 e 19 de janeiro de 2011, b) entre os dias 2 e 3 de agosto de 2011 e c) no dia 30 de novembro de 2011, recolhendo-se 50 amostras de água de poços tubulares profundos. As análises foram realizadas no LABIDRO, usando-se o aparelho Alpha Guard, tendo sido obtidos valores de radônio de 0,699 Bq/l até 14,95 Bq/l, abaixo do limite da OMS que é de 100 Bq/l. Além disto, neste trabalho foi medido o radionuclídeo rádio, que é o elemento precursor do radônio na série de decaimento radioativo do urânio, sendo que os valores deste variaram de 0,07 Bq/l até 0,64 Bq/l, muito abaixo dos valores do radônio. Utilizando as mesmas 50 amostras, foram feitas análises de cátions e ânions a partir das quais foram confeccionados os diagramas de Piper e Stiff, utilizando o software Qualigraf. A avaliação do nível estático, permitiu caracterizar o comportamento do fluxo subterrâneo na área de estudo.

Palavras-chave: radônio; radioatividade; Aquífero Bauru; hidroquímica.

ABSTRACT

Mainly due to population growth, in recent years, the water demand for public supply in São Paulo State has been increasing. In São Jose do Rio Preto city, located in the northwest region of São Paulo, about 350 wells, reaching the Bauru aquifer, provide, about 70% of water city supplying. In this work, it was quantified the radon and radium concentration in groundwater samples from the aquifer, considering the lack of such data in the region and their importance to the water quality, from a radiological point of view. In São Jose do Rio Preto city, which is geologically located in Bauru Group, three field campaigns (17 - 19 January 2011, 2 - 3 August 2011, 30th November 2011, where held 50 water samples from deep tubular wells were taken. The analyzes were performed at LABIDRO using the Alpha Guard equipment, which allowed obtain radon values ranging from 0.699 Bq/l to 14.95 Bq/l, that are below the WHO, guideline value of 100 Bq/l. Furthermore, this study evaluated the radium radionuclide, which is the precursor to radon in the radioactive decay series of uranium, whose values ranged from 0.07 Bq/l to 0.64 Bq/l, well below the radon values. Using the same 50 samples, cations and anions were analyzed and data plotted in the Piper and Stiff diagrams by the Qualigraf software. The static level evaluation, allowed characterize the behavior of the groundwater flow in the study area.

Keywords: radon, radioactive, Bauru aquifer; hydrochemistry.

1. INTRODUÇÃO

O radônio (^{222}Rn) é um gás nobre e raro gerado por decaimentos radioativos na série do ^{238}U . Ele é continuamente produzido no solo pelo decaimento do ^{226}Ra (meia vida $t_{1/2} = 1600$ anos), com o qual entra em equilíbrio secular após aproximadamente 25 dias. O ^{222}Rn produzido, normalmente não se ioniza na água, possuindo, assim, mais mobilidade do que outros elementos da série de decaimento do ^{238}U . Ele é capaz de percolar através do solo e da rocha e dissolver-se na água, da qual é facilmente removido por degaseificação.

Segundo Nelson *et al.* (1983), as concentrações de radônio nas águas variam de 0,37 a 370 Bq/l, em função da concentração média de urânio, que é uma característica da geologia de cada região.

O ^{222}Rn é um emissor alfa com energia de 5,48 MeV, possui uma meia vida de 3,8 dias e constante de decaimento de $0,0001258 \text{ min}^{-1}$. Seu decaimento produz uma série de núclídeos de curta meia vida (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) que decaem para o ^{210}Pb ($t_{1/2} = 21,4$ anos). Dois dos seus filhos, ^{218}Po e ^{214}Po , são emissores alfa (energias de 5,5 e 7,69 MeV, respectivamente). Já o ^{214}Bi e o ^{214}Pb são emissores beta.

Entre os isótopos de radônio conhecidos, o ^{222}Rn é o que apresenta meia vida mais longa, que lhe permite migrar maiores distâncias a partir de sua origem, sendo, por isso, o mais estudado em relação aos demais quando se considera a radioatividade nas águas.

A migração de ^{222}Rn ocorre principalmente por difusão através dos poros das rochas e dos solos, falhas e fissuras, bem como por dissolução nas águas subterrâneas e superficiais, verificando-se sua incorporação na fase líquida quando ela percola a fase sólida portadora de ^{226}Ra , com ou sem a presença de ^{238}U . Em algumas fontes de águas subterrâneas associadas com falhas profundas, o radônio dissolvido é liberado para a atmosfera, concomitantemente com a depressurização.

Algumas variáveis físicas como pressão e temperatura influenciam diretamente na concentração de radônio em água. Este gás é extremamente raro e, portanto, é facilmente liberado quando dissolvido em água.

Elevadas concentrações de ^{222}Rn ocorrem em águas subterrâneas que são utilizadas para o uso doméstico, inclusive em zonas rurais. Durante a ingestão do

radônio contido na água, há risco de ocorrer tumores em alguns órgãos internos, primeiramente o estômago. Em aproximadamente 89% dos casos, a inalação do ^{222}Rn causa risco em indivíduos que utilizam água doméstica. Contudo, alguns autores também apontam que não é bem documentado o risco à saúde do radônio contido na água, pois, o ^{222}Rn pode se transferir para o ar, no qual pode estabelecer risco ao indivíduo.

Além de ser preocupante para a saúde humana, o ^{222}Rn constitui um traçador natural de investigações hidrológicas, possibilitando, por exemplo, que se efetue o balanço dinâmico de grandes volumes de águas subterrâneas e a determinação do seu tempo de residência nos aquíferos.

O radônio e seus produtos de decaimento presentes em poços profundos constituem agentes que causam radiação adicional. Esta contribuição tem sido estudada por muitos pesquisadores, resultando na introdução de regras apropriadas para a saúde. Entretanto, no Brasil, relativamente à abundância dos recursos hídricos, é incipiente ou não existem medidas de radônio ou seus produtos de decaimento em águas subterrâneas. Isto é particularmente importante no Aquífero Bauru, já que alguns estudos enfocaram principalmente o Aquífero Guarani (BONOTTO & CAPRIOGLIO, 2002; BONOTTO & ARMADA, 2005).

Devido ao aumento populacional, uma grande parcela do abastecimento de água no município de São José do Rio Preto (SP) ocorre através da exploração de águas subterrâneas do Aquífero Bauru, pois, este apresenta boas características hidrodinâmicas e, geralmente, as águas são de média qualidade para abastecimento público. Não há ainda na região uma avaliação da qualidade radiológica das águas, uma vez que alguns estudos realizados tem focado principalmente a presença de nitrato.

1.1. Objetivos

Os objetivos principais desta tese consistiram em:

⇒ Conduzir estudos hidroquímicos para a caracterização das águas subterrâneas na área de investigação;

⇒ Avaliar a presença de radônio nas águas do Aquífero Bauru ocorrendo no município de São José do Rio Preto. Para tanto, foi monitorado o Rn-222 em poços tubulares que utilizam as águas do aquífero, com o propósito de avaliar a qualidade radiológica das mesmas.

2. CONCEITOS BÁSICOS DE RADIOATIVIDADE

O presente trabalho teve como enfoque principal o estudo do gás radônio, que é formado a partir do decaimento do radionuclídeo U-238. O estudo ocorreu em águas subterrâneas nos poços profundos do Aquífero Bauru, na área urbana e rural da cidade de São José do Rio Preto, Estado de São Paulo. Algumas definições importantes relacionadas com a radioatividade são apresentadas a seguir.

2.1. Isótopos

Na natureza, existem 92 elementos. Cada elemento pode ter quantidades diferentes de nêutrons. Os núcleos com mesmo número de prótons, mas que diferem no número de nêutrons, são denominados isótopos do mesmo elemento. Para determinadas combinações de nêutrons e prótons, o núcleo é estável – nesse caso, são denominados isótopos estáveis. Para outras combinações, o núcleo é instável (isótopos radioativos ou radioisótopos) e emitirá energia na forma de fótons, até atingir a estabilidade.

O urânio, que possui 92 prótons no núcleo, existe na natureza na forma de 3 isótopos, todos instáveis:

- U-234, com 142 nêutrons (em quantidade desprezível);
- U-235, com 143 nêutrons, usado em reatores, depois de enriquecido (0,7%);
- U-238, com 146 nêutrons no núcleo (99,3%).

Nas ciências nucleares, a unidade de energia geralmente utilizada é o elétron-volt (eV). As energias emitidas pelo núcleo são acima de 10 keV, valor que é cerca de bilhões de vezes menor que o das energias com que lidamos no dia-a-dia.

2.2. Radioatividade

Após a descoberta dos raios X, houve uma revolução na Ciência. O físico francês Antoine Henri Becquerel descobriu que o sulfato duplo de potássio e uranila (UO)²⁺ emitiam raios desconhecidos, que impressionavam chapas fotográficas após atravessar o papel negro, os quais foram nomeados, inicialmente, de “raios Becquerel”.

Marie Sklodowska e Pierre Curie, um casal de cientistas interessados pela descoberta de Becquerel, verificaram que todos os compostos que possuíam urânio

tinham a propriedade de emitir esses raios, ficando evidente que ele era o elemento responsável pela emissão dos raios desconhecidos. Assim, o casal nomeou este fenômeno como radioatividade, que significa emitir raios (do latim *radius*) e os elementos que apresentavam essa propriedade, passaram a ser chamados de elementos radioativos. Comprovou-se que um núcleo muito energético, por ter excesso de partículas ou de carga, tende a estabilizar-se, emitindo algumas partículas (Figura 1).

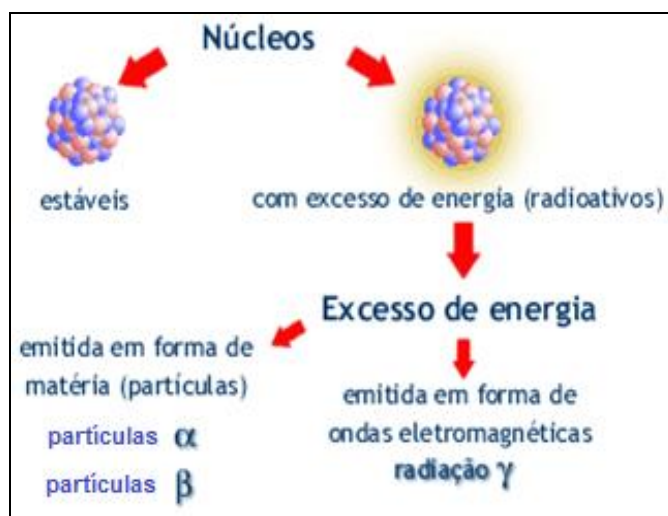
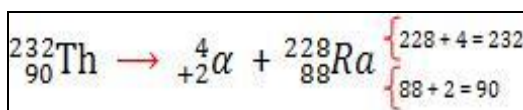


Figura 1: Núcleos e tipos de Radiações (modificado de COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2011).

2.2.1. Partículas Alfa

Núcleos atômicos instáveis, geralmente, de elevada massa atômica, emitem partículas alfa, constituídas por dois prótons e dois nêutrons. Esta é a forma “mais rápida” de procurar a estabilidade, pois, cada partícula alfa tem número de massa igual a 4. Sendo assim, a cada partícula alfa emitida por um núcleo instável, a sua massa diminui de 4 unidades.

A partícula alfa é formada por 2 prótons e 2 nêutrons, portanto nas equações de desintegração pode-se escrever ${}^4_2\alpha$. Para o tório, tem-se:



Assim, os números de massa e as cargas elétricas ficam conservados.

2.2.2. *Partículas Beta*

Outra forma de um núcleo atômico se estabilizar é quando ocorre a transformação de um nêutron em um próton em decorrência da liberação de um elétron pelo núcleo atômico. Ou seja, o núcleo atômico libera, um “elétron”, isto é, uma sub-partícula carregada negativamente, também conhecida como partícula beta, ou beta menos. A partícula β^- , é escrita como: ${}_{-1}^0\beta^-$.

2.2.3. *Radiação Gama*

De uma forma geral, a radiação gama é emitida por um núcleo atômico, quando este emite outros tipos de partículas, sejam elas alfa ou beta. A liberação de radiação gama é uma forma encontrada pelo núcleo para se “estabilizar” quando ocorre a liberação de alguma partícula nuclear, pois, com esta emissão de partícula ainda resta energia em excesso no núcleo atômico, que deve ser liberada. A forma encontrada pelo núcleo para liberar esta energia é a radiação gama, que é uma energia eletromagnética da mesma natureza da luz e das ondas de transmissão de rádio e TV.

2.3. **Decaimento Radioativo**

Em cada emissão de partículas alfa ou beta, há uma variação do número de prótons no núcleo, isto é, o elemento se transforma ou se transmuta em outro, de comportamento químico diferente.

Essa transmutação também é conhecida como desintegração radioativa, designação não muito adequada, porque dá a idéia de desagregação total do átomo e não apenas da perda de sua integridade. Um termo mais apropriado é decaimento radioativo, que sugere a diminuição gradual de massa e atividade.

2.3.1. *Lei do Decaimento Radioativo*

A lei do decaimento radioativo descreve quantos núcleos radioativos existem numa amostra, a partir do número inicial de núcleos radioativos e da taxa de decaimento. É obtida a partir da hipótese de que o número dN de núcleos que decaem

num intervalo de tempo dt é proporcional ao número de núcleos radioativos existentes e ao próprio intervalo dt :

$$dN = -\lambda N dt,$$

Integrando-se a expressão acima se obtém a lei do decaimento radioativo:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Onde $N(t)$ é o número de átomos radioativos no instante t , N_0 é o número de átomos radioativos no instante $t = 0$ e λ é a constante de decaimento do material.

2.3.2. Atividade

A atividade $A(t)$ de uma fonte é a taxa com que os núcleos radioativos decaem, ou seja, o número de desintegrações nucleares dN num intervalo de tempo dt .

$$A(t) = dN(t) / dt$$

Substituindo a expressão para $N(t)$ e fazendo a derivada obtém-se:

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

Onde, $A_0 = \lambda N_0$ é a atividade da fonte no instante $t = 0$.

Em 1977 a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) definiu como unidade padrão de atividade o becquerel (Bq), definido como uma desintegração por segundo ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$).

Anteriormente, a unidade utilizada era o curie (Ci), definida originalmente como a atividade de um grama de rádio, correspondente a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

2.3.3. Meia Vida ($T_{1/2}$)

Meia vida é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzida à metade da atividade inicial. A meia vida não sofre interferências de alterações químicas ou físicas da amostra e está relacionada à constante de decaimento radioativo através de:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

2.4. Séries Radioativas

Na natureza existem elementos radioativos que realizam transmutações ou “desintegrações” sucessivas, até que o núcleo atinja uma configuração estável. Isso significa que, após um decaimento radioativo, o núcleo não possui, ainda, uma organização interna estável e, assim, ele executa outra transmutação para melhorá-la e, ainda não conseguindo, prossegue, até atingir a configuração de equilíbrio.

Em cada decaimento, os núcleos emitem partículas alfa, beta e/ou radiação gama e cada um deles é mais “organizado” que o núcleo anterior. Essas sequências de núcleos são denominadas séries radioativas ou famílias radioativas naturais.

No estudo da radioatividade, constatou-se que existem 3 séries ou famílias radioativas naturais, conhecidas como Série do Urânio, Série do Actínio e Série do Tório.

A Série do Actínio, na realidade, inicia-se com o urânio-235 e tem esse nome, porque se pensava que ela começava pelo actínio-227.

As três séries naturais terminam em isótopos estáveis de chumbo, respectivamente, chumbo-206, chumbo-207 e chumbo-208.

Os principais elementos das 3 séries são apresentados na Figura 2.

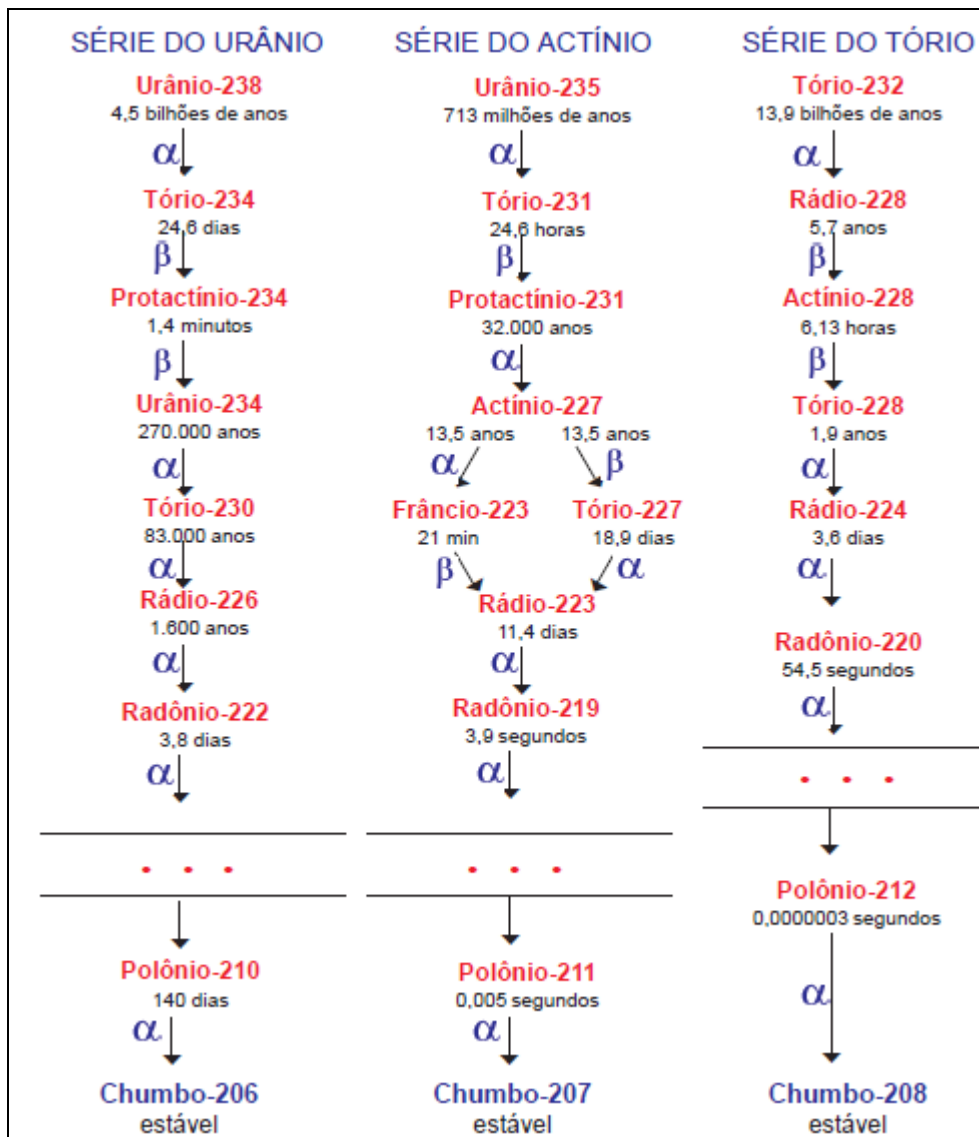


Figura 2: Séries Radioativas Naturais (modificado de COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2011).

2.5. Radônio

A identificação do radônio é um dos casos mais interessantes na história da radioatividade. Um evento essencial para a física nuclear foi a descoberta da transmutação, seguida imediatamente pela formulação da lei do decaimento radioativo. Quando, em 1897, Marie Curie (1867-1934) estudava o tório, ela constatou o fenômeno de que a sua atividade parecia aumentar com o tempo. Ela imaginou que isto correspondia a algum erro experimental e abriu o equipamento, renovou o ar no seu interior e reiniciou as medições. Porém, uma vez mais a atividade aumentava e, devido a imprecisão das medidas, desestimulou-se a prosseguir investigando aquele fenômeno.

Dois anos e meio depois, o problema foi resolvido por Ernest Rutherford (1871-1937) e seus colaboradores. A estranha atividade devia-se a algo que inicialmente Rutherford chamou de emanção do tório. No curso do trabalho, ficou evidente que se tratava de um material gasoso altamente radioativo, liberado espontaneamente pelo tório, rádio e actínio. Foi a primeira observação do fenômeno hoje conhecido como transmutação nuclear (processo pelo qual um material dá origem a outros) e que vinha há muito tempo sendo estudado pelos antigos alquimistas. O urânio, por exemplo, transformava-se em tório, este em rádio, o rádio em radônio e este em polônio, que finalmente se convertia em chumbo.

A identificação precisa do gás que intrigou Rutherford envolveu muitos pesquisadores e anos de intensa pesquisa. Sir William Ramsay (1852-1916) propôs o primeiro nome alternativo para o elemento que ficaria conhecido como radônio. Ramsay recebeu o Nobel de Química em 1904 pela descoberta dos gases nobres. Ramsay e Robert Whytlaw-Gray (1877-1958) mostraram que a emanção tinha peso atômico maior que o do xenônio. Propuseram o nome *nítón* e símbolo Nt para o novo elemento químico. Essa denominação, originada do latim *nitens*, que significa brilho, foi oficializada em 1912, pela Comissão Internacional para Pesos Atômicos.

No entanto, diferentes materiais radioativos liberavam diferentes emanções, e a denominação oficial nem sempre era respeitada. Assim, alguns chamavam de radônio (Rn) a emanção liberada pelo rádio, de torônio (Tn) aquela liberada pelo tório e de actônio (An) a proveniente do actínio. Finalmente, em 1923, mais de uma década após Frederick Soddy (1877-1956) ter descoberto os isótopos, a União Internacional de Química Pura e Aplicada (Iupac, na sigla em inglês) reconheceu que Rn, Tn e An são isótopos de um mesmo elemento químico, ao qual deram a denominação do mais estável – radônio. Tn passou a denominar-se Rn-220 e An transformou-se em Rn-219.

O radônio é o único radionuclídeo na forma gasosa da série de decaimento do Urânio-238, o que lhe confere uma dinâmica diferente em relação a outros elementos radioativos. A geologia é um fator importante no controle da fonte e na distribuição do radônio. Elevados teores de radônio estão relacionados a tipos de rocha como granitos, rochas fosfáticas e argilitos ricos em matéria orgânica. A quantidade de radônio disponível depende do urânio que está presente no local pesquisado.

A liberação do radônio das rochas e solos é controlada por fatores mineralógicos e imperfeições na estrutura cristalina de minerais que contêm urânio. Os solos

geralmente liberam mais radônio do que as rochas, pois, seus constituintes são desagregados com maior facilidade.

Uma vez liberado dos minerais, o radônio é dissolvido na água subterrânea ou ascende até a superfície, através dos poros e fraturas das rochas. A permeabilidade, a porosidade, a natureza do fluido transportador e o clima, são os fatores mais importantes no controle da migração e acumulação do gás radônio, condicionando a mobilidade dos elementos químicos no meio ambiente.

As maiores concentrações de radônio em meio aquoso são observadas em águas subterrâneas, devido à pouca agitação e mistura das mesmas. Nas águas utilizadas para o abastecimento de cidades, sítios e fazendas, o radônio é liberado quando alcança a superfície, por causa do alívio de pressão na saída dos poços tubulares. Portanto, qualquer ser humano que ingerir água com elevados teores de radônio, passa a ficar exposto à radiação, que pode ocasionar sérios danos à saúde.

O radônio liberado da rocha e solo é difundido rapidamente na atmosfera, não ameaçando a saúde pública. Já em locais fechados e pouco ventilados, normalmente os teores deste gás são elevados.

3. CONCEITOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGIA

Cerca de 97%, da água doce disponível para uso da humanidade encontra-se no subsolo, na forma de água subterrânea. No Estado de São Paulo, estima-se que 75% das cidades são abastecidas por poços. Ribeirão Preto é um bom exemplo de uma grande cidade, onde a água subterrânea tem sido bem gerenciada, garantindo o abastecimento de toda a população com uma água de ótima qualidade. Nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul, 90% das cidades são abastecidas por águas subterrâneas.

No geral, consideram-se as seguintes vantagens das águas subterrâneas em relação às águas superficiais:

- São mais protegidas da poluição;
- O custo de sua captação e distribuição é menor. A captação pode ser próxima da área consumidora, o que torna mais barato o processo de distribuição;
- Muitas vezes não precisa de tratamento, o que, além de ser uma grande vantagem econômica, é melhor para a saúde humana;

- Permitem um planeamento modular na oferta de água à população, isto é, mais poços podem ser perfurados à medida que aumenta a necessidade, dispensando grandes investimentos de capital de uma única vez.

3.1. Ciclo Hidrológico

A água no planeta encontra-se nos estados sólido, líquido e gasoso, distribuída em diferentes reservatórios. A água no estado sólido ocorre nas geleiras; na forma gasosa, como vapor, está na atmosfera, em nuvens. Acima da superfície do solo, a água no estado líquido corre em rios, lagos e oceanos. Abaixo da superfície, a água é armazenada nos poros e outras aberturas existentes nas rochas. Além disso, os seres vivos – animais e plantas – também reservam água. No corpo de um adulto, cerca de 60% da massa corporal total é água, podendo variar de 45 a 75%, dependendo da idade e do sexo. No interior das células estão 2/3 dessa água e o restante, no espaço entre elas e na corrente sanguínea.

Estes reservatórios de água estão em permanente intercâmbio e a energia solar é o principal motor desta circulação. Assim, uma molécula de água que formava uma nuvem pode cair na forma de chuva, infiltrar no solo, ser captada por um poço e estar no interior do corpo humano um certo tempo depois. Este movimento da água entre diferentes reservatórios é chamado de ciclo da água (Figura 3).

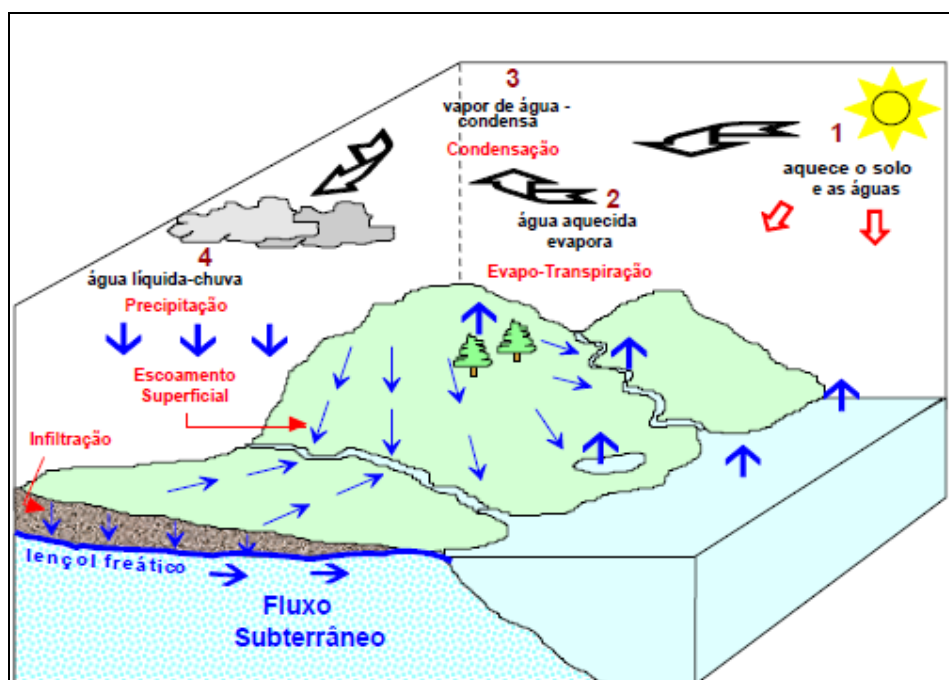


Figura 3: Ciclo da água (modificado de BRAGA, 1999).

De toda a água existente no planeta Terra, somente 2,7% é água doce (Tabela 3.1), e desta, cerca de 98% está na forma de água subterrânea (ZIMBRES, 2000).

Da água que precipita sobre as áreas continentais, calcula-se que a maior parte (60 a 70%) se infiltra, de maneira que a parcela que escoar diretamente para os riachos e rios é pequena (30 a 40%). Quando diminui a infiltração, aumenta o escoamento superficial das águas das chuvas, sendo importante para regularizar a vazão dos rios, distribuindo-a ao longo de todo o ano, evitando, assim, os fluxos repentinos, que provocam inundações.

Tabela 3.1: Distribuição da água na Terra (ZIMBRES, 2000).

Tipo	Ocorrência	Volume (km ³)
Água doce superficial	Rios	1.250
	Lagos	125.000
Água doce subterrânea	Umidade do solo	67.000
	Até 800 metros	4.164.000
	Abaixo de 800 metros	4.164.000
Água doce sólida (gelo)	Geleiras e Glaciais	29.200.000
Água salgada	Oceanos	1.320.000.000
	Lagos e mares salinos	105.000
Vapor de água	Atmosfera	12.900
Total		1.360.000.000

3.2. Água Subterrânea

A água abaixo da superfície do terreno circula nos espaços vazios (poros) ou através de fraturas. Ao se infiltrar no solo, a água da chuva passa por uma porção do terreno chamada de zona não saturada (ZNS) ou zona de aeração, onde os poros são preenchidos parcialmente por água e por ar. Parte da água infiltrada no solo é absorvida pelas raízes das plantas e por outros seres vivos ou evapora e volta para a atmosfera. O restante da água, por ação da gravidade, continua em movimento descendente (Figura 4).

No seu percurso, o excedente de água acumula-se em zonas mais profundas, preenchendo totalmente os poros e formando a zona saturada (ZS). Nas regiões áridas e semiáridas, os processos de evaporação e transpiração prevalecem, dificultando a infiltração da água até a zona de saturação (Figura 4).

O limite entre a zona não saturada e saturada é comumente chamado de lençol freático. Quando se perfura um poço raso, o nível da água observado representa a profundidade do lençol freático naquele ponto, o qual é chamado de nível freático, nível d'água ou nível potenciométrico.

A profundidade do nível d'água pode variar ao longo do ano, pois sofre ação da variação do clima. Assim, em períodos chuvosos, há maior infiltração de água e o nível do lençol freático se eleva. No período de estiagem, com pouca infiltração e maior processo de evapotranspiração, o nível da água pode ficar mais profundo. A água que circula na zona saturada é chamada de água subterrânea.

3.3. Aquífero

Aquífero é um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transferir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos.

Um aquífero pode ter extensão de poucos quilômetros quadrados a milhares de quilômetros quadrados, ou pode, também, apresentar espessuras de poucos metros a centenas de metros (REBOUÇAS *et al.*, 2002). Etimologicamente, aquífero significa: aqui = água; fero = transfere; ou do grego, suporte de água.

3.3.1. Classificação dos Aquíferos Segundo a Pressão da Água

Os aquíferos também podem ser classificados quanto às suas características hidráulicas, em livres ou confinados, dependendo da pressão a que estão submetidos.

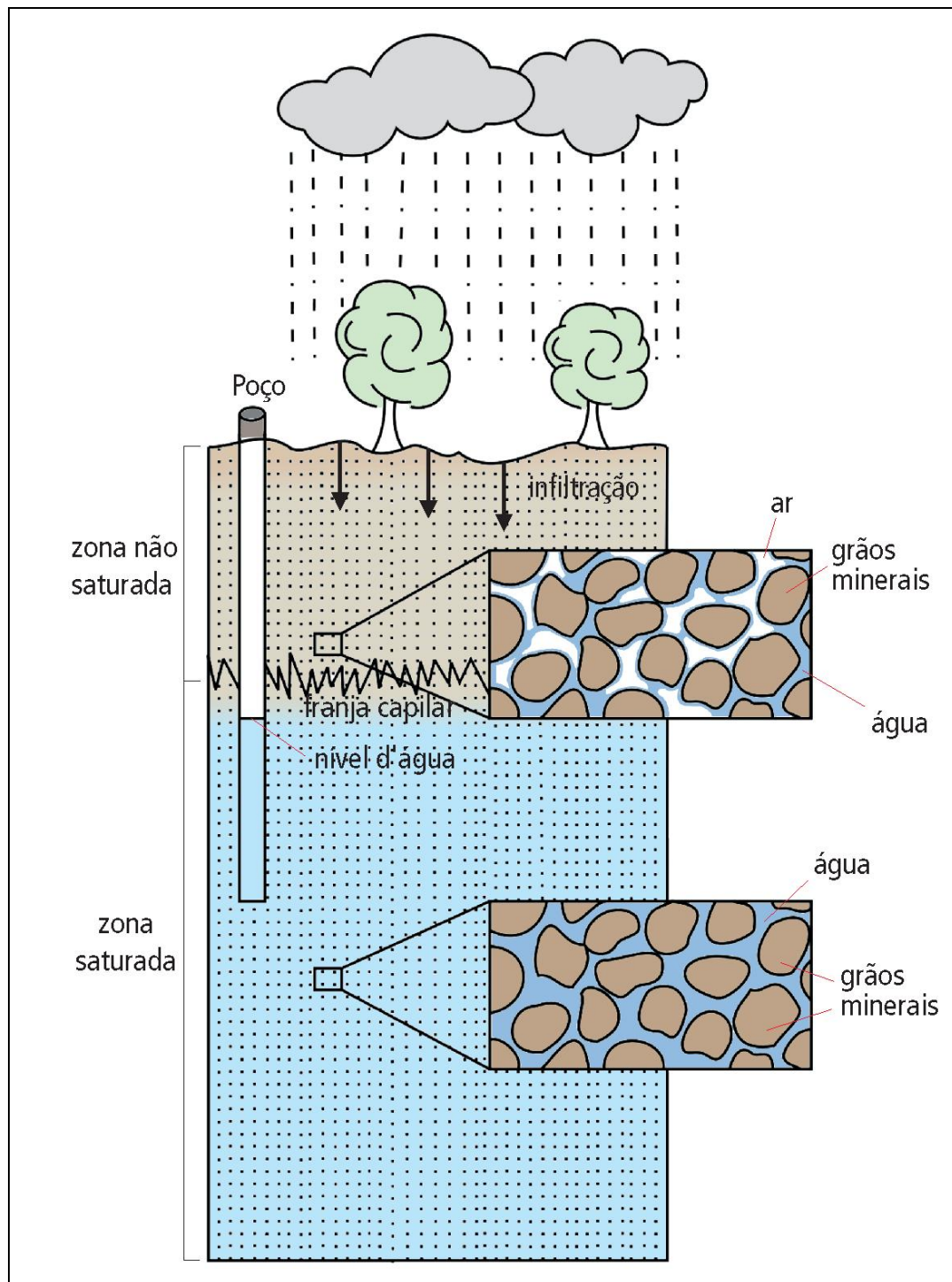


Figura 4: Zonas de ocorrência da água no solo (modificado de DOMENICO & SCHWARTZ, 1998).

3.3.1.1. Aquíferos Livres ou Freáticos

A pressão da água na superfície da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. A Figura 5 esquematiza um aquífero deste tipo. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação.

3.3.1.2. Aquíferos Artesianos ou Confinados

Nestes aquíferos, a camada saturada está confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis, de forma que a pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água percole no poço para além da zona aquífera. Se a pressão for suficientemente forte a água poderá jorrar espontaneamente pela boca do poço. Neste caso, diz-se que temos um poço jorrante.

Há muitas possibilidades geológicas em que a situação de confinamento pode ocorrer. A Figura 5 ilustra o modelo mais clássico, mais comum e mais importante.

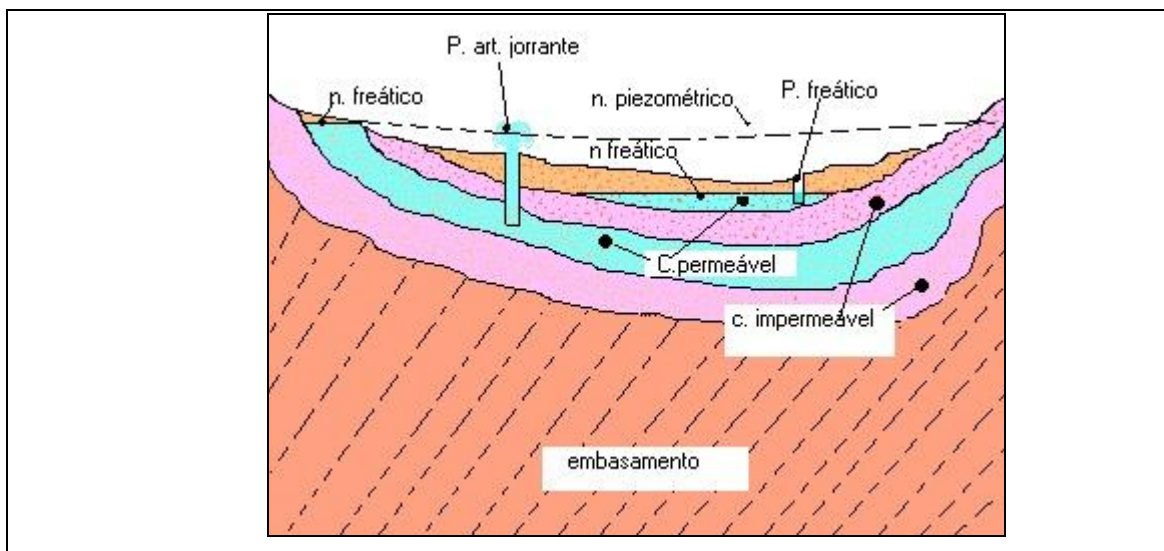


Figura 5: Esquema de sistema artesianos.

3.3.2. Classificação Segundo a Geologia do Material Saturado

Os aquíferos podem ser classificados quanto ao tipo de porosidade da rocha armazenadora em granular, fissural e cárstico.

3.3.2.1. Aquíferos Porosos

Ocorrem em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados e solos arenosos, decompostos *in situ*. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas. Estes aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e em todas as várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos. Uma particularidade deste tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre heterogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática existente. Poços perfurados nestes aquíferos podem fornecer até 500 m³/h de água de boa qualidade (Figura 6).

3.3.2.2. Aquíferos fraturados ou fissurados

Ocorrem em rochas ígneas e metamórficas. A capacidade destas rochas em acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação. No Brasil, a importância destes aquíferos está muito mais em sua localização geográfica, do que na quantidade de água que armazenam. Poços perfurados nestas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora. A possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá, tão somente, de o mesmo interceptar fraturas capazes de conduzir a água. Há casos em que, de dois poços situados a pouca distância um do outro, somente um fornece água, permanecendo o outro seco. Para minimizar o fracasso da perfuração nestes terrenos, faz-se necessário que a locação do poço seja bem estudada por profissional competente que poderá trazer um levantamento geo-estrutural e geofísico detectando o sistema de fraturamento e as fraturas abertas e com água. Nestes aquíferos, a água só pode fluir onde houver fraturas que se comunicam entre si.

Um caso particular de aquífero fraturado é representado pelos derrames de rochas ígneas vulcânicas basálticas, das grandes bacias sedimentares brasileiras. Estas rochas, apesar de ígneas, são capazes de fornecer volumes de água até dez vezes maiores do que a maioria das rochas ígneas e metamórficas (Figura 6). Isso ocorre devido ao sistema de fraturamento e a um fenômeno magmático chamado de basalto vesicular.

3.3.2.3. Aquíferos cársticos

São os aquíferos formados em rochas carbonáticas. Constituem um tipo peculiar de aquífero fraturado onde as fraturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes, criando, neste caso, verdadeiros rios subterrâneos. É comum em regiões com grutas calcárias, ocorrendo em várias partes do Brasil (Figura 6).

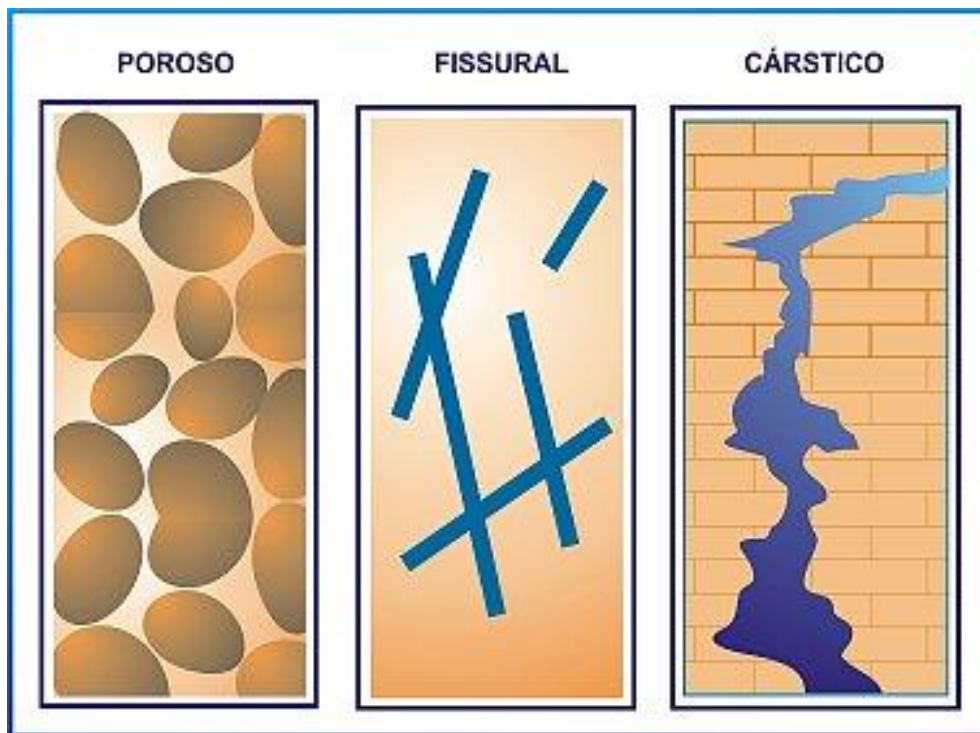


Figura 6: Tipos de Aquíferos quanto à porosidade (BOSCARDIN BORGHETTI, 2004).

3.4. Propriedades Hidráulicas do Fluxo Subterrâneo

3.4.1. Porosidade

A quantidade de água armazenada na rocha depende da sua porosidade, isto é, o volume de poros vazios em relação ao volume total da rocha. Normalmente, depósitos de sedimentos inconsolidados (cascalho, areia, silte e argila), incluindo os solos, apresentam porosidade maior do que as rochas (arenito, calcário, folhelho e rochas fraturadas). A porosidade também tende a ser maior em materiais com pouca variação no tamanho dos grãos, como nas areias uniformes, por exemplo, do que naqueles com

grande variação granulométrica, onde partículas menores se alojam entre grãos maiores (Tabela 3.4.1).

Tabela 3.4.1: Porosidade total dos sedimentos e rochas sedimentares (DOMENICO & SCHWARTZ, 1998).

Sedimentos	Diâmetro da partícula (mm)	Porosidade total dos sedimentos (%)	Rochas sedimentares	Porosidade total das rochas (%)
Cascalho	> 2,0	24 – 38	Arenito	5 – 30
Areia grossa	0,2 – 2,0	31 – 46	Siltito	21 – 41
Areia fina	0,02 – 0,2	26 – 53	Calcário/Dolomito	0 – 40
Silte	0,002 – 0,02	34 – 61	Calcário cárstico	0 – 40
Argila	< 0,002	34 – 60	Folhelho	0 – 10

Classificação segundo Krumbein (1963).

3.4.2. Permeabilidade

A água subterrânea, como um componente do ciclo hidrológico, está em constante circulação e flui, de modo geral, lentamente, através dos poros da rocha. Um dos parâmetros que influencia o fluxo da água subterrânea é a permeabilidade. Esta propriedade indica a facilidade com que a água flui através da rocha e está relacionada com o tamanho e o volume de poros interconectados (transmitindo fluxo), a forma, a distribuição e a variação do tamanho dos grãos (Figura 7).

Quanto mais homogêneos o tamanho e a distribuição dos grãos, maior é a interconexão entre poros e a capacidade do aquífero em transmitir água.

O argilito e o siltito apresentam elevada porosidade (35-60%), porém baixa permeabilidade. Assim, apesar de ter grande capacidade de armazenamento, deste tipo de formação rochosa não é possível extrair água em vazão suficiente para o uso.

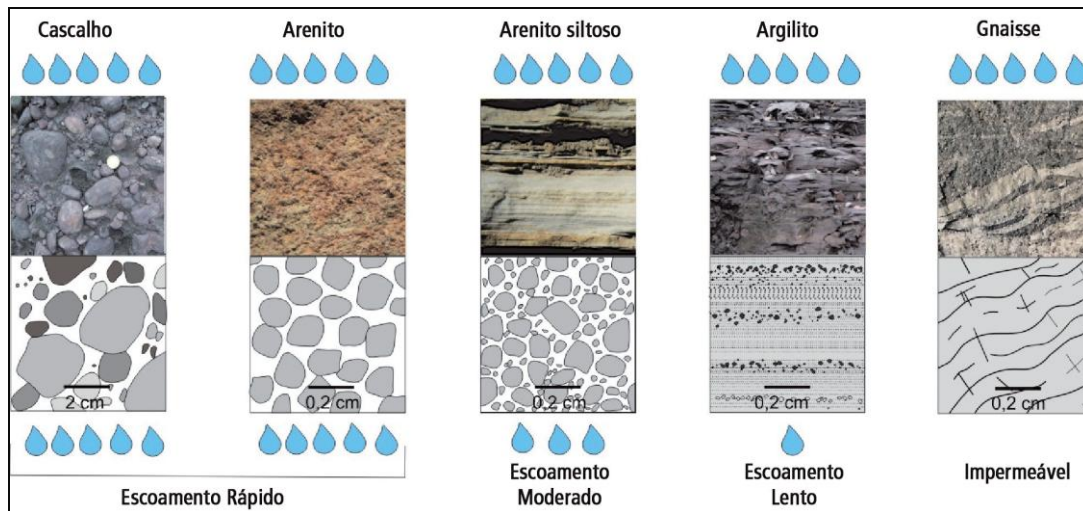


Figura 7: Exemplos de relação entre a litologia e a permeabilidade das rochas (DOMENICO & SCHWARTZ, 1998).

3.4.3. Transmissividade

Heath (1982) definiu transmissividade como a capacidade de um aquífero de transmitir água horizontalmente, com a viscosidade cinemática predominante, por unidade de largura e espessura saturada do aquífero sob um gradiente hidráulico unitário.

A transmissividade (T) é o produto da condutividade hidráulica do aquífero pela sua espessura saturada.

$$T = b \times K$$

Onde: T é a transmissividade (m²/s);

b é a espessura do aquífero (m);

K é a condutividade hidráulica.

3.5. Bombeamento de Poço

O teste de bombeamento é um procedimento que consiste em bombear a água durante, pelo menos 12 horas e medir a sua variação de nível estático (NE) para o nível dinâmico (ND) e, com isso calcular o rebaixamento e a recuperação do poço.

Pode-se fazer esse procedimento bombeando-se um poço e observando-se o comportamento de outros poços ao seu redor, obtendo-se, com isso, o comportamento

do aquífero. É importante o conhecimento do significado das principais expressões relativas aos testes de bombeamento de poços (Figura 8) (CETESB, 1974; FEITOSA *et al.*, 1997; CPRM, 1998a; CPRM, 1998b):

Nível Estático ou Nível Hidrostático (NE) - É o nível no qual a água permanece no poço quando não está sendo extraída do aquífero, quer por bombeamento ou por fluxo livre;

Nível Dinâmico ou Nível Hidrodinâmico (ND) - É o nível em que a água permanece no interior do poço, quando bombeado;

Rebaixamento (S_w) - É a diferença entre o nível estático e o nível dinâmico, ou seja, o quanto o nível da água rebaixou dentro do poço, durante o bombeamento. É medido geralmente em metros;

Abaixamento Residual - Após parar o bombeamento, o nível sobe e aproxima-se do nível estático observado antes do bombeamento. Durante este período de recuperação, a distância que a água permanece abaixo do nível estático inicial é o abaixamento residual;

Vazão do Poço - é o volume de água extraído do poço, na unidade de tempo, por bombeamento ou por fluxo livre.

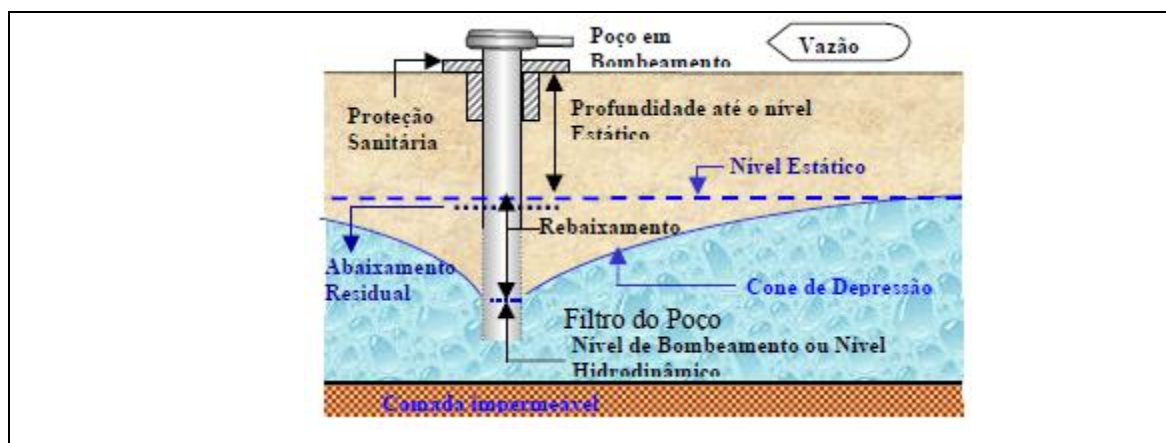


Figura 8: Principais expressões relativas aos testes de poços (LIMA, 2004).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo do gás radônio no Aquífero Bauru, no município de São José do Rio Preto (SP), desenvolveram-se as seguintes etapas: levantamento bibliográfico, coleta de dados básicos, seleção de poços tubulares, coletas de amostras de água utilizando recipientes de plástico (2 litros) e de vidro (1 litro), análises químicas de cátions e ânions, análises radiométricas e tratamento dos dados obtidos.

4.1. Levantamento Bibliográfico e Coleta de Dados Básicos

Efetuiu-se um levantamento bibliográfico e coleta de dados básicos necessários para a realização da pesquisa. Os dados básicos foram obtidos em: trabalhos geológicos e hidrogeológicos realizados na área de estudo, com a utilização do site CPRM-SIAGAS para a obtenção das informações disponíveis sobre os poços estudados. Além disso, foram utilizadas cartas topográficas e geológicas existentes sobre a área de estudo, além dos relatórios do DAEE (1976) e IPT (1996, 2001).

Várias foram as referências bibliográficas utilizadas na presente pesquisa, envolvendo, dentre outros aspectos, os conceitos básicos empregados na geologia, hidrogeologia e nos estudos de radioatividade, como também textos de autores que desenvolveram pesquisa na área de estudo, tanto de caráter geológico como hidrogeológico, em escala regional e local.

Com relação aos conceitos de hidrogeologia, pode-se destacar Custódio e Llamas (1983), CETESB (1994, 2001), DAAE (1976, 1979) e Paula e Silva (2003) dentre outros, que serviram principalmente como base inicial aos fundamentos e conceitos de hidrogeologia aqui utilizados.

No entendimento geológico e hidrogeológico tanto no âmbito regional como local, foram indispensáveis diversos trabalhos de autores como Braga (1999), Zimbres (2000), Domenico e Schwartz (1998), Paula e Silva e Cavaguti (1994) e Paula e Silva (2003) que, além de caracterizarem as propriedades geoquímicas do Sistema Aquífero Bauru, apresentaram aspectos geológicos e hidrogeológicos do Grupo Bauru.

Na evolução do conhecimento geológico de âmbito regional, destacam-se como base da estratigrafia do Grupo Bauru os trabalhos de Mezzalira (1974), Suguio (1977), Soares *et al.* (1980), IPT (1981), Almeida *et al.* (1981), Melo *et al.* (1982), Paula e Silva

e Cavaguti (1994), Fernandes e Coimbra (1996), Batezelli (1998) e Paula e Silva (2003).

4.2. Seleção de Poços

Realizou-se uma seleção dos poços cadastrados que atingem o Aquífero Bauru, através do Parecer Técnico no. 6.870 (IPT, 1996), Parecer Técnico no. 40.515 (IPT, 2001), consultas junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo e ao site do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) disponibilizado pela CPRM, que contém dados geológicos e hidrogeológicos da área de estudo.

Foram identificados 355 poços no Sistema Aquífero Bauru (Anexo 1), dentre os quais, 50 foram usados para amostragem visando as análises químicas e de radioatividade (Anexos 2 e 3).

4.3. Amostragem

No trabalho de campo realizado na área de pesquisa, foram coletadas 50 amostras de águas subterrâneas (Anexo 2). Estas amostras foram submetidas a análises físico-químicas e de radônio e rádio. O mapa do Anexo 4 apresenta a distribuição destes pontos de coleta.

As águas foram coletadas diretamente da boca do poço, após um período de bombeamento (Figura 9). Todos os frascos, antes da coleta, foram lavados com água do próprio poço. Foram coletados 3 litros de água de cada amostra, em vasilhames de vidro (1 litro) para análise do radônio e do rádio e de plástico (2 litros) para as análises hidroquímicas. O pH e a temperatura foram medidos na hora da coleta e em laboratório. Já a condutividade elétrica foi medida apenas em laboratório.



Figura 9: Coleta das amostras em campo.

4.4. Análises Físico-Químicas

Os frascos foram vedados e transportados até o LABIDRO (Laboratório de Isótopos e Hidroquímica) no Departamento de Petrologia e Metalogenia da UNESP de Rio Claro.

4.4.1. Análises de Cátions

O Si e os cátions metálicos, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , e K^+ , foram analisados utilizando-se o aparelho DR/2000 (Hach)-*Direct Reading Spectrophotometer* (Figura 10).

O cátion metálico Na^+ foi analisado por Espectrometria de Emissão Óptica com Fonte de Plasma de Argônio Indutivo (ICP-OES), no laboratório do CEA (Centro de Estudos Ambientais) da UNESP de Rio Claro.



Figura 10: Aparelho DR/2000 para as análises dos cátions e ânions.

4.4.2. Análises de Ânions

A análise da alcalinidade compreendeu a determinação de carbonatos e bicarbonatos. Foi usado como titulador 10 ml de ácido sulfúrico (0,02 N), para a titulação de um volume de 50 ml de amostra. Para que fosse realizada a titulação, foi colocado dentro de cada amostra o reagente *Bromcresol Green–Methyl Red Indicator*.

Os dados de cloreto, sulfato e nitrato das amostras de água, foram obtidos utilizando o aparelho DR/2000 (Hach)-*Direct Reading Spectrophotometer* e reagentes específicos para cada método.

A determinação de pH foi feita utilizando o aparelho HI8314-PHMETER (Hanna Instruments). A exemplo da alcalinidade, foi feita medição *in situ*.

A condutividade, que é a capacidade da água de conduzir corrente elétrica, foi determinada através do Condutivímetro C-702 da Analion.

As determinações dos ânions, cátions e condutividade, foram efetuadas no LABIDRO-Laboratório de Isótopos e Hidroquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE/UNESP, Campus de Rio Claro.

4.4.3. Processamento dos Dados Hidroquímicos

Para visualização da distribuição espacial dos principais cátions, ânions, pH e condutividade elétrica, foram gerados mapas de isovalores com interpolação pelo método geoestatístico de *krigagem*, com auxílio dos *softwares Surfer 9.0* e *10.0*.

A determinação dos tipos hidroquímicos foi realizada por meio dos diagramas de Piper e Stiff, utilizando-se o software Qualigraf.

O Diagrama de Piper, proposto por Piper (1944), é utilizado frequentemente quando se trabalha com grande número de análises químicas de água, servindo para classificar e comparar os distintos grupos de água quanto aos íons dominantes. Este diagrama combina três diferentes campos para a plotagem, sendo dois campos triangulares e um romboédrico. Os triangulares estão situados na parte inferior, onde são plotados os cátions, à esquerda, e os ânions, à direita. Os resultados das análises são representados em porcentagem. Os pontos são marcados nos triângulos que indicam as concentrações relativas dos diversos constituintes dissolvidos na amostra de água. O campo romboidal central, localizado entre os dois triângulos, é utilizado para representar o caráter químico total da água. Esta determinação é feita projetando-se o ponto do cátion à linha identificada com Mg^{2+} , e o ponto do ânion paralelo à linha do SO_4^{2-} . A intersecção das duas linhas originará um ponto no campo romboidal (Figura 11). A posição deste ponto obtido indicará a composição química relativa da água.

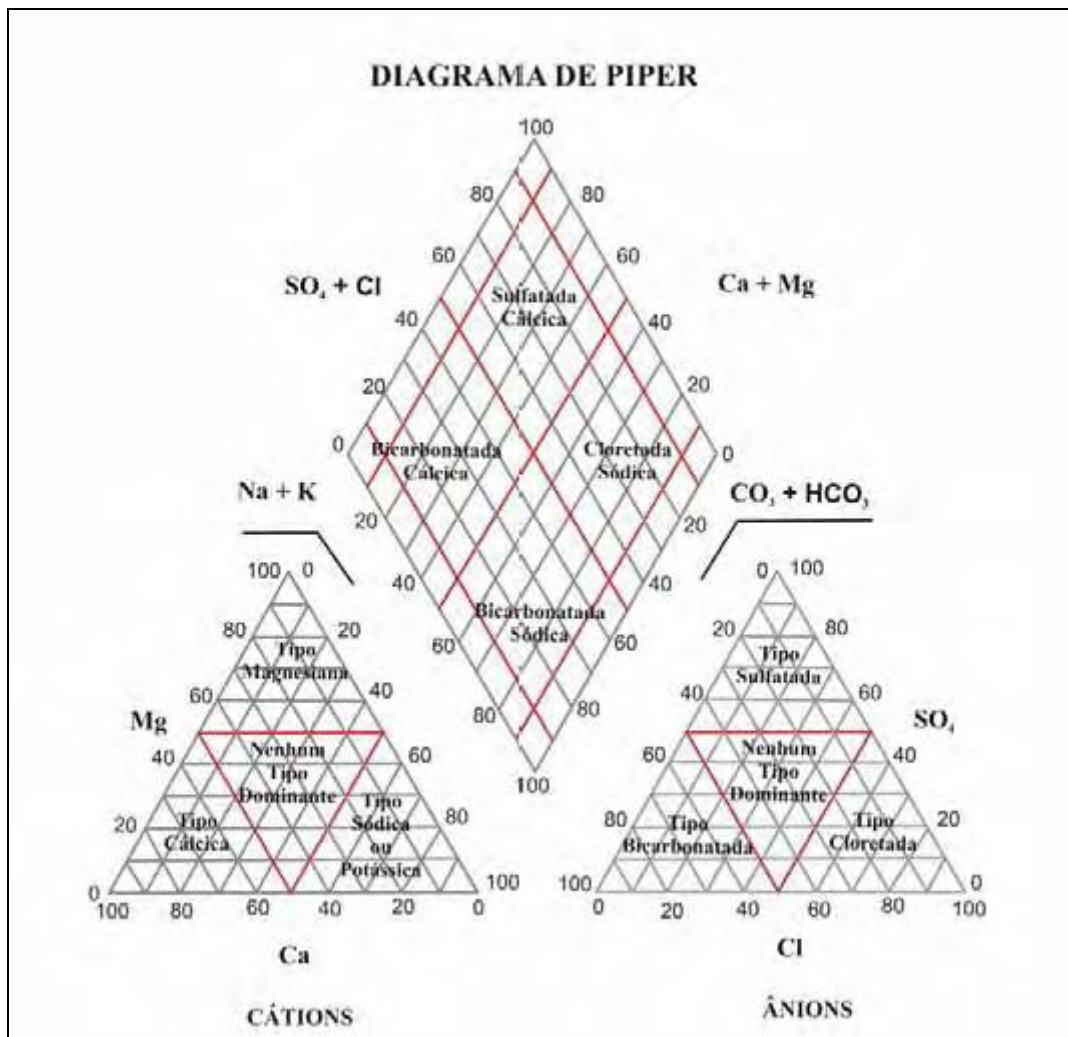


Figura 11: Diagrama de Piper com a classificação dos tipos hidroquímicos (PIPER,1944).

O Diagrama de Stiff baseia-se na representação gráfica contendo linhas dispostas à esquerda e à direita de uma linha vertical que representa o valor zero. Os cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) são representados à esquerda, enquanto os ânions (CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^-) são plotados à direita.

4.5. Análises de Radônio/Rádio

A concentração de radônio na água foi medida usando-se o aparelho Alpha Guard PQ2000PRO Alpha (Genitron GmbH) equipado com uma unidade apropriada (Aquakit), seguindo um protocolo proposto pelo fabricante (GENITRON, 2000). O Alpha Guard é uma câmara de ionização que mede radônio pela técnica de espectrometria alfa (Figura 12).



Figura 12: Aparelho Alpha Guard montado para análise das amostras de água.

A determinação da concentração de radônio nas amostras de água pelas unidades Aquakit-Alpha Guard foi efetuada a partir do emprego da seguinte equação, cujos parâmetros foram definidos por Genitron (2000):

$$1000 C_w = C_a [k + (V_{sy} - V_{sa})/V_{sa}] - C_0.$$

C_w = Concentração de radônio na água em Bq/l;

C_a =Concentração de radônio medida no aparelho em Bq/m³;

K =constante=0,16 (para temperatura entre 20° e 35° C);

V_{sy} =Volume do sistema=1122 ml;

V_{sa} =Volume da amostra=100 ml;

C_0 = concentração de radônio (Bq/m³) indicado como nível zero (valor zero).

Exemplo: Amostra RP-10:

$$\begin{aligned}cw &= cax10,48/1000 \\cw &= 853,0x10,48/1000 \\cw &= 8,93 \text{ Bq/l}\end{aligned}$$

As medidas de radônio foram realizadas em ciclos de 40 minutos para cada amostra, sendo que a cada dez minutos foi conduzida uma leitura (no total foram 5 leituras para cada amostra); a média dos dados propiciou o resultado final.

As amostras foram analisadas no LABIDRO - Laboratório de Isótopos e Hidroquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP.

4.5.1. Correção do Decaimento do Radônio

Os dados obtidos foram corrigidos para levar em conta o decaimento do radônio desde a amostragem até a realização da análise, a partir da seguinte expressão:

$$C=C'' \cdot e^{0,0001258t}$$

C= valor corrigido para radônio, em Bq/l;

C''= valor medido de Rn, em Bq/l;

t= tempo entre a amostragem e análise, em minutos;

$\lambda = 0,0001258 \text{ min}^{-1}$ =constante de decaimento do radônio.

Exemplo: Amostra RP-10:

Para t = 4140 minutos

$$\begin{aligned}C &= C'' \cdot e^{0,0001258t} \\C &= 8,93 \cdot 1,67 \\C &= 14,95 \text{ Bq/l}\end{aligned}$$

4.6. Análise e Tratamento dos Dados Obtidos

Nesta fase do trabalho foram desenvolvidas as seguintes etapas: Confeções de tabelas para as análises hidroquímicas, do Radônio e do Rádio; Elaboração de Mapas Temáticos; Análise Estatística dos Dados e a Interpretação dos dados obtidos.

Para a análise conjunta dos principais parâmetros hidrogeológicos utilizou-se como ferramenta básica a estatística descritiva, para que dessa forma fosse possível calcular valores médios, desvios padrões e variâncias para as variáveis analisadas, além de obter os padrões de dispersão dos dados para os parâmetros avaliados.

Após o emprego da estatística descritiva, os dados foram analisados de forma espacial (distribuição e comportamento na área de estudo), utilizando programas como o *Surfer* versão 10 da *Golden Software* e o *Geo-EAS* versão 1.2.1 (*Geostatistical Environmental Assessment Software*). Dessa forma, podem-se realizar comentários a respeito do comportamento dos principais parâmetros hidrogeológicos e hidroquímicos no município de São José do Rio Preto (SP).

Os mapas de pontos e geológico simplificado foram confeccionados utilizando o programa *Surfer* versão 9 (Anexo 4). Na confecção do mapa potenciométrico, utilizou-se também o programa *Surfer* versão 9 para traçar as linhas de isovalores da cota do nível d' água e as redes de fluxo do aquífero em questão, obtendo-se com isso o mapa potenciométrico da área (Anexo 5). Na análise das outras variáveis a mesma técnica foi usada para a obtenção dos mapas temáticos.

5. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

5.1. Localização da área e vias de acesso

A área de estudo se localiza no município de São José do Rio Preto, que está situado a noroeste do Estado de São Paulo com coordenadas UTM (N) 7.700.722,082 m e UTM (E) 670.708,247 m. A área do município é de 434 km², sendo a zona urbana de 81 km². O município de São José do Rio Preto limita-se a Norte por Ipiguá e Onda Verde, a leste por Guapiaçu, ao sul por Bady Bassit e Cedral e a oeste por Mirassol, distando 450 km da capital do Estado, pela rodovia Washington Luis (SP-310), e 700 km de Brasília, pela Rodovia Transbrasiliana (BR-153) (Figura 13).

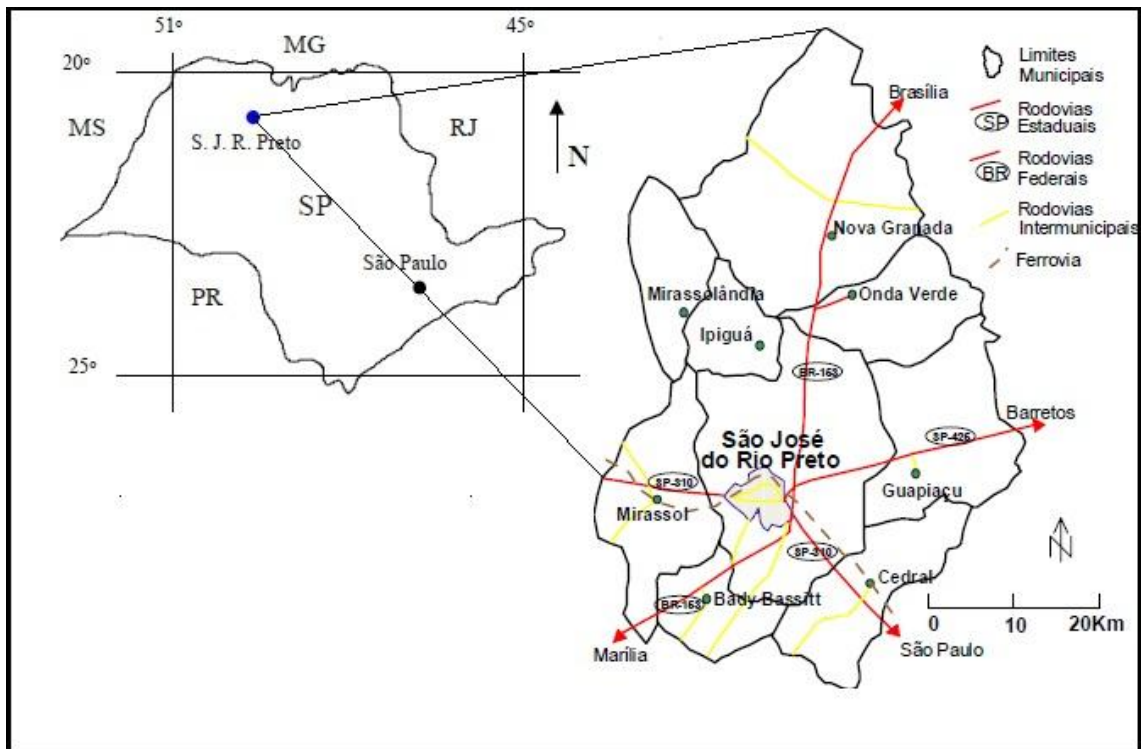


Figura 13: Localização e vias de acesso à área de estudo (Modificado de ATLAS REGIONAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1978).

Em 2010, a população do município foi contada em 408.435 habitantes, sendo o décimo segundo mais populoso do estado e o 52º do país, com uma densidade populacional de 972,95 habitantes por km². Segundo o censo, 196.114 habitantes eram homens e 212.321 mulheres. Ainda segundo o mesmo censo, 383.558 habitantes viviam na zona urbana e 24.877 na zona rural (IBGE, 2010).

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) de São José do Rio Preto, considerado médio pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), é de 0,834, sendo o 25º maior de todo estado de São Paulo (dentre 853 municípios), o 31º de toda Região Sudeste do Brasil (dentre 1.666 municípios) e o 95º de todo Brasil (dentre 5.507 municípios).

5.2. Clima

O clima de São José do Rio Preto é, de acordo com o IBGE, tropical subquente e úmido (cerca de 3 meses secos por ano) com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 23,6°C. Os invernos são secos e frios (com ocorrências de geadas leves em alguns poucos dias da estação) e os verões chuvosos com temperaturas altas. Os meses mais quentes, janeiro e março, têm temperatura média de 27°C, sendo em ambos a média máxima de 33°C e a mínima de 22°C. O mês mais frio, julho, possui média de 19,9°C, sendo 27,5°C e 12,2°C as médias máxima e mínima, respectivamente. Outono e primavera são estações de transição (Figura 14).

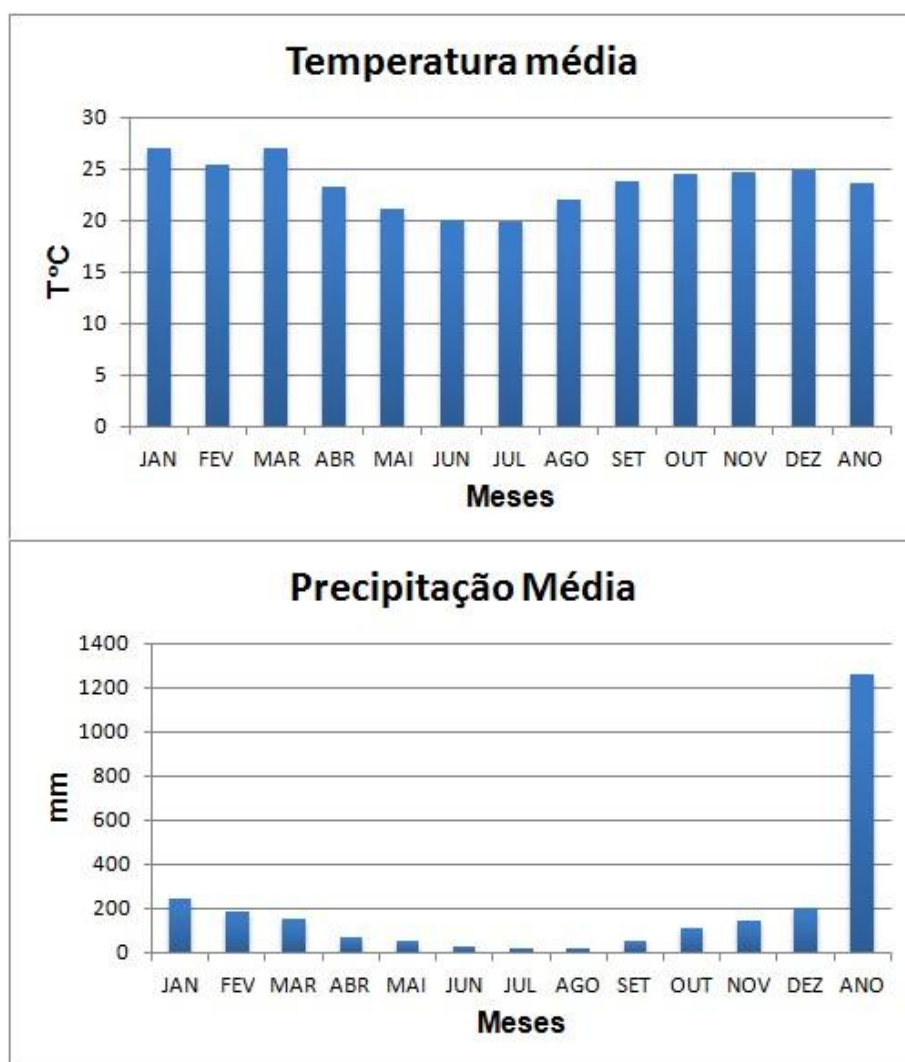


Figura 14: Temperatura e Precipitação média de São José do Rio Preto em 2010, (modificado do CLIMA DOS MUNICÍPIOS PAULISTAS-Unicamp, 2010).

A precipitação média anual é de 1259 mm, sendo julho o mês mais seco, quando ocorre apenas 16,5 mm. Em janeiro, o mês mais chuvoso, a média fica em 240,9 mm. No mês de julho do ano de 2008, a precipitação de chuva de grande parte do estado não passou dos 20 mm. Durante a época das secas e em longos veranicos em pleno período chuvoso também são comuns registros de fumaça de queimadas em morros e matagais, principalmente na zona rural da cidade, o que vem levando a prefeitura a criar projetos ambientais e campanhas de prevenção nas escolas do município. Em São Paulo, assim como em grande parte do país, as principais causas das queimadas são a agricultura e restos de cigarro jogados nas estradas. As altas temperaturas e o clima seco contribuem para o aumento desses índices. Durante o período chuvoso são comuns ocorrências de inundações e deslizamentos de terra em algumas áreas.

5.3. Bacia Hidrográfica

O Município de São José do Rio Preto está inserido na Sub Bacia do Rio Preto (Sub Bacia 7) pertencente à Bacia dos Rios Turvo e Grande (Figura 15). A Bacia do Turvo/Grande (BTG) é a Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos 15 (UGRHI-15), com 15.975 km², definida pela Bacia do Rio Turvo e seus tributários, e pelas porções drenadas diretamente para o Rio Grande, situadas entre a Usina de Marimbondo e o divisor de águas de sua margem esquerda, onde as águas encontram-se com as do Rio Paranaíba. A UGRHI 15 faz limite a norte pelo Estado de Minas Gerais (Rio Grande), a leste pela Bacia do Baixo Pardo/Grande, a sudeste pela Bacia do Rio Mogi Guaçu.

superior a 4 km², topos extensos e aplainados e vertentes com perfis retilíneos a convexos. Geralmente a drenagem é de baixa densidade e apresenta padrão subdendrítrico. Os vales são abertos com a presença de planícies aluviais interiores restritas, podendo ocorrer lagoas perenes ou intermitentes. Nas áreas com relevo de colinas médias predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 km², de topos aplainados, drenagem de média a baixa densidade. As formas revelam que os entalhamentos médios dos vales são inferiores a 20 m e as dimensões interfluviais médias predominantes estão entre 1.750 e 3.750 m. As altimetrias variam entre 400 e 700 m e as declividades médias predominantes das vertentes estão entre 2 e 10%.

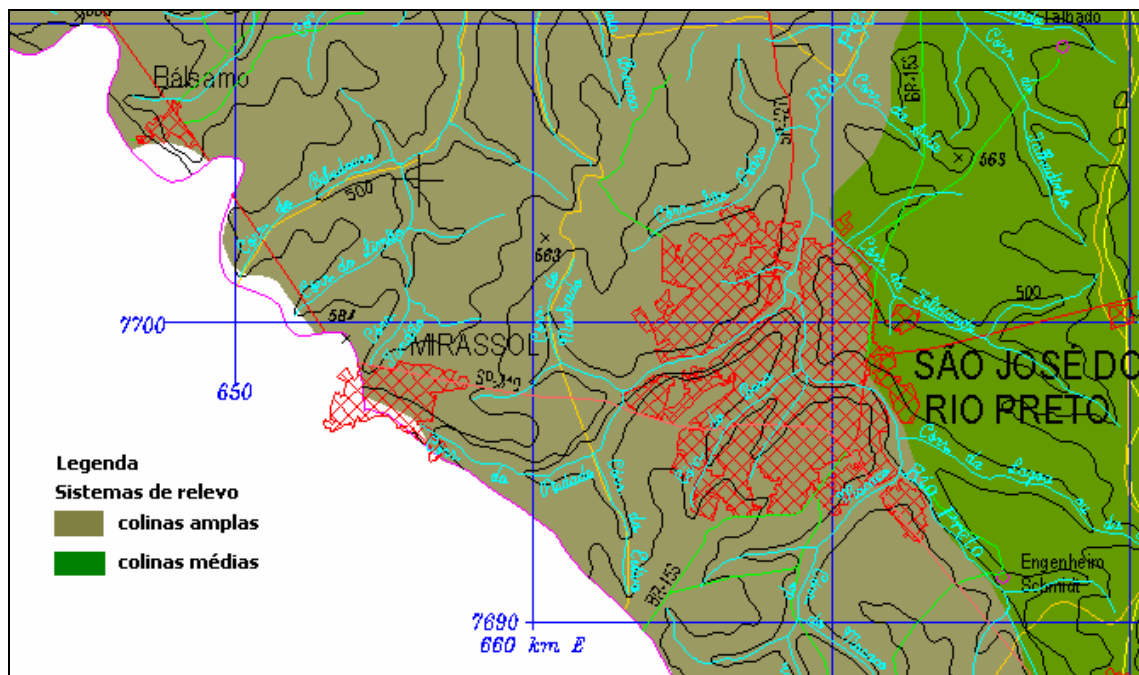


Figura 16: Geomorfologia da área de estudo (modificado de IPT, 1999).

5.5. Pedologia e uso da terra

São cinco os tipos de solos que caracterizam a Bacia Turvo/Grande (UGRHI 15): latossolos roxos, latossolos vermelhos escuros, podzólicos vermelhos escuros, podzólicos vermelhos amarelos e solos litólicos (IPT, 2001).

Os latossolos roxos resultam da degradação e alteração das rochas basálticas da Formação Serra Geral, formando um relevo de colinas amplas. Os latossolos vermelhos escuros são provenientes de sedimentos cretáceos associados com as rochas basálticas, geralmente em colinas amplas. Os solos do tipo podzólicos vermelhos amarelos e os podzólicos vermelhos escuros derivam dos sedimentos cretáceos do Grupo Bauru,

caracterizando solos mais imaturos, com o relevo podendo ser formado por colinas amplas, colinas médias ou morrotes alongados e espigões. Já os solos litólicos predominam no extremo sudeste da área da Bacia Turvo/Grande (Figura 17).

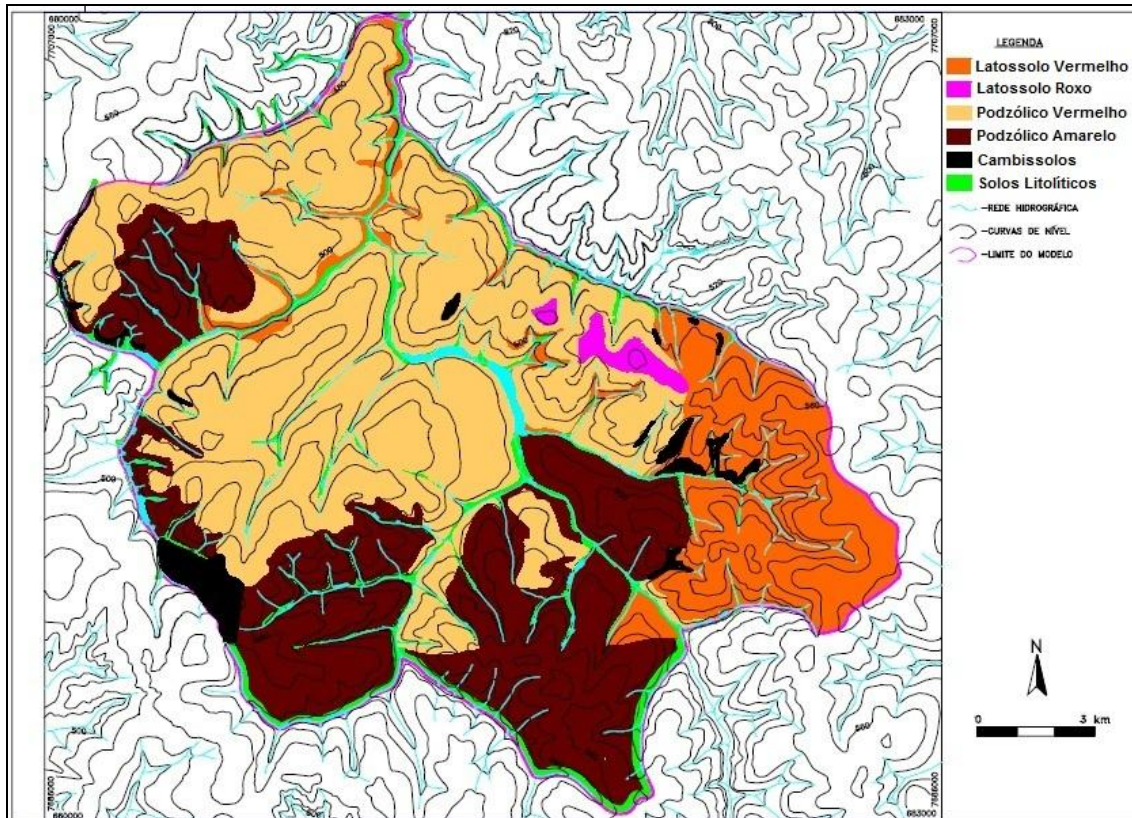


Figura 17: Mapa dos solos da região de estudo (modificado de IPT, 2001).

Na Figura 18 evidencia-se o uso do solo da região de São José do Rio Preto, verificando-se a extensa utilização pecuária (pastagens) e reduzida cobertura vegetal. Além disto, existem pequenas áreas destinadas a atividades agrícolas, como a citricultura. A área urbana também está delimitada no mapa com sua expansão na direção norte.

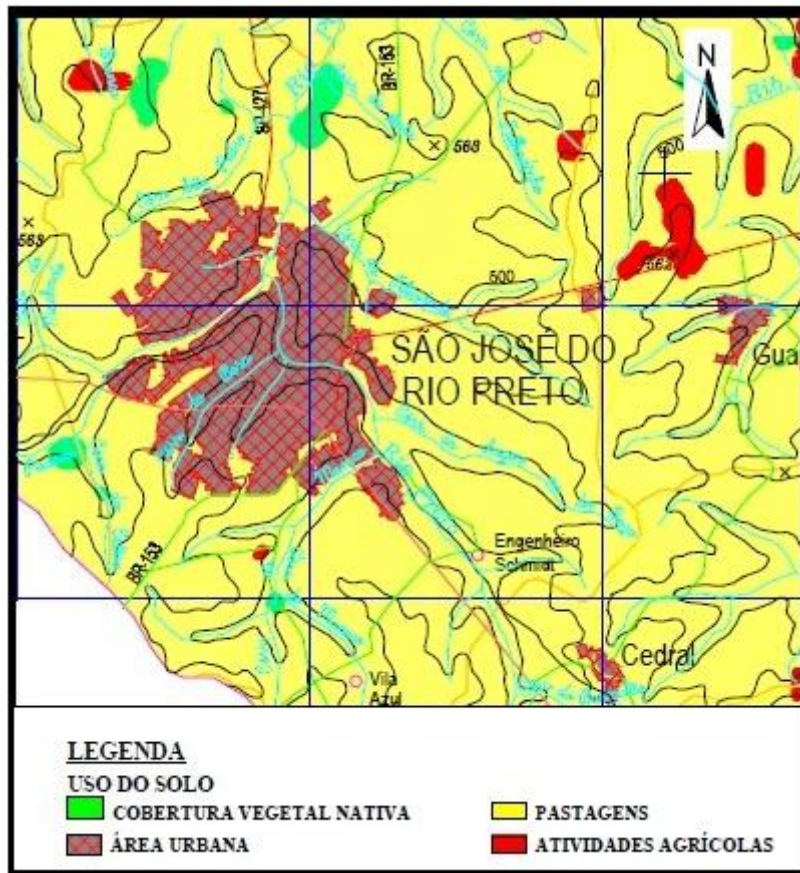


Figura 18: Mapa de uso do solo na região estudada (Modificado de DAEE, 2000).

5.6. Geologia Regional

Regionalmente a área encontra-se inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, que é uma bacia sedimentar intracratônica que evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana, sendo constituída por rochas sedimentares e vulcânicas, datadas entre o Ordoviciano e o Cretáceo (ZALÁN *et al.*, 1990).

As rochas basálticas formaram-se devido a um intenso vulcanismo Serra Geral que ocorreu no início do Período Cretáceo, entre 137 e 127 milhões de anos, quando ainda prevaleciam condições desérticas na Bacia do Paraná, o qual foi acompanhado de perturbações tectônicas que geraram arqueamentos e soerguimento nas suas bordas, associados a grande número de falhamentos, responsáveis pela estrutura atual da bacia.

Nesta área posteriormente acumulou-se o Grupo Bauru, no Cretáceo Superior (SOARES *et al.*, 1980), que aparece em grande parte do Estado de São Paulo, recobrando as lavas basálticas do Planalto Ocidental.

5.6.1. Grupo Bauru

As rochas cretáceas suprabasálticas da Bacia do Paraná, pertencentes ao Grupo Bauru, são constituídas predominantemente por sedimentos siliciclásticos continentais, depositados na porção centro-sul da Plataforma Sul-Americana. Ocupam uma área de cerca de 117.000 km², em sua maior parte no Planalto Ocidental de São Paulo (correspondente a cerca de 47 % do território paulista), de um total de 370.000 km² distribuídos pelo Triângulo Mineiro, noroeste do Paraná, sudeste de Mato Grosso do Sul e sul de Goiás. Em São Paulo, assenta-se principalmente sobre substrato basáltico da Formação Serra Geral e, localmente, sobre sedimentos das formações Botucatu e Pirambóia, como nas regiões de Bauru (SP) e Agudos (SP) (SUGUIO *et al.*, 1977; PAULA e SILVA & CAVAGUTI, 1994).

Suas maiores espessuras preservadas ultrapassam 300 m, como na região de Marília, mas são em média da ordem de 100 m. A Figura 19 mostra a distribuição das unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru no Estado de São Paulo.

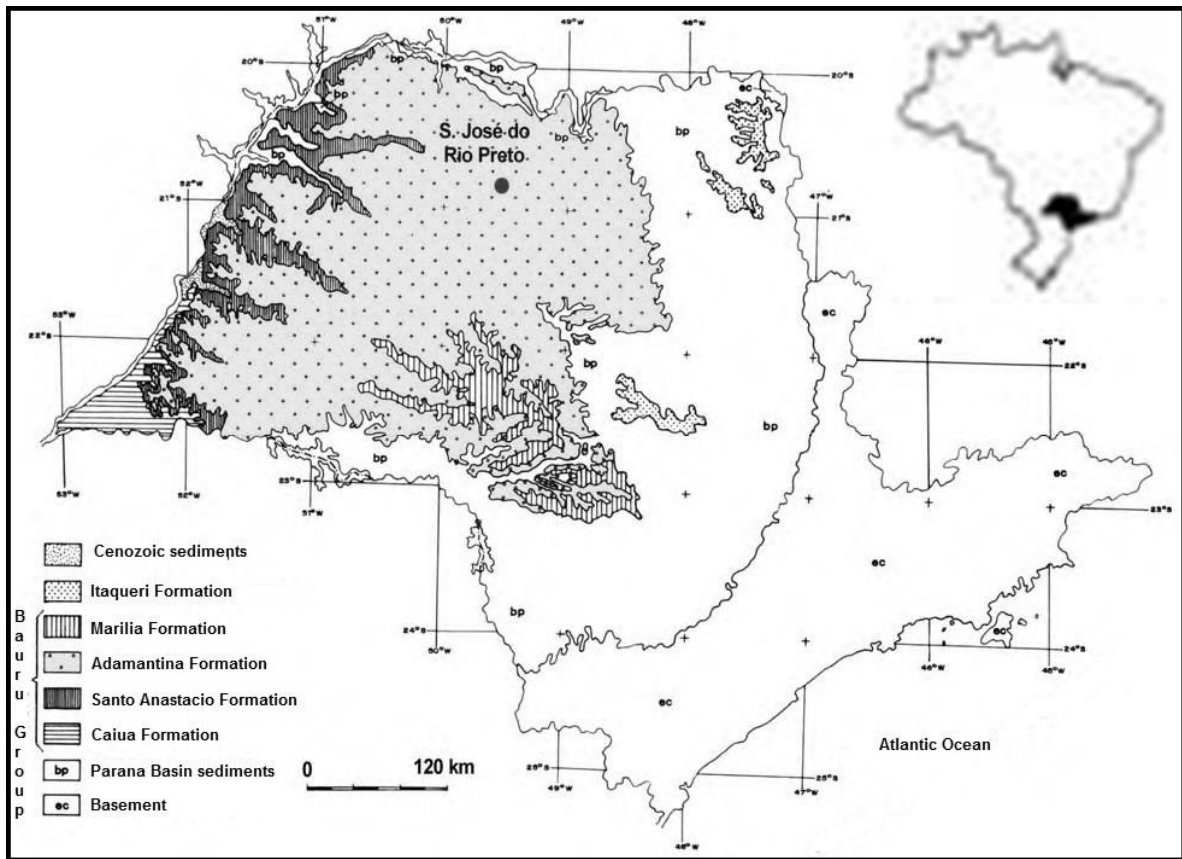


Figura 19: Distribuição do Grupo Bauru na área de estudo (mod. de IPT, 1981).

Até 1980, não havia sido conseguido definir um relacionamento estratigráfico entre as diversas litofácies mapeadas do Grupo Bauru, em razão da variabilidade vertical e horizontal verificada e da ausência de horizontes litoestratigráficos regionais. Soares *et al.* (1980), integrando diversos trabalhos de mapeamento regional elaborados até então, propuseram a clássica divisão estratigráfica do Grupo Bauru, geralmente aceita em razão do seu caráter operacional. Nesta proposta estratigráfica, os autores elevaram a unidade Bauru à categoria de Grupo e subdividiram-no nas formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília (Figura 20).

Divisão estratigráfica do Grupo Bauru, de acordo com Soares et al. (1980)							
Grupo	Formação	Esp. Máx.	Litologia	Litofácies	Sistema Depositional	Fósseis	Idade
Grupo Bauru	Marília	160 m	Marília	Itaqueri	Leques Aluviais	Algas Moluscos Conchostráceos Répteis	Cretáceo Superior
	Adamantina	190 m	Taciba Ubirajara S. J. R. Preto				
	Santo Anastácio	80 m	Sto. Anastácio	F. meandrante a anastomosado psamítico	Desértico		Cretáceo Inferior
	Caiuá	200 m	Caiuá				
	G. S. Bento	Serra Geral	+ 1500 m	Basaltos			

Figura 20: Proposta clássica de subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru elaborada por Soares *et al.* (1980).

A configuração do arcabouço estratigráfico regional de subsuperfície do Grupo Bauru no Estado de São Paulo foi apresentada por Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2003). Estes autores utilizaram informações de 180 perfis geofísicos representativos de 175 localidades diferentes do Estado de São Paulo, além de descrições de amostras de calha e de testemunhos de sondagem. Nestes trabalhos, foram identificadas duas superfícies de discordância regionais, S1 e S2, de caráter cronoestratigráfico, que permitiram a distinção e a delimitação de unidades geofísicas correspondentes às unidades litoestratigráficas formais. Foram identificadas as formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina, Marília (segundo concepção de Soares *et al.*, 1980) e Araçatuba (conforme redefinição de Batezelli (1998) (Figura 21).

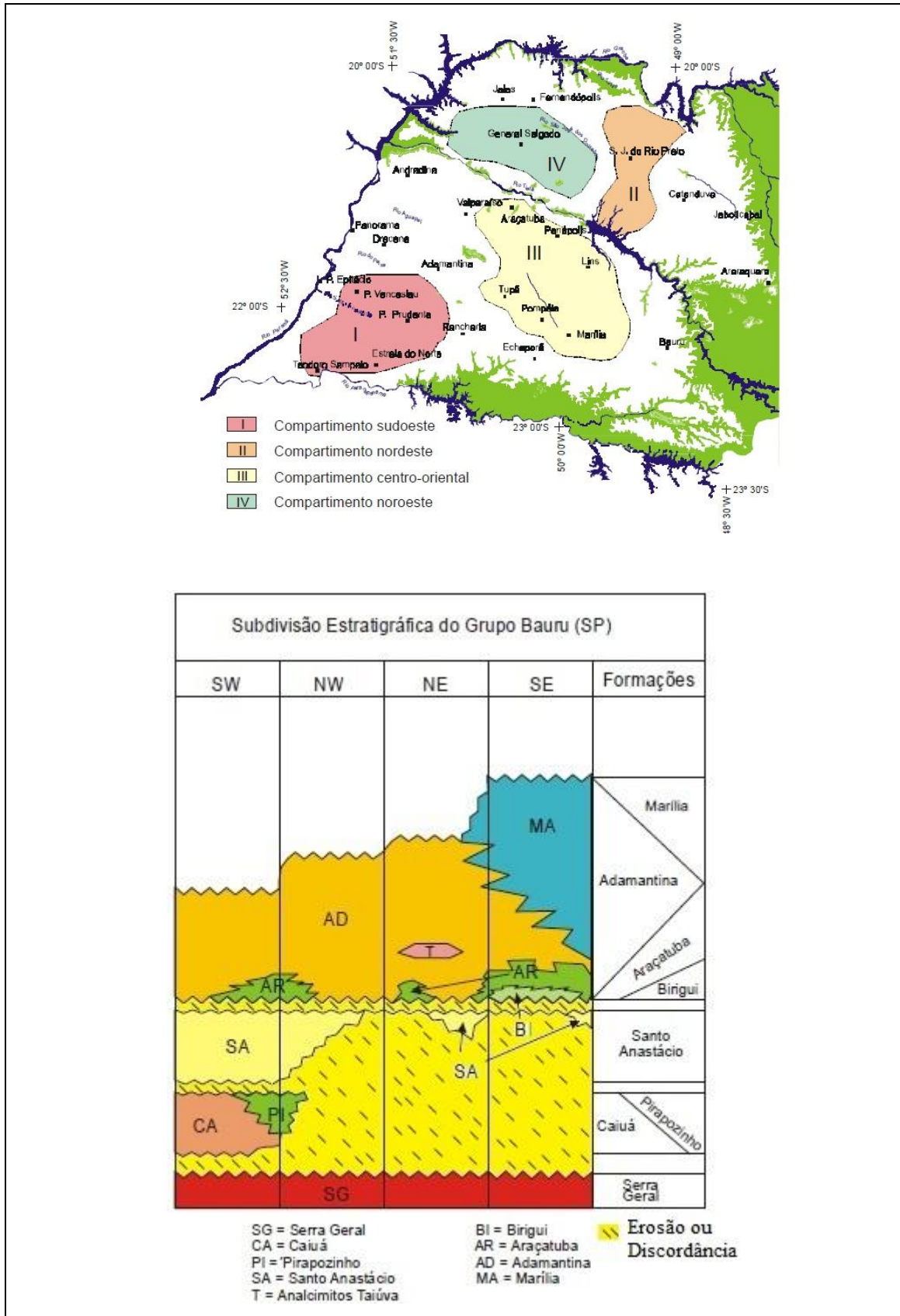


Figura 21: Mapa de subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru no Estado de São Paulo e as relações estratigráficas entre as formações cretáceas suprabasálticas nos diferentes compartimentos do Grupo Bauru no Estado de São Paulo (modificado de PAULA e SILVA, 2003).

Neste trabalho, apesar das inúmeras proposições realizadas por diferentes autores, será seguida a proposta em superfície de Soares (1980) e em subsuperfície de Paula e Silva (2003), para caracterizar as Formações que compõem o Grupo Bauru na área estudada, que está localizada no compartimento nordeste da Figura 21 (Anexo 3-Perfis).

5.6.1.1. Formação Santo Anastácio

Os arenitos dessa Formação afloram em áreas que acompanham as cotas mais baixas dos vales dos rios afluentes do Paraná, no oeste do Estado. Em subsuperfície, litologias atribuíveis à Formação Santo Anastácio estendem-se para leste, até a região de Paraguaçu Paulista, e para norte até o divisor entre os rios São José dos Dourados e Grande.

A litologia mais característica da Formação Santo Anastácio é representados por arenitos marrom avermelhados e arroxeados, de granulometria fina à média, seleção geralmente regular a ruim, com grãos arredondados a subarredondados, cobertos por película limonítica. Mineralogicamente constituem-se essencialmente de quartzo, ocorrendo subordinadamente feldspato, calcedônia e opacos.

A Formação Santo Anastácio apresenta espessura máxima compreendida entre 80 m e 100 m na região dos rios Santo Anastácio e Pirapozinho, no oeste do Estado, já próximo ao Pontal do Paranapanema (SOARES *et al.*, 1980).

Em subsuperfície, a Formação Santo Anastácio encontra-se delimitada por discordâncias no topo e na base, pois há mudanças no raio gama nessas regiões (PAULA e SILVA, 2003).

5.6.1.2. Formação Araçatuba

A Formação Araçatuba faz contato inferior com diversas unidades estratigráficas. Com a Formação Serra Geral o contato é feito de modo discordante; com a Formação Birigui, o contato é transicional, com passagem de sedimentos predominantemente arenosos desta, para sedimentos pelíticos da Formação Araçatuba; com a Formação Santo Anastácio possui contato discordante. O contato superior da Formação Araçatuba com a Formação Adamantina é transicional (PAULA e SILVA, 2003).

Em subsuperfície, Paula e Silva (2003) descreve esta formação como uma sucessão predominantemente pelítica, com eventuais intercalações de delgados corpos arenosos.

Soares *et al.* (1979, 1980) referem-se a esta unidade como um corpo com espessura de até 15 metros de lamitos, lamitos arenosos e siltitos de cor castanho-claro-acinzentado. Mezzalana (1974) descreve-a como siltitos avermelhados, marrom-acinzentados e esverdeados, argilosos e calcíferos. Conforme a definição de Batezelli (1998), descrita como constituída por siltitos arenosos cinza esverdeados, maciços ou com estratificação plano-paralela a cruzada, com intercalações de siltitos argilosos e arenitos muito finos.

5.6.1.3. Formação Adamantina

A Formação Adamantina assenta-se discordantemente sobre os basaltos da Formação Serra Geral e aflora na borda oriental da bacia; com a Formação Santo Anastácio, apresenta relações discordantes na região das depressões de Rio Preto, Presidente Bernardes, Dracena; com a Formação Araçatuba, seu contato é concordante transicional nas áreas de ocorrência situadas principalmente nas regiões sudoeste e centro-oriental da bacia; com a Formação Birigui, o contato é transicional em porções restritas da bacia. O contato superior da Formação Adamantina é concordante transicional a interdigitado com a Formação Marília, com ocorrência na região sudoeste da bacia e na região de Monte Alto (PAULA e SILVA, 2003).

No oeste do estado de São Paulo, esta formação se estende por vasta área, constituindo os terrenos de maior parte do Planalto Ocidental (ALMEIDA *et al.*, 1981 e MELO *et al.*, 1982).

A Formação Adamantina é constituída por arenitos de granulometria fina a muito fina, cor rósea a castanha, portando estratificações cruzadas, alternadas com lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, de cor castanho-avermelhado a cinza-castanho, maciços ou com acamamento plano-paralelo grosseiro, frequentemente com marcas de onda e microestratificações cruzadas e ocorrências de seixos de argilito, cimento e nódulos carbonáticos (SOARES *et al.*, 1980).

Em subsuperfície, conforme descrição realizada por Paula e Silva *et al.* (1994), esta Formação caracteriza-se pela presença de arenitos avermelhados a acastanhados,

finos a muito finos, argilosos, carbonáticos, quartzosos, intercalados por camadas de lamito marrom a avermelhado, arenoso, carbonáticos.

Segundo Soares *et al.* (1980), nas porções ocidentais dos espigões entre os grandes rios estão as maiores espessuras da Formação Adamantina: atinge 160 metros entre os rios São José dos Dourados e Peixe, 190 metros entre os rios Santo Anastácio e Paranapanema, e 100 a 150 metros entre os rios Peixe e Turvo, adelgaçando-se dessas regiões em direção a leste e nordeste.

Vários ambientes de deposição foram atribuídos a esta unidade. Segundo Soares *et al.* (1980), o ambiente deposicional é compreendido por um sistema fluvial meandrante pelítico, a sul, gradando para psamítico, a leste e norte e, parcialmente nessas regiões, com transição para entrelaçado.

Fernandes e Coimbra (1996) sugerem que a deposição da Formação Adamantina ocorreu em sistema fluvial entrelaçado (*braided*), em extensa planície aluvial com lagoas efêmeras. Segundo Paula e Silva (2003), a Formação Adamantina, em perfis, é composta de fácies com padrão típico de *fining upward* que sugerem depósitos em canais meandantes, com pequena presença de material pelítico. Em direção ao topo da unidade, há um enriquecimento arenoso indicando progradação fluvial e assoreamento do sítio deposicional.

5.7. Geologia Estrutural

A sedimentação do Grupo Bauru teve como palco precursor a fase tectônica mais marcante da evolução da Bacia do Paraná, quando enormes quantidades de lavas basálticas cobriram toda essa depressão, influenciada pela ruptura do Gondwana e pela abertura do Atlântico Sul no Jurássico-Cretáceo (ZALÁN *et al.*, 1990). Essas manifestações magmáticas ocorreram entre 137 e 127 Ma, traduzindo-se em espessa cobertura de basaltos e intrincada rede de diques e soleiras. Este evento tectônico reativou antigas linhas de fraqueza do embasamento com direções principais NE-SW e NW-SE, condicionando os corpos ígneos intrusivos e extrusivos e causando a última fase de subsidência importante da bacia, em decorrência do peso exercido pelas lavas sobre a crosta.

O contorno da superfície do topo da Formação Serra Geral (Base do Bauru), sob o ponto de vista estrutural, é de extrema importância para o entendimento da deposição do Grupo Bauru. A Figura 22 ilustra o contorno da Formação Serra Geral, mostrando a

justaposição de vários alinhamentos estruturais conhecidos, como Guapiara, São Jerônimo-Curiúva, do Rio Tietê, às isolinhas de cota da Formação Serra Geral (CAMPOS *et al.*, 2000).

Observando-se a Figura 22, nota-se na região de Presidente Prudente predominância de movimentos horizontais; já próximo a Araçatuba, Andradina e Fernandópolis, as feições resultantes sugerem basculamentos de blocos, por predominância de movimentações verticais (CAMPOS *et al.*, 2000). A superfície do basalto pela análise do mapa é praticamente plana, apresentando suave mergulho para o centro da Bacia.

Do ponto de vista da hidrogeologia, presume-se que as zonas de falhas de direção NE, não preenchidas por diques de diabásio (FERREIRA *et al.*, 1982; ZALÁN *et al.*, 1990; CAMPOS *et al.*, 2000), venham a se constituir em zonas aquíferas mais favoráveis à exploração de águas subterrâneas que as de direção NW, preenchidas. De acordo com DAEE (1976), poços situados sobre os lineamentos fotogeológicos, apresentam vazões específicas maiores aos situados fora deles.

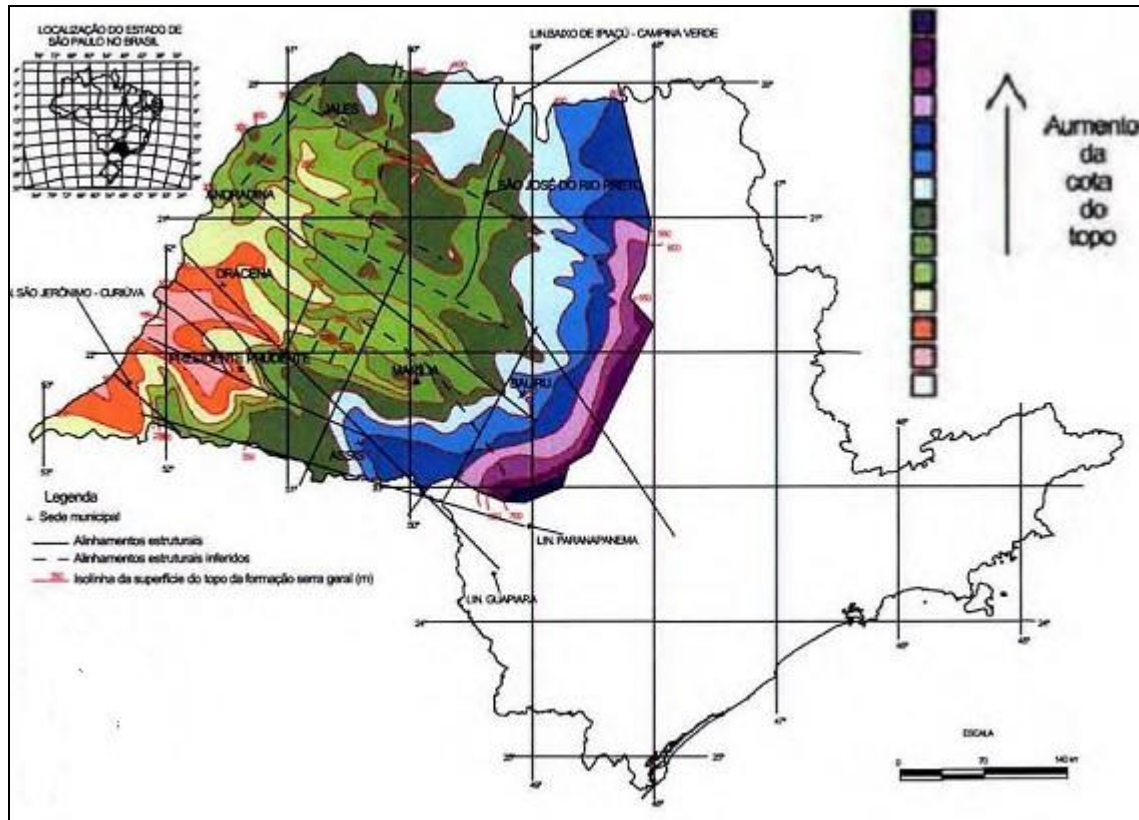


Figura 22: Mapa de contorno estrutural do topo da Formação Serra Geral (CAMPOS *et al.*, 2000).

A região da área estudada se encontra numa depressão denominada de Rio Preto que foi mencionada no trabalho de Santoro & Massoli (1985) e aparece no de Campos *et al.* (1992). Constitui um embaciamento de orientação NNE, com mergulho para SSW, limitado aproximadamente a norte pelo alçamento dos basaltos na direção do Rio Grande, a oeste pelo Alto de Tanabi, a leste pelo soerguimento do substrato vulcânico e a sul pela Depressão Queiroz, até a região do Rio Tietê (Figura 23).

Além disto, a acumulação do Grupo Bauru se deu em três fases principais de deposição, separadas por superfícies de discordância regionais, aqui denominadas S1 e S2. Sobre o pavimento basáltico, desnivelado por processos tectônicos e erosivos, depositam-se os sedimentos clásticos da sucessão mais antiga, representada pelas formações Caiuá e Pirapozinho, em um sistema fluvial endorreico, com rios meandantes alcançando corpos lacustres rasos que atuavam como nível de base. Após esta primeira fase deposicional, a bacia entra em processo de *by-pass*, não permitindo a fixação de novos depósitos. Gera-se, então, a discordância regional S1 que representa um hiato temporal e provavelmente erosivo, encerrando a primeira fase de sedimentação (PAULO E SILVA, 2003).

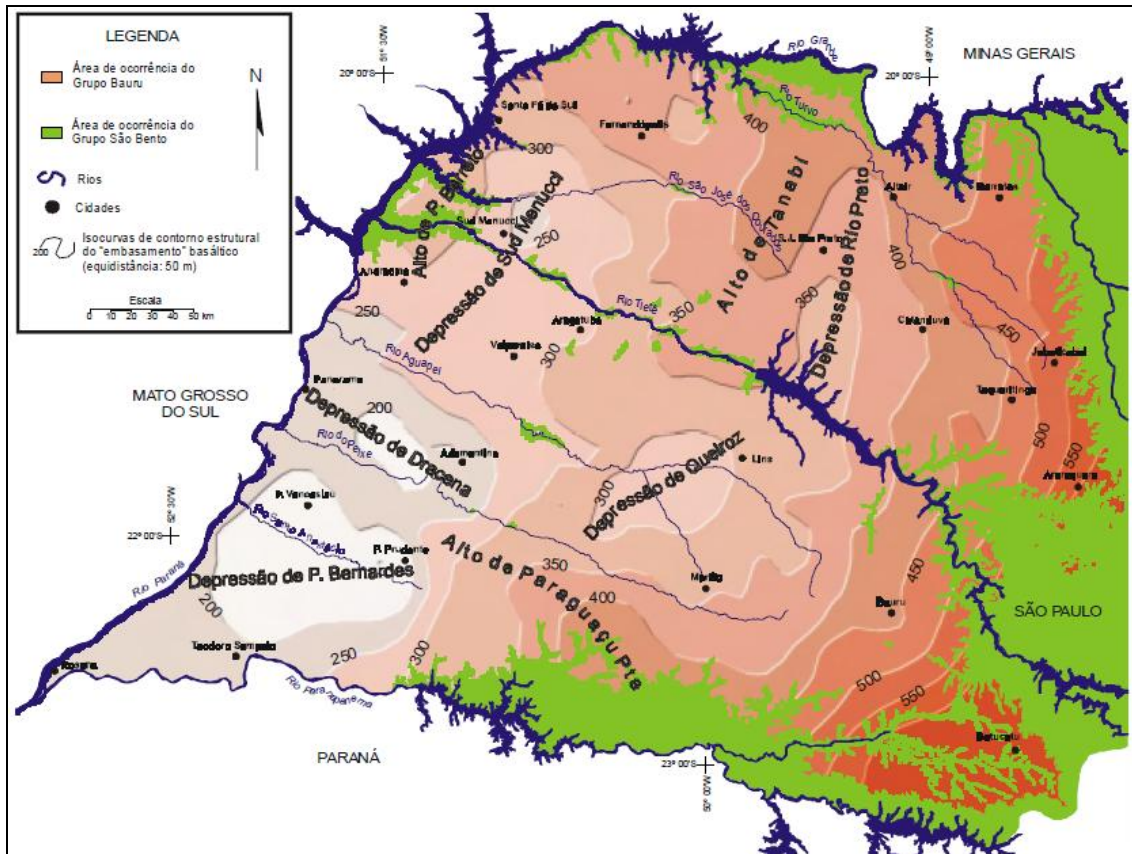


Figura 23: Localização da Depressão Rio Preto (PAULA e SILVA, 2003).

A superfície S2 marca o contato entre os depósitos atribuídos às unidades Santo Anastácio, abaixo, Araçatuba/Adamantina, acima, compreendendo o limite superior da sucessão depositada no “tempo” Santo Anastácio, sendo essa provavelmente erosiva assim como a S1.

5.8. Aspectos Hidrogeológicos Regionais

O Sistema Aquífero Bauru comporta-se como unidade hidrogeológica de extensão regional, contínua, livre a semiconfinada, com espessura média de 100 metros, podendo alcançar mais de 300 metros, na região de Marília, conforme já mencionado (Figura 24).

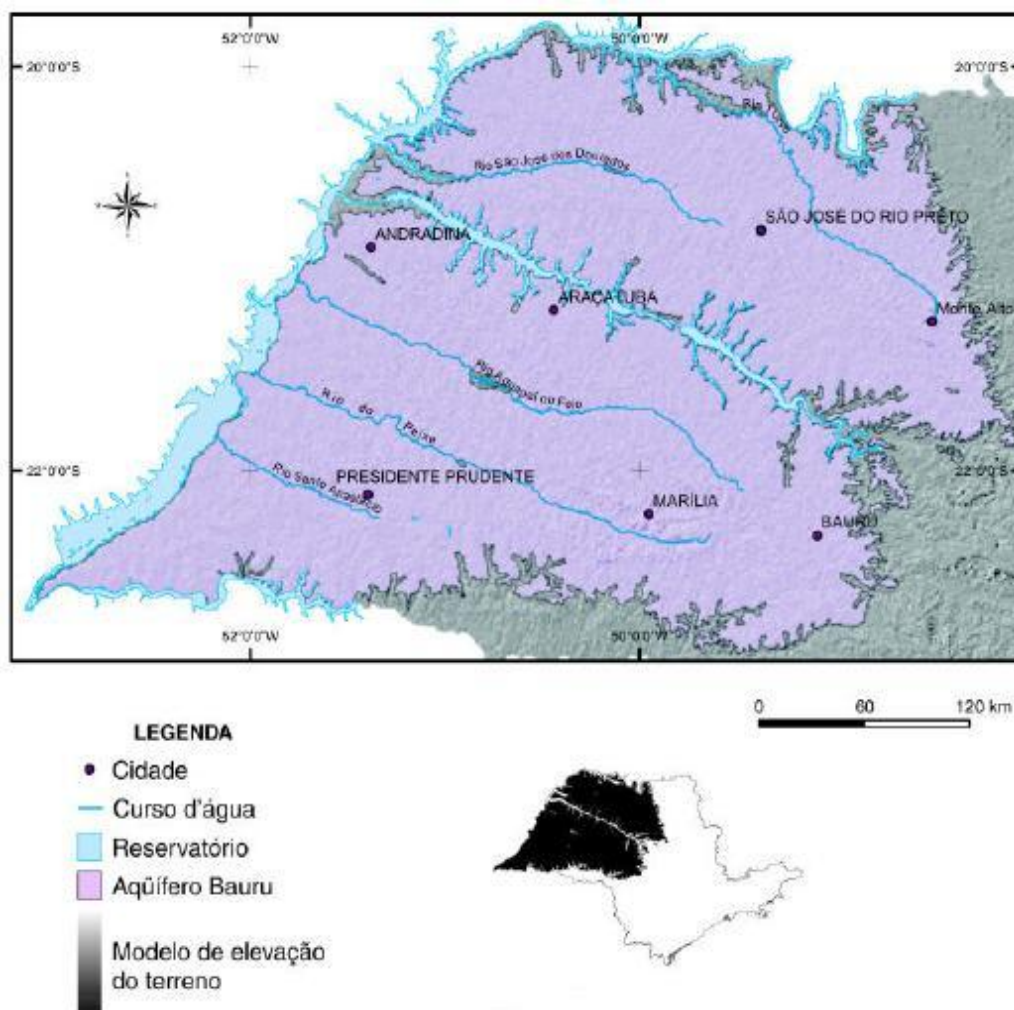


Figura 24: Mapa de Localização do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo (PERROTA *et al.*, 2005).

Com base em subdivisão proposta por Paula e Silva (2003), o Sistema Aquífero Bauru foi dividido em unidades hidroestratigráficas representadas pelos aquíferos Caiuá, Santo Anastácio, Birigui, Adamantina e Marília, e os aquíferos Pirapozinho e Araçatuba (Figura 25).

No estado de São Paulo, o Sistema Aquífero Bauru assenta-se normalmente sobre o embasamento basáltico, de caráter impermeável, fisiografia muito irregular e com caimento geral para sudoeste. Localmente, tem como substratos rochas pertencentes às formações Botucatu e Pirambóia, como nas regiões de Bauru e Agudos (PAULA e SILVA & CAVAGUTI, 1994).

A superfície piezométrica do Sistema Aquífero Bauru pode ser representada pelos níveis de água mais superficiais do terreno e que acompanham ligeiramente a configuração da superfície topográfica, conforme observado nos estudos realizados pelo DAEE (1976, 1979).

Por outro lado, registros de níveis em diferentes unidades aquíferas exploradas, podem refletir situações particulares de confinamento, como por exemplo, na região de Presidente Prudente, onde o Aquífero Santo Anastácio está isolado do Aquífero Adamantina, pelo Aquífero Araçatuba (PAULA e SILVA, 2003).

As vazões obtidas em perfurações no Aquífero Bauru são extremamente variáveis, em virtude da diversidade litofaciológica existente, que coloca em contato lateral e vertical sedimentos com diferentes características de porosidade e permeabilidade (PAULA e SILVA, 2003). Esses aspectos foram observados por Vieira (1981) ao destacar que a utilização da expressão “Aquífero Bauru” nem sempre é adequada, já que apresenta mais de um aquífero ou autênticos aquícludes.

O Aquífero Bauru é considerado moderadamente permeável, devido ao teor relativamente alto de material argiloso e siltoso e às intercalações de camadas permeáveis e impermeáveis (DAEE, 1976).

Em estudos pioneiros realizados nas regiões administrativas de Presidente Prudente e Marília, no Estado de São Paulo, o DAEE (1979) distinguiu o Sistema Aquífero Bauru em duas unidades. O Aquífero Bauru Inferior, abrangendo as formações Caiuá e Santo Anastácio, foi caracterizado como livre e localmente semiconfinado, de porosidade granular, contínuo e homogêneo, com condutividade hidráulica variando entre 1 a 3 m/dia e transmissividade aparente entre 100 e 300 m²/dia. O Aquífero Bauru Médio a Superior, representado pelas formações Adamantina e Marília, foi caracterizado como livre a localmente confinado, com porosidade granular, contínuo e

heterogêneo, com condutividade hidráulica variando de 0,1 a 0,4 m/dia e transmissividade aparente entre 10 e 50 m²/dia (Figura 26).

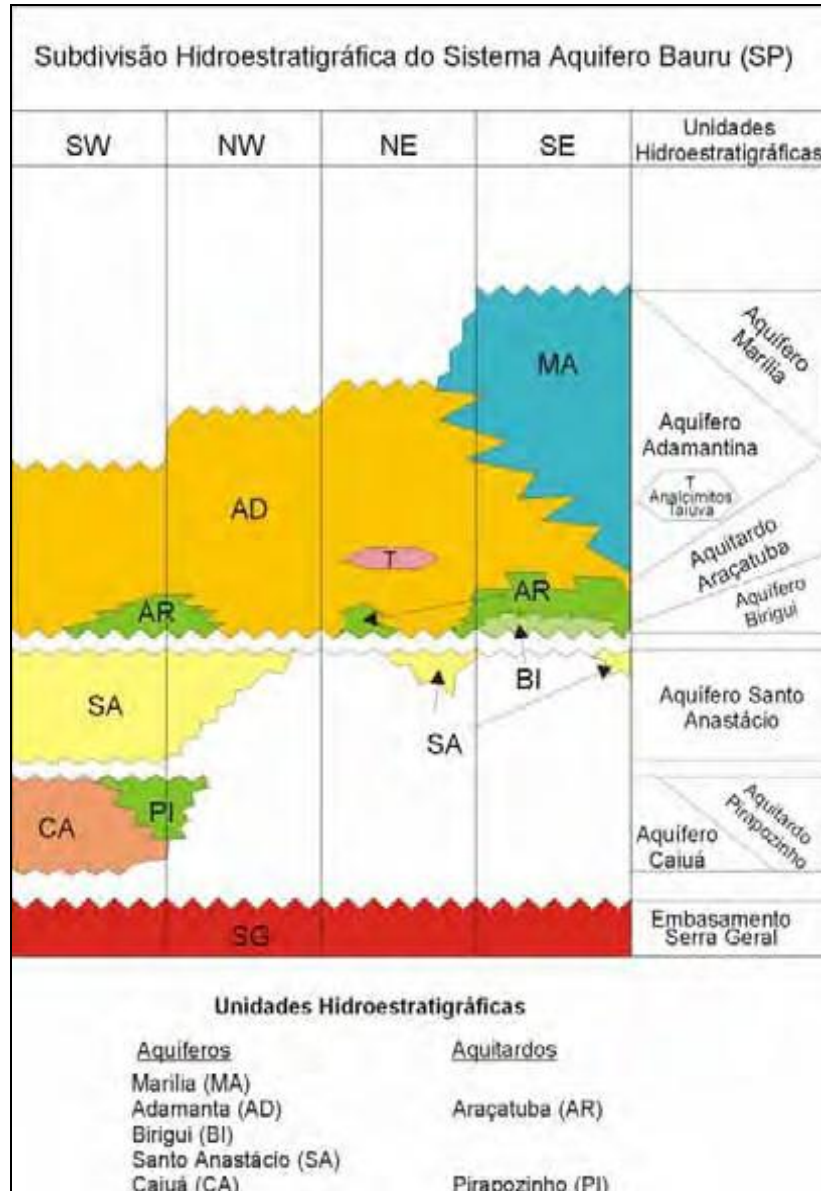


Figura 25: Subdivisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Bauru (PAULA e SILVA, 2003).

Na área mais extensa de ocorrência da unidade Bauru, onde predominam sedimentos das formações Marília e Adamantina, o Sistema Aquífero Bauru apresenta vazões variando de 3 a 20 m³/h; nas áreas mais restritas, onde predominam os sedimentos da Formação Santo Anastácio, as vazões deste sistema atingem valores mais significativos, variando de 20 a 50 m³/h; já na área de ocorrência da Formação Caiuá, as vazões dos poços variam entre 20 e 200 m³/h. Este possível zoneamento do potencial

exploratório por poços foi destacado pelo DAEE (2000), a partir das espessuras do aquífero e de suas características litológicas.

Barcha (1980) e Barcha *et al.* (1981) destacaram que a produtividade heterogênea deste sistema aquífero é o resultado da combinação da textura, do teor de cimento, da porosidade e da permeabilidade da rocha, muito mais que das condições técnicas e construtivas dos poços.

Porcentagens de silte e argila acima de 10% são suficientes para reduzir a permeabilidade das rochas, tornando-as impermeáveis do ponto de vista prático. De modo semelhante, o cimento carbonático exerce influência sobre a permeabilidade, sendo que, concentrações acima de 10%, podem representar uma eficaz barreira à movimentação da água (BARCHA *et al.*, 1981). Denson, Shindale & Fenn (1968, *in* CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983) ressaltam que um teor de apenas 3% de argila montmorilonítica pode reduzir em 50% a permeabilidade de um arenito.

A grande extensão aflorante do Sistema Aquífero Bauru permite recarga direta das precipitações anuais, da ordem de 1.300 mm (DAEE, 2000). Com base nas estimativas do DAEE, somente 3% da precipitação, ou seja, 39 mm/ano, constituem a reserva explotável do aquífero, correspondente a uma extração de 136 m³/s ou o equivalente a 48.960 poços operando continuamente com vazão de 10 m³/h (PAULA e SILVA, 2003).

Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2006) subdividiram o Sistema Aquífero Bauru em unidades hidroestratigráficas regionais, distinguidas em perfis geofísicos de poços tubulares profundos perfurados para captação de água subterrânea no estado de São Paulo. De acordo com os referidos autores, esta subdivisão hidroestratigráfica, fundamentada na litoestratigrafia de subsuperfície, justifica-se em razão das particularidades litológicas presentes em cada formação, as quais, por sua vez, governam as propriedades hidráulicas dessas unidades. Com isso, admitiram uma correspondência entre unidades litoestratigráficas e hidroestratigráficas, na partição do Sistema Aquífero Bauru. Sendo assim, subdividiram o Sistema Aquífero Bauru nos aquíferos Marília, Adamantina, Birigui, Santo Anastácio, Caiuá e os aquíferos Araçatuba e Pirapozinho (Figura 25).

Neste trabalho, a área de estudo se encontra no compartimento nordeste (NE) da Figura 25, compreendendo os aquíferos Santo Anastácio, e aquífero Adamantina, e o aquífero Araçatuba.

O Aquífero Santo Anastácio possui área de afloramento que se estende em estreita faixa paralela ao rio Paraná, mas em subsuperfície avança na direção oriental até os limites do Alto de Tanabi, e sobre as regiões que constituem o Alto de Paraguaçu Paulista e a Depressão de Rio Preto, com uma área de aproximadamente 67.000 km². É representado pelos sedimentos predominantemente arenosos da formação homônima, depositados por um sistema fluvial entrelaçado, com variações para meandrante, geralmente com raras intercalações pelíticas (PAULA e SILVA, 2003).

O Aquífero Santo Anastácio foi considerado de extensão regional, livre a semiconfinado e contínuo. Este aquífero possui condições de semiconfinamento nas porções onde está recoberto pelo Aquitardo Araçatuba ou camadas pelíticas atribuídas ao Aquífero Adamantina. O melhor potencial hídrico exploratório do Aquífero Santo Anastácio ocorre na região sudoeste paulista (PAULA e SILVA, 2003).

O Aquífero Adamantina ocorre extensivamente em superfície, ocupando uma área de aproximadamente 99.600 km², estando coberto apenas localmente pela Formação Marília e ausente, por erosão, no extremo sudoeste paulista. Os depósitos arenosos em *fining upward* com terminações em pelitos, indicativos de sedimentação em canais fluviais meandrantés, são característicos deste aquífero considerado de extensão regional, livre a semiconfinado e contínuo. O semiconfinamento é decorrente principalmente das variações de permeabilidade dos sedimentos, em função de maior ou menor teor de argila da matriz, ou de camadas pelíticas que se intercalam aos corpos arenosos (PAULA e SILVA, 2003).

Ocupando uma área de aproximadamente 54.600 km² do estado de São Paulo, o Aquitardo Araçatuba constitui uma barreira de permeabilidade que isola as unidades hidroestratigráficas subjacentes. Na região sudoeste, isola os aquíferos Caiuá e Santo Anastácio; na região central da bacia confina os sedimentos do Aquífero Birigui; nas demais áreas, assenta-se sobre o embasamento basáltico ou cobre esporadicamente o Aquífero Santo Anastácio (PAULA e SILVA, 2003).

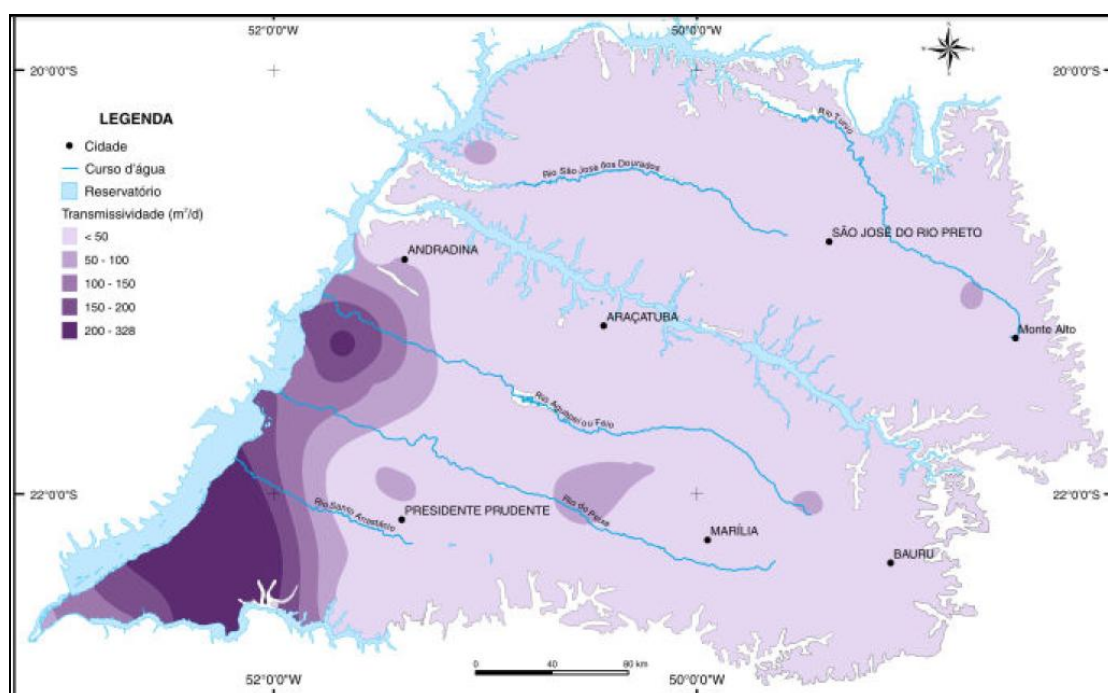


Figura 26: Transmissividade do Aquífero Bauru (modificado de DAEE, 1979).

5.9. Aspectos Hidrogeológicos Regionais

Com relação às águas do Sistema Aquífero Bauru, elas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, secundariamente magnesianas ou sódicas e bicarbonatadas sódicas, secundariamente cálcicas, de acordo com a classificação feita por intermédio dos diagramas Schoeller – Berkaloff e de Piper por DAEE (1976) e CETESB (1994, 2001).

Campos (1993 *in* IPT, 1996) efetuou uma revisão sobre os trabalhos de hidrogeológica dos principais sistemas aquíferos do Estado de São Paulo. As águas do Grupo Bauru foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. Em termos de pH, prevalecem os meios neutros a básicos. Possuem baixa salinidade, com valores médio de resíduo seco inferiores a 240 mg/l, sendo predominante a faixa de 100 a 200 mg/l (CETESB, 1994, 2001).

Segundo CETESB (1994), as águas dos aquíferos Marília e Adamantina distinguem-se quimicamente dependendo da topografia: nos espigões e interflúvios são bicarbonatadas cálcicas, enquanto que nos vales predominam águas bicarbonatadas cálcio-magnesianas. No Aquífero Santo Anastácio, as águas são fracamente

bicarbonatadas cálcio-magnesianas. Em termos de parâmetros analisados para o Aquífero Bauru, tem-se (CETESB, 2004, 2006):

-cloretos: de 159 amostras, 91% apresentam teores abaixo de 10 mg/l, enquanto que 9% encontram-se no intervalo de 10,6 a 26,4 mg/l;

-ferro total: 86% de um total de 161 amostras, forneceram valores iguais ou menores que 0,092 mg/l. As maiores concentrações encontradas são interpretadas como consequência de análises de amostras de poços inativos, onde a água estagnada acusa maior teor de ferro que a água do aquífero;

-dureza total: 59% são águas moderadamente duras, para um total de 155 amostras analisadas;

-nitrito: a presença de nitrito é considerada como indicativo de contaminação proveniente de esgotos públicos, lixo, fertilizantes agrícolas ou despejos industriais. Segundo os levantamentos da CETESB (2006), nenhuma amostra ultrapassou o padrão de potabilidade recomendado;

-sólidos totais dissolvidos (TDS): de 140 amostras analisadas, 66% encontram-se no intervalo entre 100 e 200 mg/l, enquanto que 27% entre 200 e 300 mg/l. Estas concentrações variando, refletiriam heterogeneidades nos solos e litologias;

-condutividade elétrica: de 157 análises, 100% apresentaram valores inferiores a 290 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

-oxigênio consumido: todas as análises apresentaram valores inferiores a 2,5 mg/l, sendo que a grande maioria ficou abaixo de 1,0 mg/l;

-coliformes fecais e totais: de 162 análises, 29% acusaram a presença de coliformes totais e 14% de fecais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Características Hidráulicas dos Poços

Neste item serão analisadas e discutidas algumas das principais características hidráulicas em poços artesianos como o nível estático e a espessura da Zona não Saturada e Zona Saturada. O nível estático não somente em São José do Rio Preto, mas em todas as cidades onde poços tubulares são utilizados para o abastecimento doméstico e industrial, tem sofrido grandes variações nas últimas décadas. A Figura 27 ilustra de forma geral e simplificada estes parâmetros na área de estudo.

No total, foram utilizados 168 poços no Aquífero Bauru, inclusos nestes os poços amostrados de RP-1 a RP-50 (Anexos 1, 2 e 3). Apesar de muitos dos poços no Aquífero Bauru não apresentarem dados relativos ao nível estático, nível dinâmico, vazão, profundidade construtiva, cota topográfica, dentre outros, prejudicando a análise hidrogeológica, foram plotados em mapa (Anexos 4 e 5) os poços amostrados, para que assim fosse possível analisar a sua distribuição e concentração na área do município de São José do Rio Preto (SP).

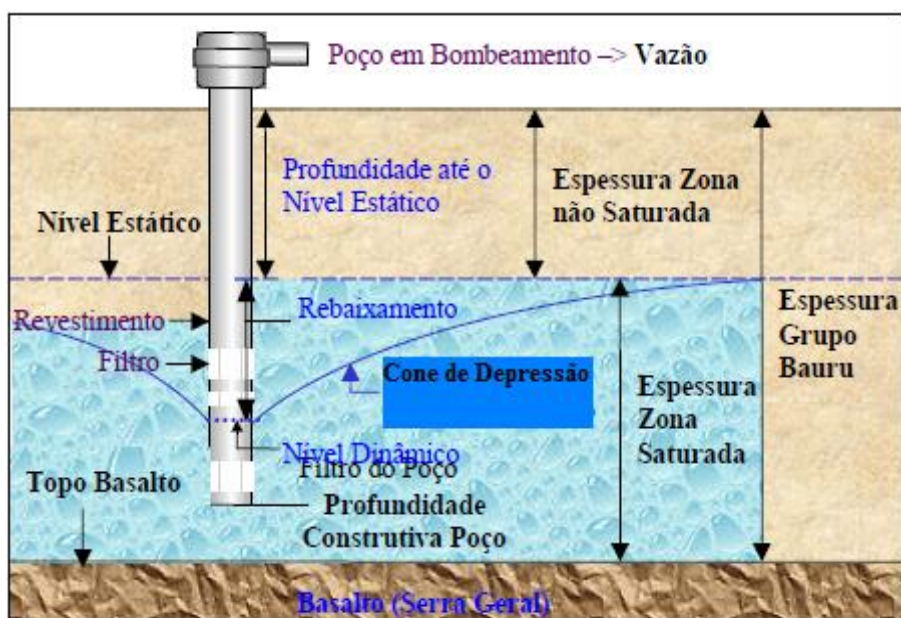


Figura 27: Parâmetros hidráulicos dos poços tubulares na área de estudo (LIMA, 2004).

Considerando-se o universo de 3.500 poços particulares existentes (segundo as estimativas de BARCHA, 1992), constata-se que a disponibilidade de informações é

ainda muito pequena, embora a maioria dos poços particulares operarem a baixas vazões e em regime curto de bombeamento, apenas para o consumo doméstico.

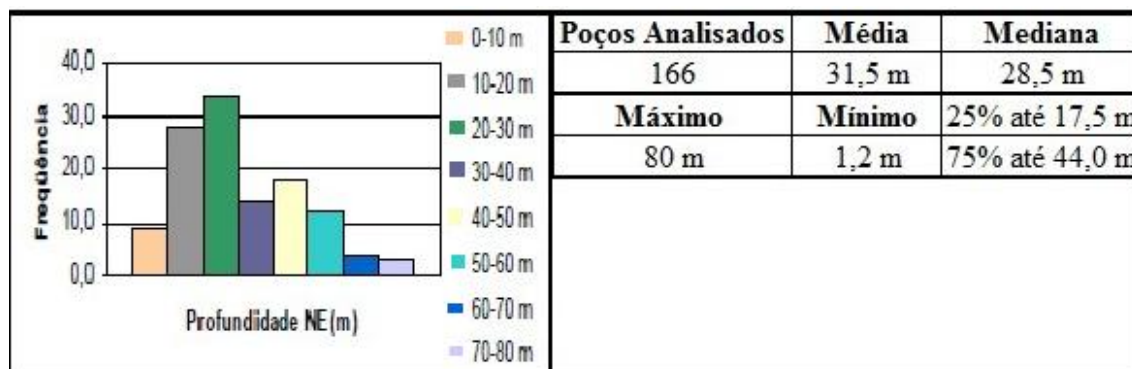
6.1.1. Nível Estático

Na análise da profundidade do nível estático, dos 390 poços cadastrados no Aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto (SP) (Anexo 1 e 2), apenas 168 destes apresentavam dados relativos à profundidade do nível estático, sendo que ainda 2 poços foram descartados (poços: 47 e 218), por não apresentarem dados coerentes com o esperado para o local (poços cadastrados como jorrantes). Dessa forma, utilizaram-se 166 poços para análise do nível estático, dos quais 50 (RP-1 à RP-50) foram empregados para as análises químicas e de radioatividade do radônio e rádio.

Cabe ressaltar ainda que, por se tratar de um aquífero livre, os dados de nível estático foram analisados conjuntamente, tanto para os poços que atravessam apenas o Grupo Bauru, como para aqueles que atingem a Formação Serra Geral, seja superficialmente como parcialmente (máximo de 56 metros de acordo com os dados obtidos neste trabalho).

Observa-se pela análise do nível estático um valor médio de 31,5 metros de profundidade (Tabela 6.1.1), o qual, no entanto, está sujeito a variações de bombeamento de poços vizinhos, imprecisão na medição, e até mesmo ao período do ano (variação sazonal) em que foi tomada a medida.

Tabela 6.1.1: Histograma e dados estatísticos do nível estático em São José do Rio Preto.



Pela análise do histograma (Tabela 6.1.1), observa-se que 25% dos valores apresentam um máximo de 17,5 metros de profundidade e 75% apresentam valores máximos de 44,0 metros de nível estático.

A grande variação nos valores de nível estático (mínimo de 1,2 e máximo de 80,0 metros) pode estar ligada ao fato dos poços analisados estarem concentrados na sua grande maioria na área urbana do município. O local conta com centenas de poços, que podem estar provocando uma super exploração no Aquífero e, conseqüentemente, alteração do nível estático, mas também poços podem estar em regiões de lineamentos estruturais o que pode estar ocasionando os rebaixamentos.

Outro fator que poderia estar contribuindo para a variação de valores é o fato de que a maioria dos perfuradores não apresentam medidores adequados de nível d' água, isto é, o NE é medido com ferramentas inadequadas, ocasionando, assim, valores fora do esperado para a região.

Os poços que apresentaram valores de nível estático foram plotados em mapa, sendo traçada a curva de isovalores para a profundidade do NE na área de estudo (Figura 28).

Pode-se observar pela análise da Fig. 28, que nas regiões mais baixas (vales), a profundidade do nível estático diminui, aumentando progressivamente em regiões mais altas (espigões), o que é esperado para um aquífero que apresenta comportamento livre.

Na porção central da área urbana do município de São José do Rio Preto, no cruzamento do córrego da Canela com o rio Preto, ponto de captação superficial de água para abastecimento público, observam-se valores muito baixos para o nível estático. Assim esta região merece atenção especial, uma vez que nela se concentram diversos poços de captação de água subterrânea utilizados para o abastecimento público, além de ser o ponto de captação de água superficial (rio Preto).

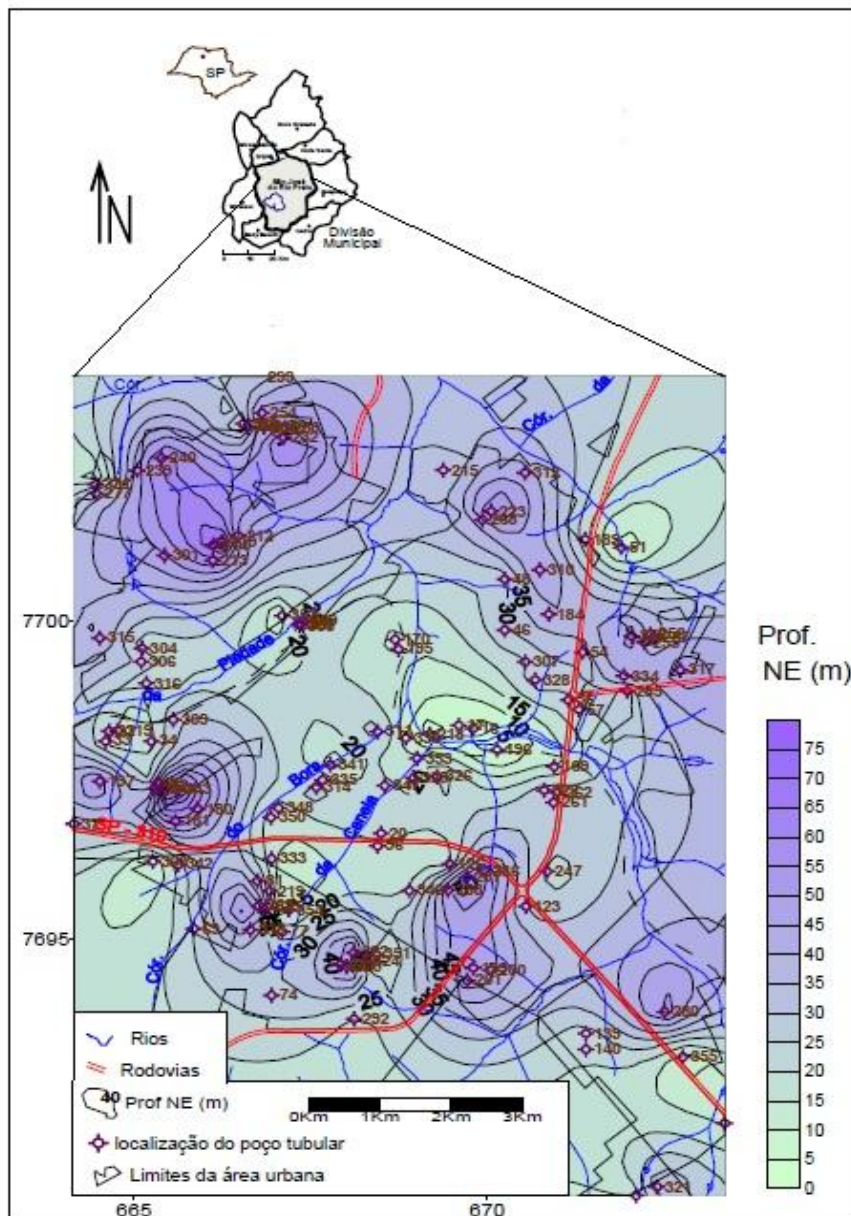


Figura 28: Mapa de isolinhas da profundidade do nível estático na área urbana do município de São José do Rio Preto - SP.

Em se tratando de um Aquífero livre, vulnerável a agentes poluidores superficiais, a análise da profundidade do nível estático é de extrema importância, uma vez que em áreas onde a profundidade do nível for maior, estas poderão apresentar melhores condições à instalação de empreendimentos potencialmente poluidores, visto que a trajetória do contaminante até a água subterrânea será maior.

Cabe ressaltar que outros fatores também devem ser analisados na escolha dos locais mais adequados para as instalações dos empreendimentos potencialmente poluidores, não devendo apenas utilizar-se do mapa de nível estático aqui apresentado.

Visando analisar o comportamento do fluxo subterrâneo na área de estudo, a fim de sugerir medidas adequadas quanto ao uso dos recursos hídricos e analisar a quantidade de água em cada poço amostrado e sua influência na concentração de radônio e rádio, traçou-se o mapa potenciométrico (Anexo 5) com as principais direções do fluxo subterrâneo.

Para que o mapa potenciométrico pudesse representar de forma mais real possível a cota da profundidade do nível estático e o sentido do fluxo subterrâneo, foram traçadas as equipotenciais de isovalores para a cota do nível estático, respeitando-se as principais drenagens que ocorrem na região.

Posteriormente à ação descrita, traçaram-se as linhas de isovalores para a cota do nível estático com o programa *Surfer 9.0*. Com o auxílio do mesmo software, as curvas de isovalores de nível estático e o sentido do fluxo de água foram reeditados, podendo-se, assim, como produto final, obter o mapa potenciométrico com as linhas preferenciais de direção do fluxo subterrâneo (Anexo 5).

Observa-se pela análise do mapa potenciométrico que as isolinhas acompanham o desenvolvimento da topografia, fazendo com que o fluxo subterrâneo percorra um sentido que vai das cotas topográficas mais altas para as mais baixas, alimentando a rede de drenagem local como os córregos e o rio Preto.

Analisando-se o mapa potenciométrico, foi observado que poços próximos como RP-25 e RP-31, com a mesma cota topográfica, apresentam uma diferença de aproximadamente 30 metros em relação à cota do nível estático, mostrando que nesta região há uma exploração não adequada da água subterrânea ou também o poço RP-25, por estar próximo a um lineamento estrutural, pode estar em uma região de falhas. (Anexos 2, 4 e 5).

O mesmo ocorre com os poços próximos RP-13 e RP-17, que estão localizados na cota de 530 metros, mas possuem uma diferença menor da cota do nível estático de 7 metros, mostrando uma exploração inadequada da água na região central de São José do Rio Preto, e neste caso não há falhamentos na região como pode ser visto no esboço geológico (Anexos 2, 4 e 5).

O poço amostrado RP-10 está localizado próximo à área de recarga, recebendo maior aporte de água infiltrada; e possui uma das maiores cotas de nível estático do município estudado, que é de 500 metros.

Constatou-se, de forma geral, que o nível freático alimenta as principais drenagens do local, sendo assim, a possível construção de poços de monitoramento, para diversas finalidades, devem ser locadas, considerando a direção que o fluxo subterrâneo apresenta no local. Portanto, é imprescindível o auxílio de mapas potenciométricos, com as principais direções do fluxo subterrâneo, principalmente nos locais onde ocorrem empreendimentos potencialmente poluidores e também poços onde a radioatividade devido ao radônio pode ser elevada em São José do Rio Preto, em virtude do fluxo de água ser maior numa determinada região do município.

De acordo com a sua localização em zonas, a água de subsuperfície classifica-se em saturada e não saturada (GUYMON, 1994). A zona não saturada é conceituada como a camada que ocorre entre a superfície do terreno e o topo do aquífero livre (nível estático), também chamada de “zona de aeração”, que implica no fato de que ar e água coexistem na zona não saturada.

Na área estudada, a espessura da zona não saturada correlaciona-se diretamente com a profundidade do nível estático, dessa forma, os resultados obtidos na análise do nível estático são válidos também para a espessura da zona não saturada. A zona não saturada é de extrema importância nos estudos hidrogeológicos de aquíferos livres, pois esta, além de representar a camada natural protetora contra os agentes poluidores, representa também o caminho percorrido pela água no mecanismo de recarga do aquífero.

No geral, pode-se dizer que quanto maior a espessura da zona não saturada, maior será o tempo de percurso do escoamento vertical da superfície do terreno até a zona saturada.

Analisando-se ainda o mapa potenciométrico (Anexo 5), as cotas que apresentam maiores valores numéricos estão localizados nas regiões em que a zona não saturada se apresenta de forma mais espessa (espigões). Sendo assim, estas regiões podem estar mais apropriadas para receber possíveis instalações de empreendimentos considerados poluidores.

É importante destacar e frisar que a análise isolada deste aspecto não possibilita uma tomada de decisão para o caso descrito, visto que outros também deverão ser analisados no caso das áreas densamente povoadas.

6.2. Classificação das Águas Subterrâneas e Balanço Iônico

Para a classificação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru foram utilizadas 50 amostras (Anexos 2 e 6), distribuídas na área de pesquisa conforme o mapa da localização dos poços no Anexo 4. A classificação hidroquímica foi feita com auxílio do diagrama de Piper, que foi confeccionado através do software Qualigraf, passando os dados de mg/l para meq/l os quais são recalculados para % (Figura 29).

Conforme o diagrama da Figura 29, as águas predominantes na área de pesquisa são as bicarbonatadas sódicas (64%) e bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (34%); secundariamente, aparecem as águas sulfatadas ou cloretadas sódicas (2%), sendo que nesta está contida apenas a amostra RP-10.

Os diagramas de Stiff (Anexo 7) das amostras analisadas também confirmam que as águas na sua maioria são bicarbonatadas sódicas como no caso das amostras RP-24, RP-28, RP-29, RP-32 e RP-34, cujas maiores salinidades concentram-se em área de afloramento da Formação Adamantina. As amostras bicarbonatadas cálcicas e magnesianas como a RP-45 e RP-47, mesmo possuindo valores muito baixos em meq/l, aparecem também na área de estudo como é verificado tanto no diagrama de Piper como de Stiff.

O cálculo de balanço iônico foi realizado com a utilização da fórmula definida por Logan (1965) através do software Qualigraf, que define o coeficiente individual de erro das análises, admitindo-se um valor máximo de 10% para análises aproveitáveis. Este valor percentual está associado ao valor da condutividade elétrica.

Numa análise hidroquímica completa, a concentração total dos cátions deve ser aproximadamente igual à concentração total dos ânions, onde o desvio percentual desta igualdade é dado pelo coeficiente de erro da análise (E%) obtido da equação:

Onde:

$$E = \left| \frac{r \sum A - r \sum C}{r \sum A + r \sum C} \right| \times 100$$

$r \sum A$ = Concentração total de ânions, em meq/L
 $r \sum C$ = Concentração total de cátions, em meq/L
E = erro das análises (%)

De acordo com a equação verificamos que as análises apresentaram erros toleráveis, com uma média geral de 8,13%, inferiores a 10% para as amostras analisadas.

6.3. Principais Parâmetros Analisados

Os principais parâmetros analisados neste estudo foram expressos em termos de valores máximos, médios e mínimos e sua distribuição espacial foi investigada com auxílio de mapas de isovalores gerados pelo programa *Surfer 10.0*. O método geoestatístico utilizado para a confecção dos mapas de isovalores foi a krigagem. As concentrações iônicas e de sólidos totais dissolvidos foram expressas respectivamente em meq/l e mg/l, e a condutividade elétrica em $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Foram utilizadas 50 amostras de águas subterrâneas do Aquífero Bauru, coletadas de poços profundos, utilizados para abastecimento público (Anexo 6).

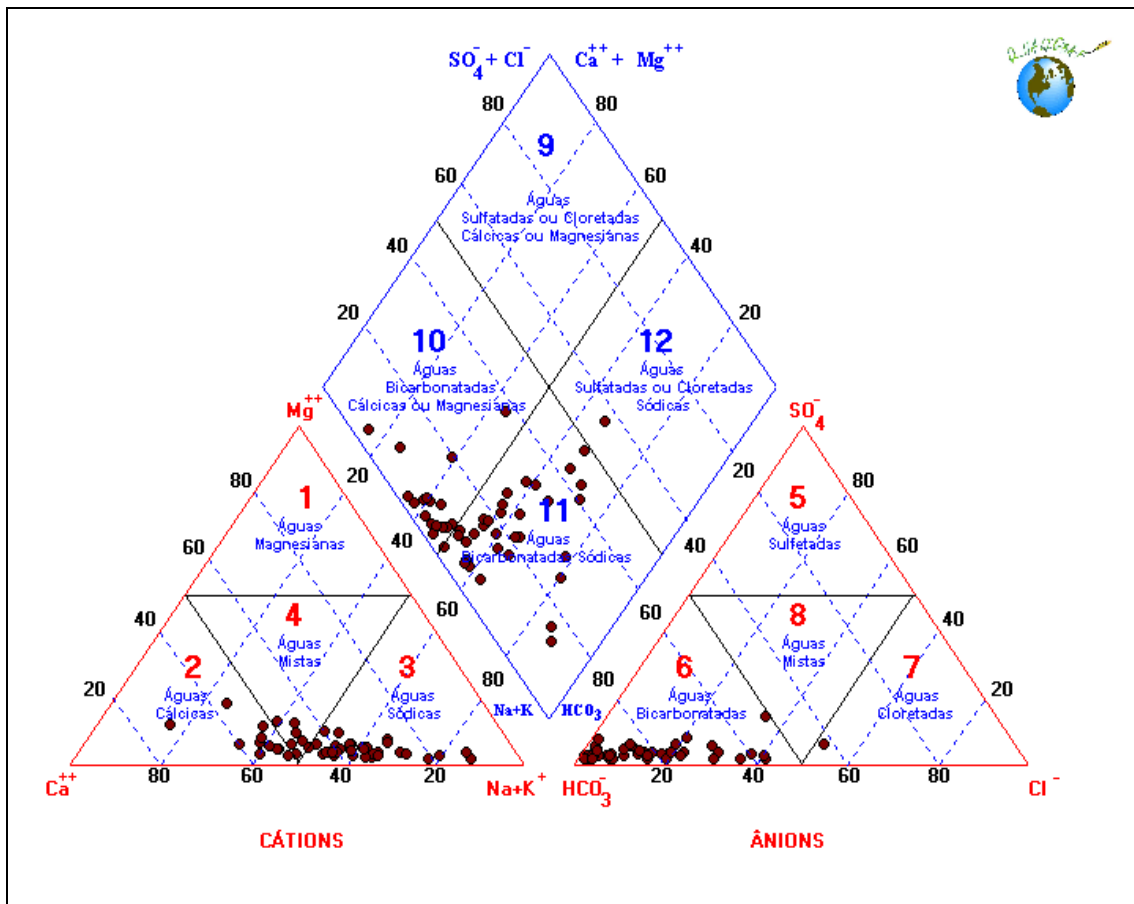


Figura 29: Diagrama de Piper das 50 amostras analisadas no município de São José do Rio Preto (SP).

6.3.1. pH, Condutividade elétrica e STD

O pH médio das 50 amostras foi de 10,51 (pH > 7 = básico), sendo que o maior valor registrado foi de 13,4 para a amostra RP-14 (Anexo 6). O mapa de isovalores mostra que os maiores valores se encontram na região oeste do município estudado. Observando os mapas de isovalores de profundidade do N.E. e do pH, foi notado que conforme a profundidade aumenta como nas regiões sudoeste e sudeste, o pH fica mais próximo da neutralidade, isto é, nestas localidades temos rochas com menos quantidade de nódulos ou cimentos carbonáticos e mais arenosas (Figura 30).

Já para a condutividade elétrica, obteve-se um valor médio de 273,88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na cidade de São José do Rio Preto. O maior valor foi de 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para amostra RP-16 (Anexo 6). Portanto, a maior quantidade de íons dissolvidos na água ocorre na área comercial de São José do Rio Preto. O mapa de isovalores da condutividade elétrica mostra que os maiores valores estão localizados principalmente na faixa central do município (Figura 30). Foi observado na fig. 30 que as regiões com maiores valores de condutividade estão em regiões com menor profundidade de N.E., nestes locais mais próximos da superfície, temos uma maior quantidade íons dissolvidos em água.

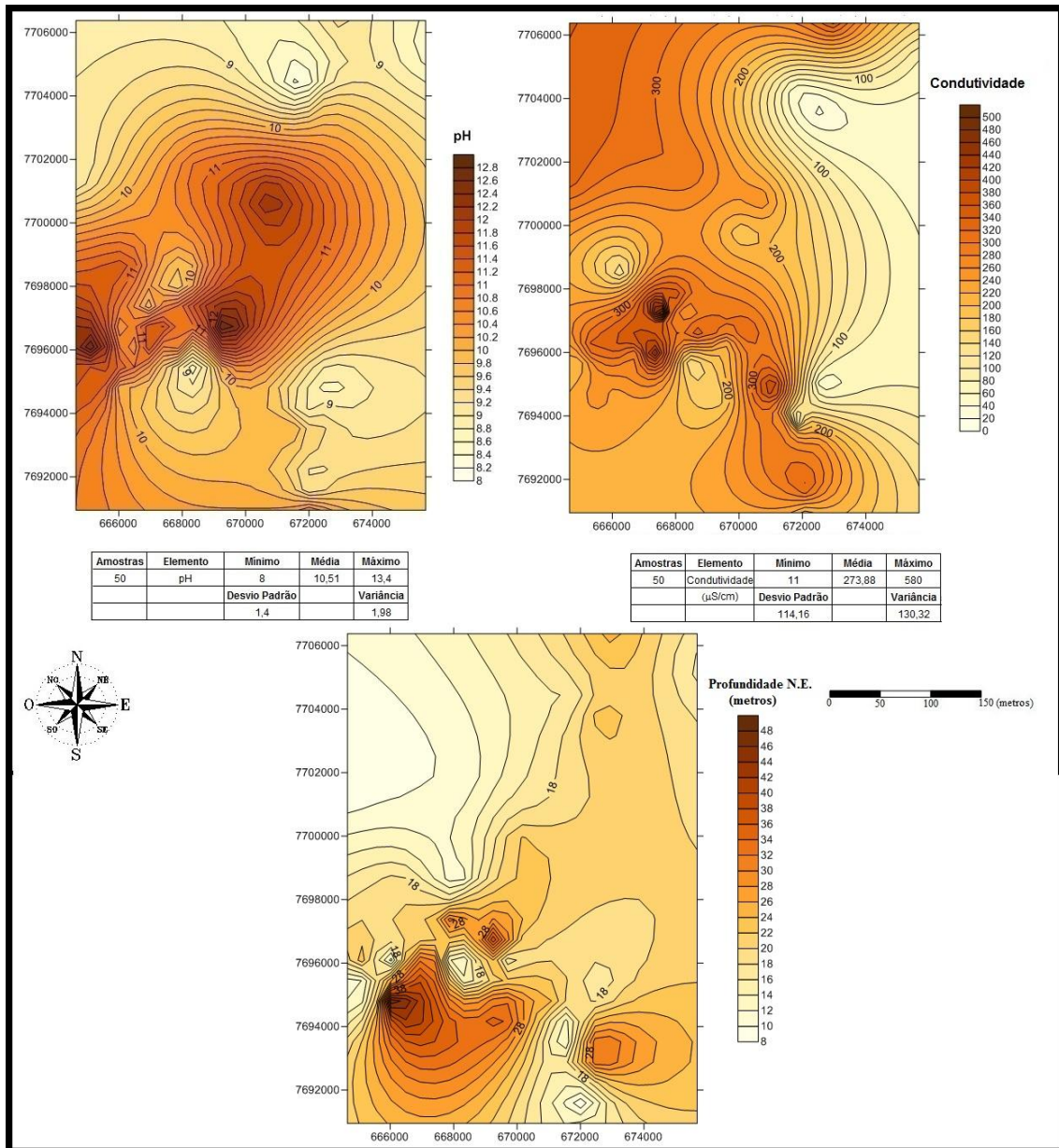


Figura 30: Mapa de isovalores e dados estatísticos de pH, Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e profundidade do nível estático para as 50 amostras na área de estudo.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) foram calculados através da condutividade elétrica (em $\mu\text{S}/\text{cm}$) multiplicada pelo fator de 0,65 (Anexo 6), utilizando o software Qualigraf. O maior valor encontrado de STD foi de 377,0 mg/l para a amostra RP-16 (Anexo 6). Para as 50 amostras analisadas foi identificado o tipo de água quanto à potabilidade em São José do Rio Preto (Figura 31).

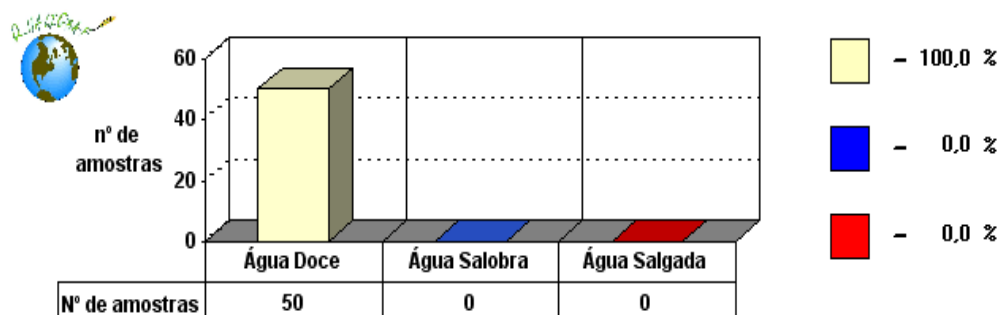


Figura 31: Tipo de água de São José do Rio Preto nos poços amostrados.

Observando-se a Fig. 31, verifica-se que a água nas 50 amostras analisadas é doce, portanto, servindo para o consumo pela população local.

Na Portaria Nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011, o limite máximo de STD é de 1000 mg/l, sendo que na área estudada, todas as amostras analisadas estão muito abaixo deste limite, evidenciando que a água de São José do Rio Preto não possui minerais em excesso que poderiam prejudicar a saúde da população.

6.3.2. Carbonatos, Bicarbonatos e Nitrato

Nas análises realizadas nas 50 amostras recolhidas em poços de São José do Rio Preto, somente foi detectado em laboratório os bicarbonatos, isto é, o ânion HCO_3^- . Quimicamente são resultantes de uma reação de salificação parcial. O valor médio dos bicarbonatos foi de 1,49 meq/l. Neste caso foi feito um mapa de isovalores para observar a sua concentração no município estudado (Figura 32).

Foi observado no mapa de isovalores que os maiores valores de alcalinidade estão na região sudeste e oeste da área de estudo. Notou-se também que as regiões de maiores concentrações de condutividade e bicarbonatos são coincidentes, em São José do Rio Preto, isso se deve a maior quantidade destes íons dissolvidos em solução, fazendo com que nas regiões onde temos bicarbonatos, sulfatos, silicatos e cloretos a condutividade seja maior (Figuras 30 e 32).

O nitrato pode ser formado pela ação do ácido nítrico sobre os óxidos metálicos, hidróxidos e carbonatos, nesses derivados o nitrogênio é pentavalente positivo. A partir dos valores medidos em laboratório, obteve-se uma média de 0,089 meq/l (1,20 mg/l). A Portaria Nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 estabelece que o limite máximo de

nitrato em água é de 10 mg/l. Portanto, para as amostras analisadas no município estudado, o valor está abaixo do máximo permitido.

Os maiores valores de nitrato estão em duas regiões, a nordeste e na região central da área estudada, como pode ser observado no mapa de isovalores (Figura 32). As amostras RP-10 e RP-50 possuem valores acima de 0,260 meq/l (3,0 mg/l) (Anexo 6), que podem ser atribuídos ao uso de fertilizantes ou entrada de esgotos domésticos nos poços.

6.3.3. Cloreto e Sulfato

O cloreto em química inorgânica é uma espécie iônica formada por um átomo de cloro carregado negativamente, com estado de oxidação -1. Por extensão é um composto iônico formado por este ânion ou com uma estrutura formalmente similar, ou seja, com ligação covalente entre um átomo de cloro e um elemento menos eletronegativo. Na área de estudo, este apresentou um valor médio de 0,287 meq/l (8,17 mg/l). O maior valor analisado foi de 0,691 meq/l (24,5 mg/l), tanto para amostra RP-16 como para RP-26 (Anexo 6).

O sulfato é o íon SO_4^{2-} , consistindo de um átomo central de enxofre ligado por ligações covalentes a quatro átomos de oxigênio. O ânion sulfato apresenta estado de oxidação 2-. Foi constatado em São José do Rio Preto o valor médio de 0,036 meq/l (1,74 mg/l) para este íon. O maior valor encontrado foi na amostra RP-32 de 0,250 meq/l (12 mg/l), que é discrepante em relação aos das demais amostras, podendo estar relacionado com o uso de ácido sulfúrico ou algo similar na região do poço RP-32 (Anexo 6).

Também foram confeccionados os mapas de isovalores, que mostram as variações das concentrações de cloreto e sulfato no município estudado (Figura 32).

Observa-se que os maiores valores para Cl^- e sulfato é nas regiões sul e oeste. Isto pode ser devido à maior utilização desses elementos tanto na indústria como para diminuir os coliformes fecais na água para o consumo humano. A Portaria Nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 estabelece que o limite máximo de cloreto é de 250 mg/l assim como para o sulfato, sendo que em São José do Rio Preto os valores de todas as amostras analisadas para estes ânions estão muito abaixo deste limite. Porém, para as amostras que contêm pouco cloreto (abaixo de 2 mg/l) há o risco de ocorrer elevadas concentrações de coliformes fecais na água, causando problemas de saúde à população.

As regiões de maiores concentrações de sulfato coincidem com os menores valores de profundidade do N.E, evidenciando que este íon ocorre em solução devido alterações de sulfetos próximos a superfície (Figuras 30 e 32).

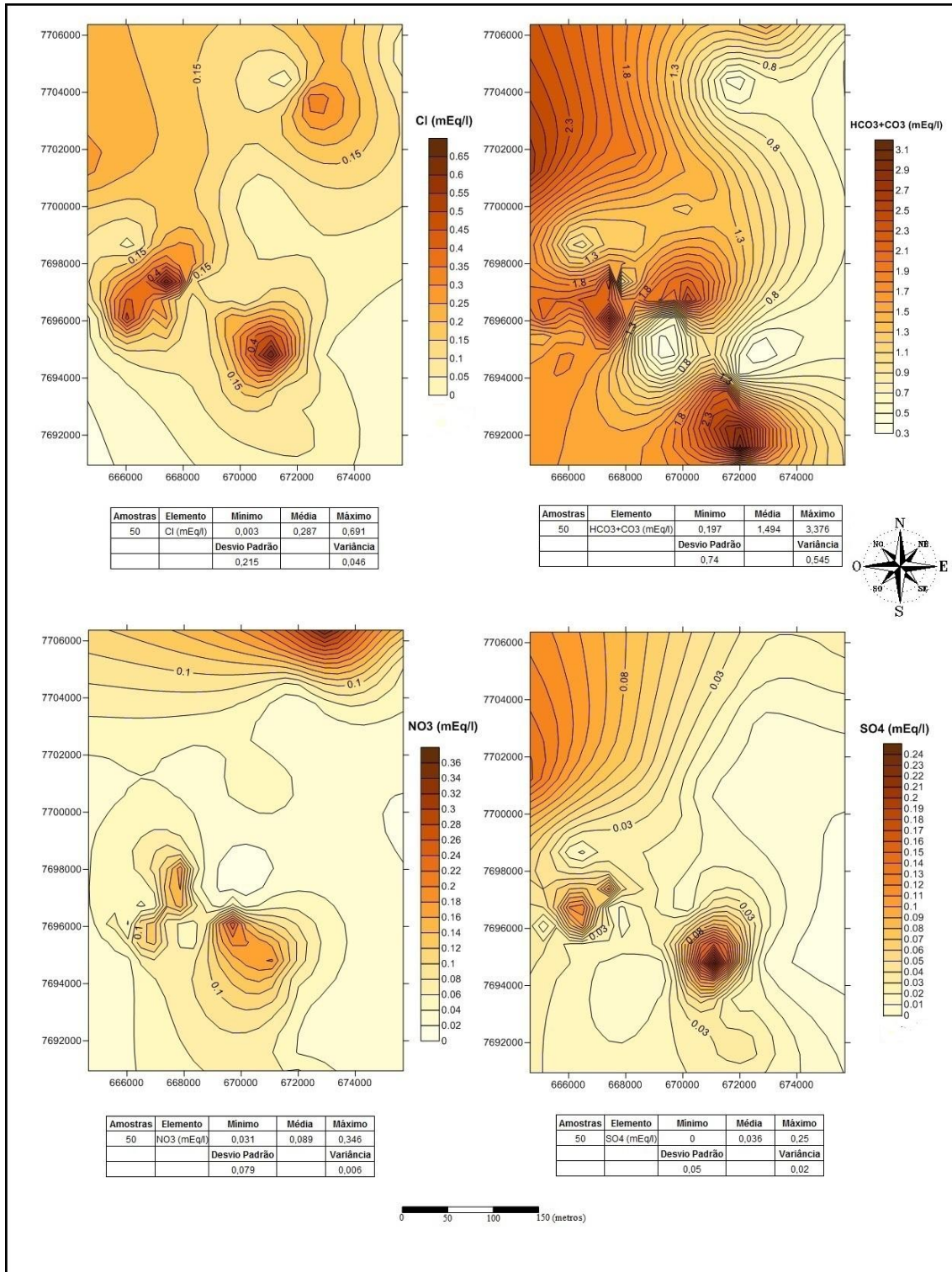


Figura 32: Mapas de isovalores e dados estatísticos dos ânions estudados nas 50 amostras.

6.3.4. Cálcio e Magnésio

O elemento cálcio é metálico, pertencente ao Grupo II, dos metais alcalino-terrosos da Tabela Periódica. Os compostos de cálcio são comuns na crosta terrestre, por exemplo, no calcário, mármore (CaCO_3), gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) e fluorita (CaF_2). Nas amostras estudadas o valor médio de cálcio foi 0,309 meq/l, sendo que a amostra RP-32 apresentou o maior valor (0,574 meq/l) (Anexo 6).

O elemento magnésio também é metálico. É encontrado em vários minerais incluindo magnesita (MgCO_3), dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) e carnalita ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$). Também está presente na água do mar e é um elemento essencial aos organismos vivos. Nas 50 amostras, o valor médio calculado foi de 0,028 meq/l, sendo o maior valor observado para este elemento de 0,083 meq/l na amostra RP-46 (Anexo 6).

Para observar se há relação entre o cálcio e os ânions estudados neste trabalho, foram feitos testes estatísticos de correlação no programa Excel (Figura 33). Entre o cátion cálcio e o ânion sulfato há correlação positiva, talvez relacionada com a existência de argilitos na área de estudo, com possível existência do mineral gipsita na Formação Adamantina.

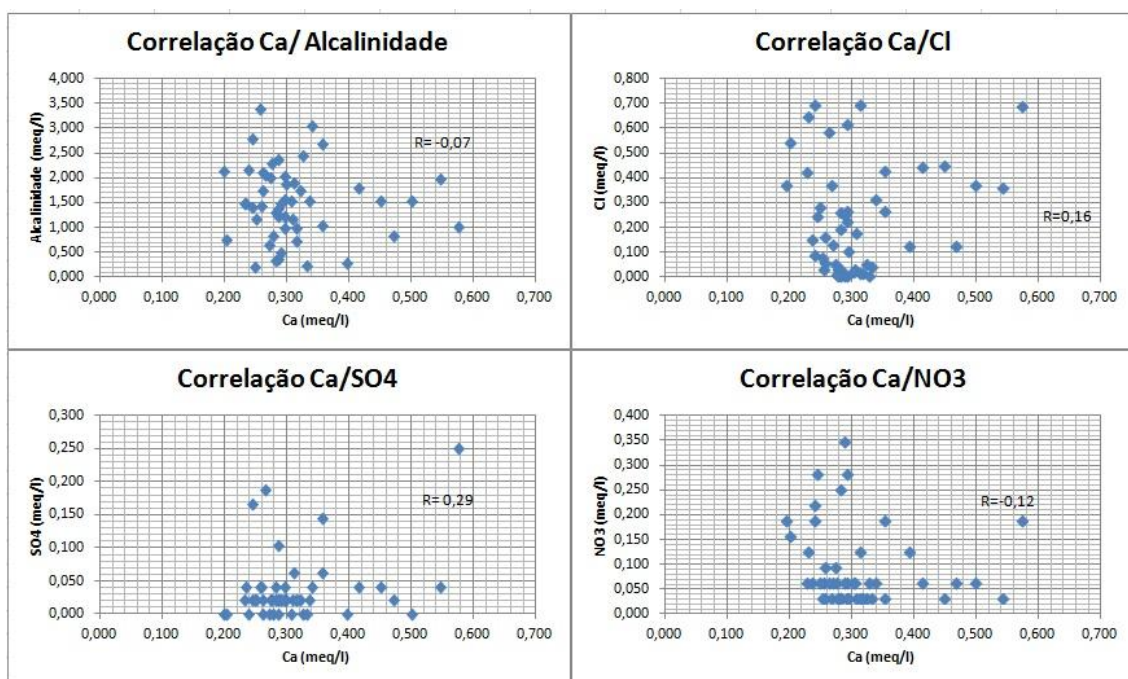


Figura 33: Correlações entre o cátion cálcio e os ânions estudados neste trabalho.

Do mesmo modo, foram feitos testes estatísticos de correlação entre o magnésio e os ânions SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- e CO_3^{2-} (Figura 34), não existindo correlação entre eles.

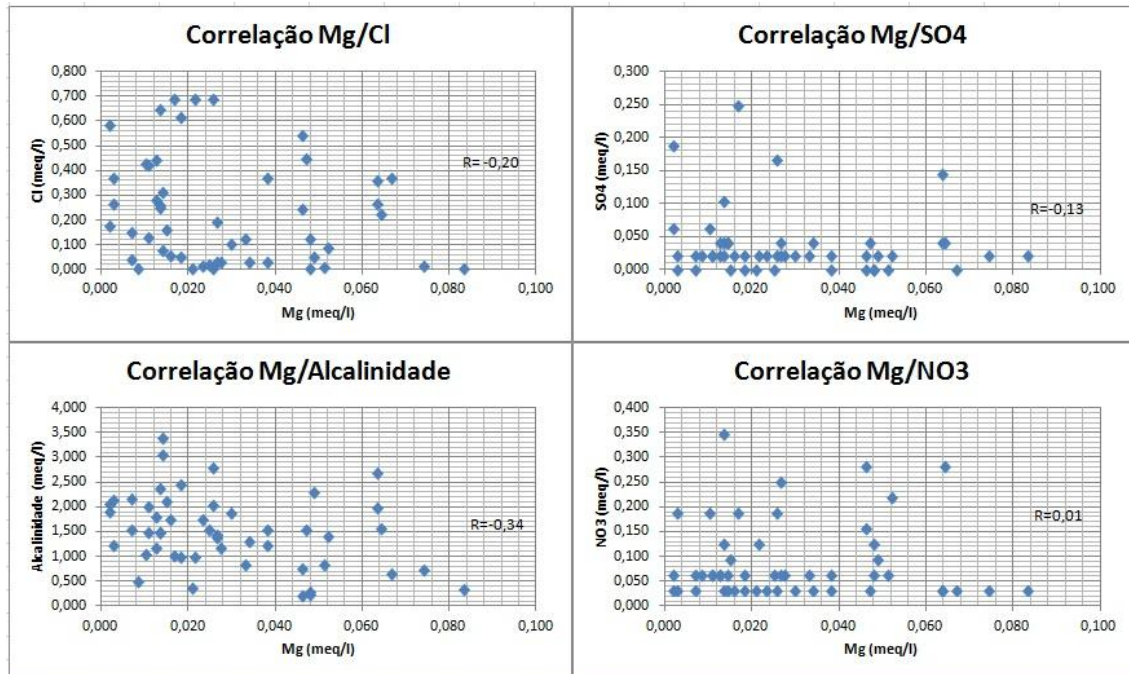


Figura 34: Correlações entre magnésio e os ânions estudados na área estudada.

Para analisar a dispersão de Ca e Mg na área de estudo, foram confeccionados os mapas de isovalores destes elementos (Figura 35).

O mapa de isovalores mostra que os maiores valores de cálcio estão na região sudeste de São José do Rio Preto. Quanto maior a quantidade de cálcio na água subterrânea maior será a dureza desta água. Já o magnésio se concentra em duas regiões do município, a norte e a sudoeste.

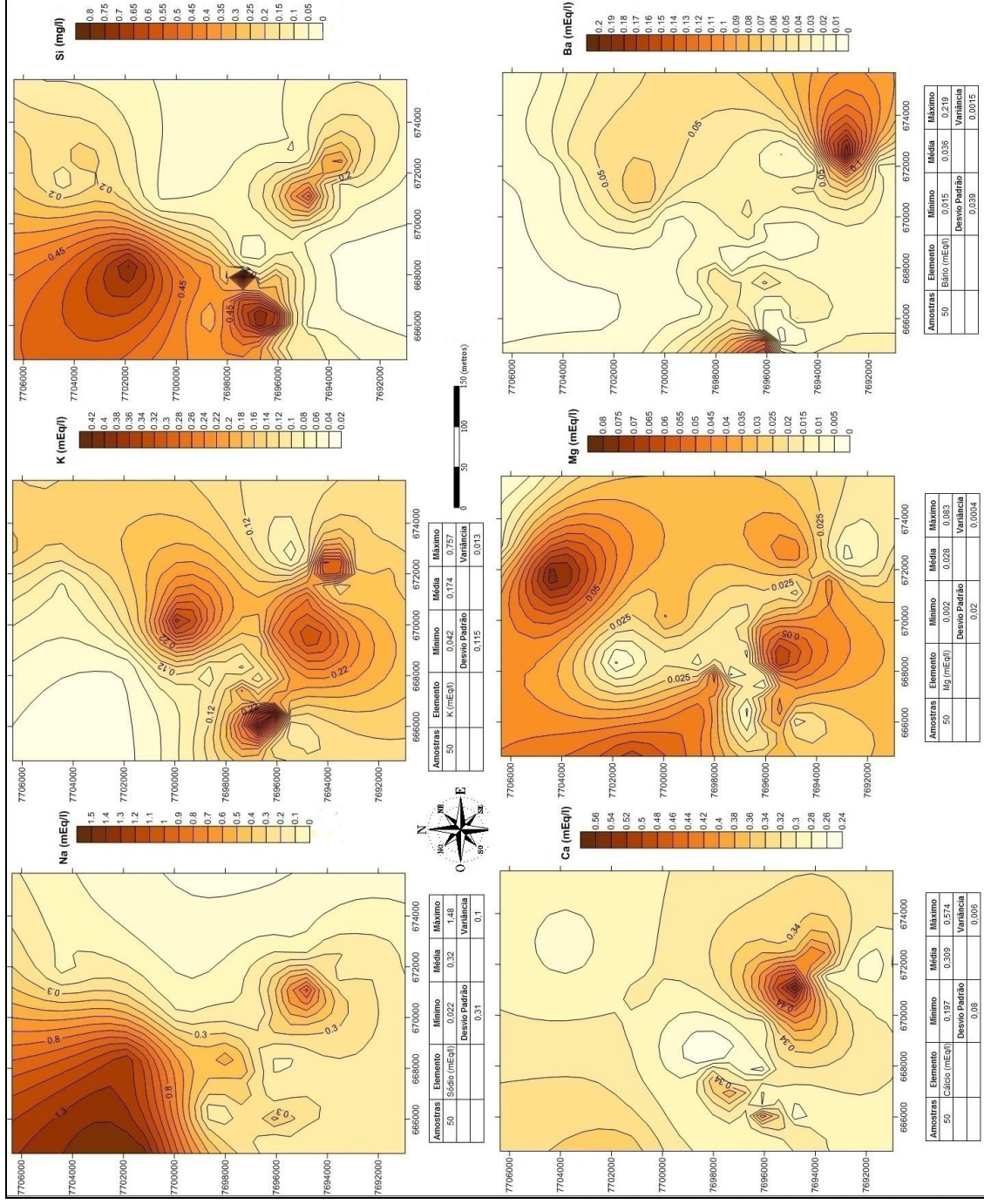


Figura 35: Mapas de isovalores e dados estatísticos dos cátions estudados nas 50 amostras.

6.3.5. Bário e Sódio

O elemento bário é reativo, pertencente ao grupo dos metais alcalino-terrosos da Tabela Periódica. Ocorre na natureza nos minerais barita (BaSO_4) e witherita (BaCO_3). Este elemento se oxida rapidamente no ar e reage com etanol e água. Compostos solúveis de bário são extremamente venenosos. Em São José do Rio Preto, o valor médio notado foi de 0,036 meq/l (2,5 mg/l), sendo que o limite máximo permitido pela Portaria N° 2.914 de 12 de dezembro de 2011 é de apenas 0,7 mg/l. Nota-se um valor muito maior que o permitido no município de São José do Rio Preto, podendo ocasionar sérios riscos à saúde humana, pois este elemento é tóxico. Os poços das amostras RP-11 e RP-21 estão em área de maior risco no município, pois, seus valores foram maiores que 0,200 meq/l (10,0 mg/l) (Anexo 6). Os valores elevados de bário na área estudada podem ser devido à dissolução de barita e/ou feldspatos potássicos ricos em bário. Tanto no trabalho de Barcha (1998) e como de Savazzi (2008), os valores de bário variaram de 1,0 mg/l à 5,0 mg/l, evidenciando uma concentração deste elemento acima do permitido na área estudada.

O mapa de isovalores do bário mostra que as maiores concentrações estão na região sudeste de São José do Rio Preto (Figura 35).

No caso do bário, também foram feitos testes estatísticos de correlação com os ânions estudados neste trabalho (Figura 36).

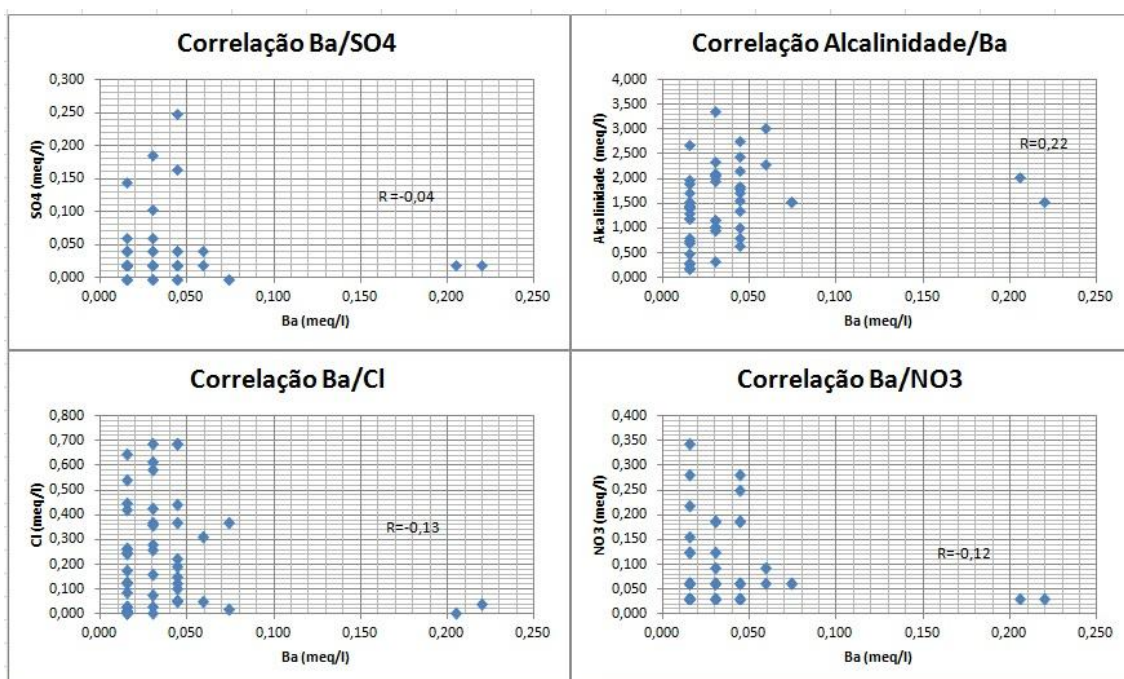


Figura 36: Correlações entre o bário e os ânions estudados na região de São José do Rio Preto.

A correlação do bário e sulfato é insignificante neste trabalho, confirmando a insolubilidade de sulfato de bário em água e etanol. Além disto, as correlações de bário com cloreto e nitrato são pouco expressivas, pois as regiões de maiores valores nos mapa de isovalores não são as mesmas (Figuras 32 e 35).

O sódio é um elemento químico de símbolo Na. É um metal alcalino, sólido na temperatura ambiente, macio, de coloração branca a ligeiramente prateada. É muito abundante na natureza, encontrado no sal marinho e no mineral halita. Nas 50 amostras analisadas seu valor médio foi de 0,32 meq/l (8,61 mg/l), sendo que o maior valor encontrado foi de 1,48 meq/l para a amostra RP-29 (Anexo 6). Na Portaria N° 2.914 de 12 de dezembro de 2011, o seu limite máximo é de 200 mg/l, evidenciando que a concentração deste elemento está abaixo da máxima permitida na área estudada.

Foi feito um mapa de isovalores para representar a dispersão desse elemento na área municipal de São José do Rio Preto (Figura 35).

Observa-se pelo mapa de isovalores que, diferentemente dos demais constituintes analisados, o sódio é o único elemento que tem as maiores concentrações apenas na região noroeste de São José do Rio Preto, caracterizada por uma maior salinidade.

Foram realizados testes estatísticos de correlação entre o sódio e ânions estudados (Figura 37).

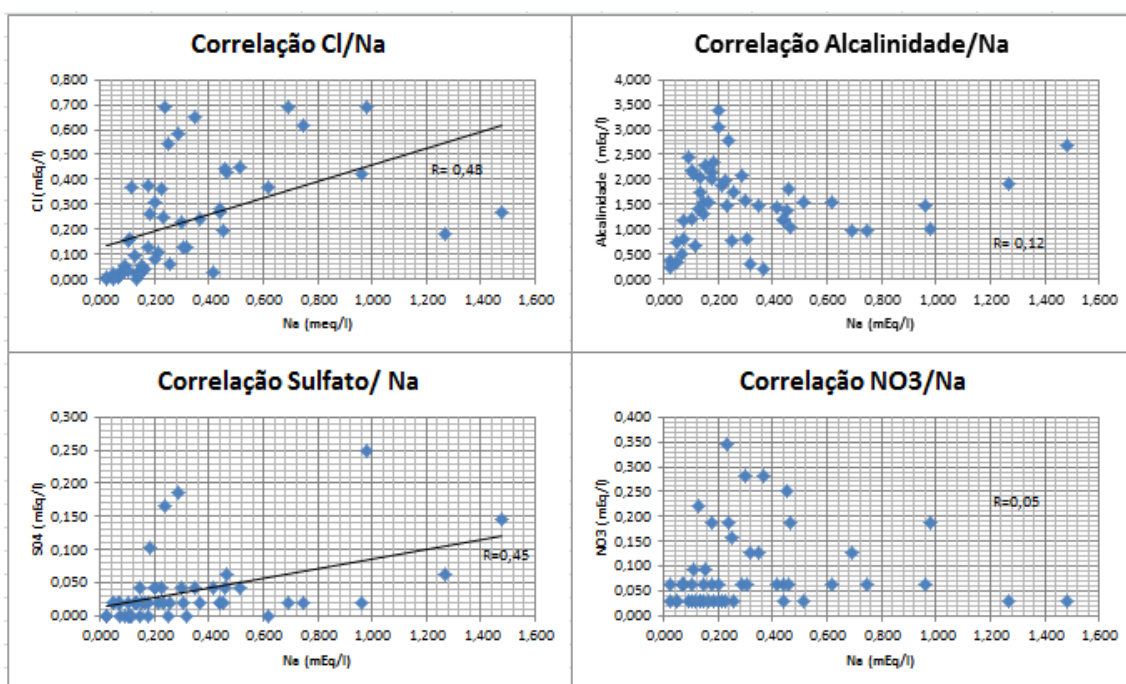
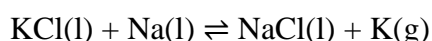


Figura 37: Correlações de sódio com os ânions analisados na área de estudo.

Há correlação positiva entre o cátion sódio e o ânion cloreto (mesmas áreas nos mapas de isovalores), formando o que popularmente chamamos de sal de cozinha nos poços estudados do Aquífero Bauru. O cloreto de sódio (NaCl) existente nestes poços (RP-1 à RP-50), deve ser por causa da existência de cloreto de potássio nos fertilizantes usados na agricultura e também devido a desagregação dos minerais de sódio contidos nas rochas do Grupo Bauru, temos sódio livre na água, podendo haver troca catiônica entre este e o potássio.



Outra hipótese para a formação do sal (NaCl) é a dissolução do mineral halita presente nas Formações do Grupo Bauru. Durante a formação do Grupo Bauru, ocorreram intercalações de climas mais úmidos com mais áridos, formando evaporitos.

A correlação entre sódio e sulfato também foi positiva, formando nas águas o que é denominado de sulfato de sódio (sal). Com a existência de hidróxido de sódio na água e com o uso do ácido sulfúrico pelo homem ou ocorrência das chuvas ácidas, pode-se ter a formação deste sulfato. O sulfato de sódio também poder ser formado pela dissolução de minerais sódicos e sulfatos das rochas encontradas na região, uma vez que as ligações químicas podem formar este sal em água.

6.3.6. Potássio e Sílica

O elemento potássio, com um valor médio de 0,174 meq/l (6,82 mg/l) em São José do Rio Preto, é metálico, prateado e mole, pertencendo ao grupo dos metais alcalinos da Tabela Periódica. Este elemento ocorre na água do mar e em vários minerais como a silvita (KCl), carnalita (KCl. MgCl₂. 6 H₂O) e carnita (MgSO₄. KCl. 3 H₂O). É obtido por eletrólise. O maior valor observado dentre as 50 amostras foi de 0,757 meq/l para a amostra RP-24 (Anexo 6).

A sílica refere-se aos compostos de dióxido de silício, SiO₂, nas suas várias formas, incluindo sílicas cristalinas, sílicas vítreas e sílicas amorfas. O dióxido de silício, SiO₂, é o composto binário de oxigênio e silício mais comum, que são os dois elementos mais abundantes na crosta da Terra. A sílica e seus compostos constituem cerca de 60% em peso de toda a crosta terrestre. O valor calculado médio de Si é de

8,40 mg/l, em São José do Rio Preto. O maior valor observado foi de 30,1 mg/l, na amostra RP-24 (Anexo 6).

Foram confeccionados os mapas de isovalores para estes elementos e tabelados os dados de sua avaliação estatística (Figura 35). Pelo mapa de isovalores, as maiores concentrações de potássio estão na região central e sul e as da sílica estão localizadas na região oeste e noroeste do município estudado. O silício presente na água é resultado da hidrólise de argilominerais, feldspatos potássicos e sódicos presentes no Grupo Bauru, já que as áreas de maiores concentrações destes elementos são próximas, como pode ser visto nos mapas de isovalores. No município estudado, devido ao $\text{pH} > 9,5$ em grande parte das amostras estudadas, o silício em solução se encontra na forma de um ânion carregado negativamente H_3SiO_4^- (ácido silícico). As regiões de maiores concentrações dos mapas de isovalores dos bicarbonatos e do ácido silícico são as mesmas, pois a alcalinidade elevada em água subterrânea é devida primeiramente a carbonatos e secundariamente a silicatos (Figuras 32 e 35).

Foi feita também análise estatística de correlação entre o potássio e os ânions estudados (Figura 38), não existindo correlação entre eles.

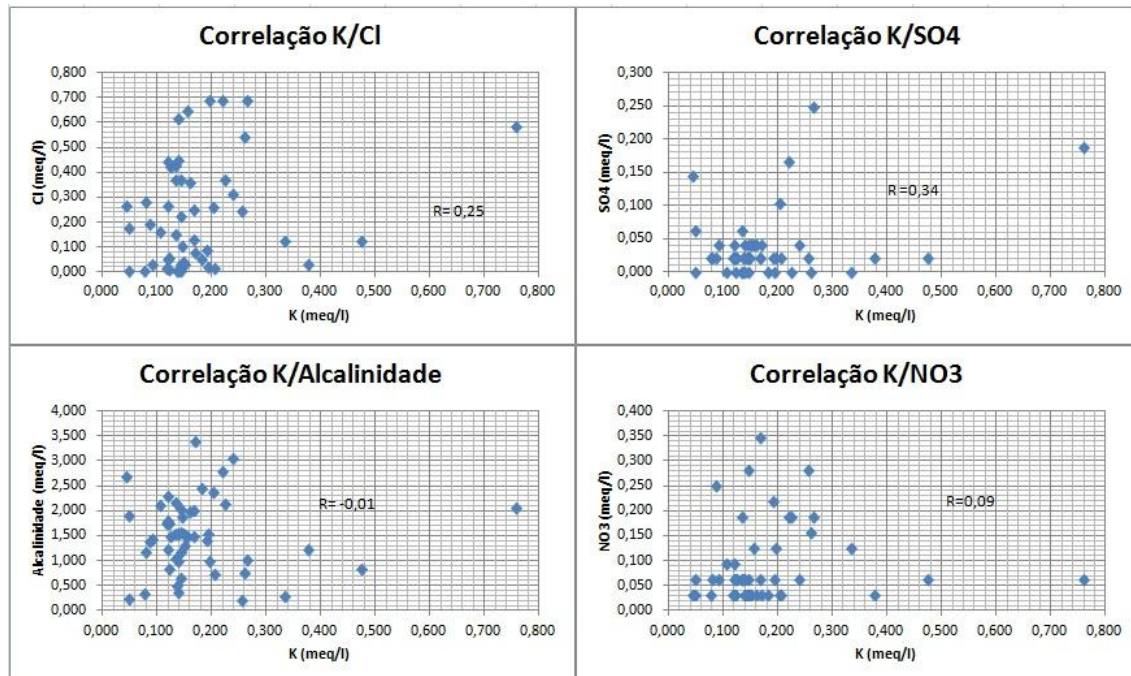


Figura 38: Correlações entre potássio e os ânions estudados em São José do Rio Preto.

As análises químicas e de correlação sugerem uma possível formação caso haja saturação de sais importantes como NaCl e sulfato de sódio, no Aquífero Bauru, no município de São José do Rio Preto, pois em solução aquosa somente temos íons (cátions e/ou ânions). Além disto, ocorrem bicarbonatos na água, que fica com um aspecto esbranquiçado, como observado durante as coletas das amostras.

6.4. Parâmetros Radiométricos

As coletas de amostras de água para análises do gás radônio e para o elemento rádio foram realizadas em São José do Rio Preto, em três etapas:

- Entre os dias 17 e 19 de janeiro de 2011 (coleta de 20 amostras);
- Nos dias 2 e 3 de agosto de 2011 (coleta de 20 amostras);
- No dia 30 de novembro de 2011 (coleta de 10 amostras).

No total, foram 50 análises de radônio, utilizando o aparelho Alpha Guard juntamente com o AquaKit. Os resultados obtidos para este gás (Bq/l) são apresentados na Tabela 6.4. Todos os valores calculados para posterior correção, estão no Anexo 8 e os dados dos horários de coleta e análise estão no Anexo 9.

Tabela 6.4: Valores em Bq/l das 50 amostras de água analisadas para o gás radônio.

Amostras	Média Rn (Bq/m³)	Rn (Bq/l)	Rn corrigido (Bq/l)
RP-1	71,6	0,75	1,21
RP-2	58,0	0,607	0,99
RP-3	65,4	0,685	1,12
RP-4	81,4	0,853	1,28
RP-5	178,0	1,86	2,80
RP-6	289,0	3,02	4,53
RP-7	57,0	0,597	0,89
RP-8	90,2	0,945	1,42
RP-9	113,2	1,18	1,78
RP-10	853,0	8,93	14,95
RP-11	211,2	2,21	3,70
RP-12	192,8	2,02	3,40
RP-13	68,4	0,716	1,20
RP-14	91,0	0,953	1,61
RP-15	38,6	0,404	0,69
RP-16	40,0	0,419	0,72

RP-17	257,6	2,69	4,17
RP-18	321,4	3,36	5,78
RP-19	340,8	3,57	6,41
RP-20	351,4	3,68	6,75
RP-21	291,2	3,05	4,37
RP-22	162,8	1,70	2,43
RP-23	230,6	2,41	3,45
RP-24	577,8	6,05	8,79
RP-25	142,0	1,48	2,15
RP-26	66,2	0,69	1,00
RP-27	82,6	0,86	1,25
RP-28	135,4	1,42	2,34
RP-29	92,4	0,96	1,58
RP-30	153,2	1,60	2,62
RP-31	80,6	0,84	1,38
RP-32	185,2	1,94	2,95
RP-33	53,6	0,56	0,85
RP-34	89,8	0,94	1,44
RP-35	118,6	1,24	1,91
RP-36	86,0	0,90	2,26
RP-37	32,0	0,33	0,83
RP-38	190,6	1,99	5,00
RP-39	132,8	1,39	3,48
RP-40	281,0	2,94	7,53
RP-41	71,6	0,75	1,29
RP-42	281,2	2,95	3,52
RP-43	192,2	2,01	2,40
RP-44	336,0	3,52	4,32
RP-45	522,4	5,47	6,71
RP-46	314,0	3,29	4,03
RP-47	172,6	1,80	2,22
RP-48	137,0	1,43	1,98
RP-49	94,8	0,99	1,38
RP-50	183,2	1,92	2,68

6.4.1. Radônio dissolvido na Água Subterrânea

Os teores de gás radônio dissolvidos na água subterrânea da área de estudo variaram entre 0,699 Bq/l e 14,95 Bq/l, sendo o valor médio de 3,07 Bq/l (Figura 39). Ressalta-se que a concentração de radônio dissolvido na água para o abastecimento público, segundo a Organização Mundial de Saúde, deve ser no máximo de 100 Bq/l. Portanto, em São José do Rio Preto, a concentração deste gás na água subterrânea, está muito abaixo do limite estabelecido pela OMS.

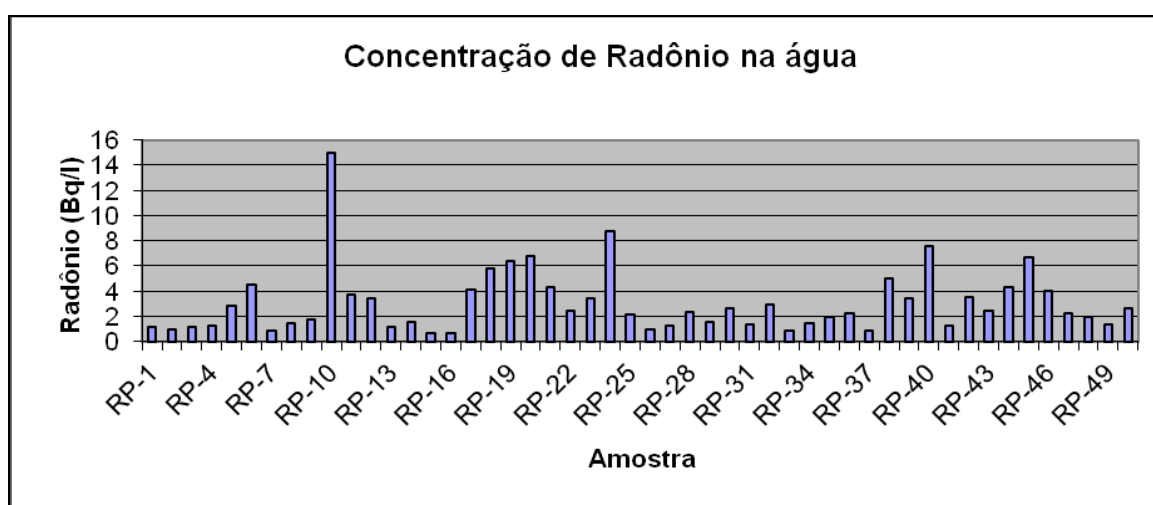


Figura 39: Gráfico da concentração de radônio nas amostras analisadas, em Bq/l.

O teor do gás radônio variou muito ao longo da área estudada, que está geologicamente localizada no Grupo Bauru (Formações Adamantina e Santo Anastácio), o qual apresenta uma grande variação litológica desde siltitos até arenitos médios (Perfis no Anexo 3). O valor mais baixo observado nas análises realizadas foi de 0,699 Bq/l na amostra RP-15, que se encontra em uma área de arenitos finos do Grupo Bauru (Formação Adamantina), empobrecidos em urânio e de porosidade relativamente baixa.

Já o valor de 14,95 Bq/l para a amostra RP-10 pode estar relacionado ao fato de estar localizada numa área onde há variações litológicas, como pode ser visto no perfil no Anexo 3. A intercalação entre argilitos/siltitos e arenitos finos faz com que nesta área o Aquífero Bauru seja semiconfinado, evitando, assim, a dispersão do gás radônio para a atmosfera. Outra hipótese que pode colaborar para este valor mais elevado na área de

estudo é a presença de argilitos neste ponto, que é um tipo de rocha com tendência de acumular maiores quantidades de urânio.

O poço RP-10, como pode ser observado no Anexo 4, não é afetado por lineamentos estruturais, que estão localizados, principalmente, nas drenagens de São José do Rio Preto. Portanto, o valor mais elevado para a exalação do gás radônio nesta amostra não deve estar ligado a falhamentos.

Já o valor de 6,75 Bq/l para a amostra RP-20 pode estar relacionado com o fato de se encontrar em um lineamento estrutural, como se observa no mapa no Anexo 4, pois, a exalação do gás radônio em locais onde há falhamentos tende a ser maior devido às aberturas existentes, que facilitam o escape do gás.

O mapa potenciométrico (Anexo 5), indica que a amostra RP-10 está em uma região de cota de nível estático mais elevada em São José do Rio Preto e também próxima à área de recarga (locais onde o Aquífero Bauru é abastecido na área estudada). Evidencia, assim, ser um local de maior quantidade e reciclagem de água, podendo ser este outro fator para que o valor ultrapasse 14 Bq/l.

Foi confeccionado um mapa de isovalores para avaliar a distribuição do gás radônio em São José do Rio Preto (Figura 40). Na mesma figura consta a análise estatística do radônio na área de estudo.

A área de maior concentração de radônio em São José do Rio Preto é a central, como pode ser observado no mapa de isovalores (Figura 40).

Observando os mapas de isovalores tanto de profundidade como do radônio, foi notado que na região de maior concentração do gás radioativo a profundidade do N.E. é menor, podendo neste local ter camadas silteosas/argilosas mais próximas da superfície contendo maior quantidade de urânio. O mesmo ocorrendo em relação à condutividade, onde foi observado que na área de maior atividade do ^{222}Rn temos uma menor quantidade de íons dissolvidos na água, isto é, há uma menor ocorrência de rochas ou nódulos carbonáticos (Figuras 30 e 40).

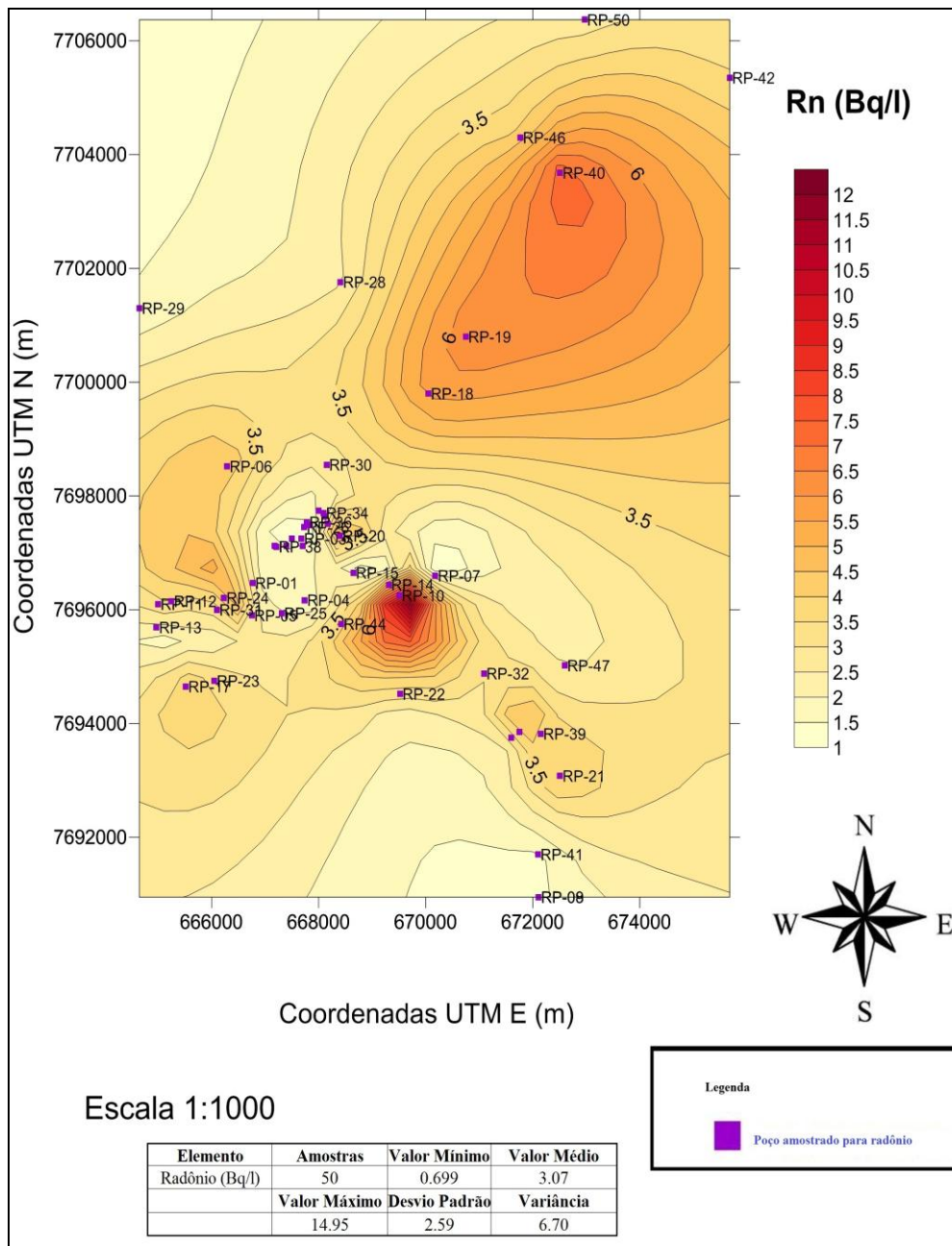


Figura 40: Mapa de Isovalores e dados estatísticos de radônio na área estudada.

No programa Excel foram realizados testes correlação de Pearson entre os elementos químicos analisados e o radônio, não ocorrendo correlação entre eles (Figura 41).

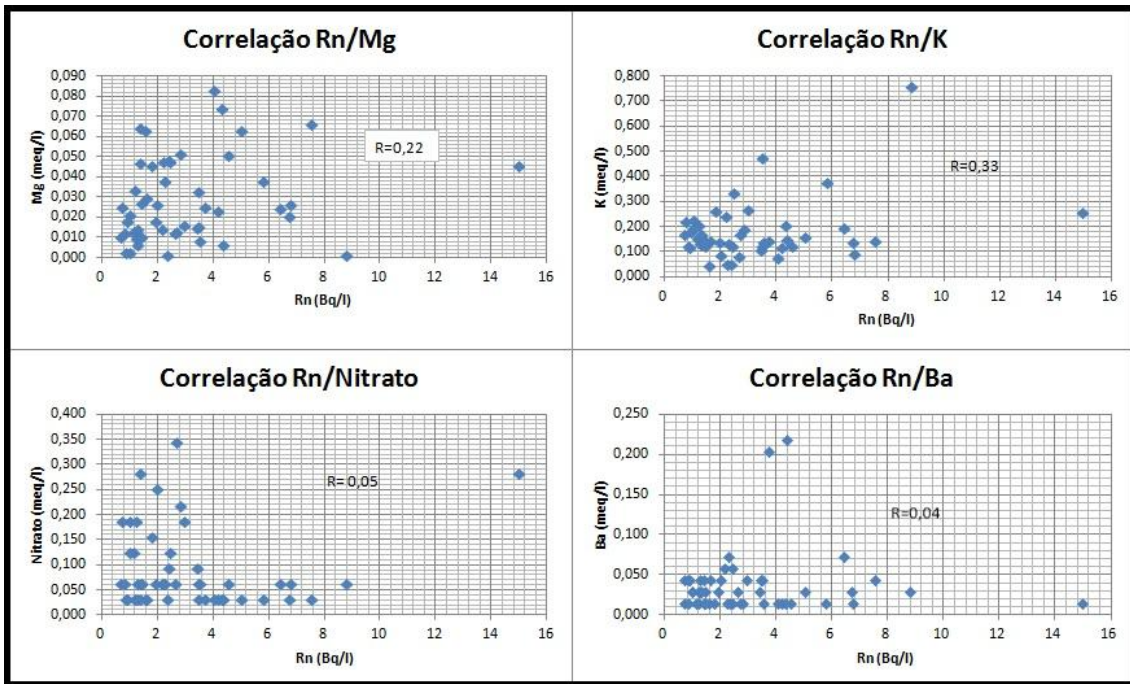


Figura 41: Correlações entre o radônio e os elementos químicos bário, potássio, magnésio e nitrato.

Em relação aos outros constituintes (Cl , Ca , Si , SO_4^{2-} e HCO_3^-) foi registrada correlação negativa entre o radônio dissolvido na água subterrânea e o bicarbonato (Figura 42). Esta correlação indica que o gás radônio tende a ocorrer distante de regiões com rochas carbonáticas, ou seja, nas argilosas e siltosas.

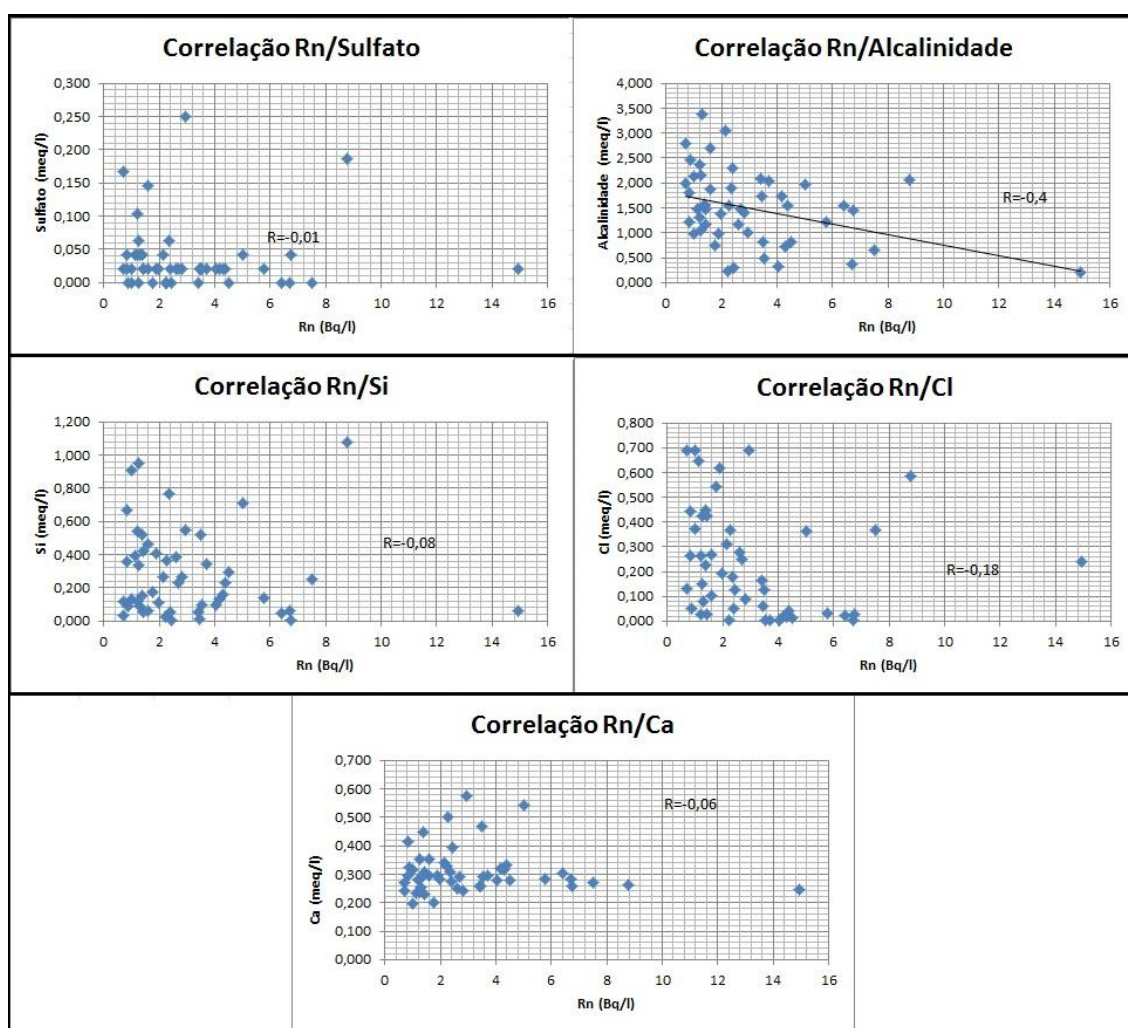


Figura 42: Correlações entre os constituintes HCO_3^- , Ca, Cl, Si e SO_4^{2-} e o gás radônio.

6.4.2. Rádío dissolvido na Água Subterrânea

O **Rádío** (do latim "radius", raio) é um elemento químico de símbolo **Ra**, número atômico 88 (88 prótons) com massa atômica [226] u, pertencente à família dos metais alcalino-terrosos, grupo 2 ou IIA da classificação periódica dos elementos. À temperatura ambiente, o rádío encontra-se no estado sólido. É um metal altamente radioativo encontrado em minerais de urânio como pechblenda. O Rádío-226 também foi analisado utilizando o aparelho Alpha Guard juntamente com AquaKit.

Os resultados para cada amostra foram obtidos após 40 dias da realização das medidas de Rn-222, pois, esse é o período apropriado para o gás radioativo radônio entrar em equilíbrio com o radionuclídeo Ra-226 (Tabela 6.4.2). Para a medida de cada amostra, foi utilizado, assim como para o radônio, um período de 40 minutos (a cada 10

minutos foi realizada uma medida), sendo obtida uma média entre os 5 valores. Os valores em Bq/m³ foram transformados em Bq/l, utilizando a mesma fórmula adotada para o radônio. O dados obtidos para a confecção da Tabela 6.4.2 constam no Anexo 8.

Tabela 6.4.2: Resultados das 50 amostras para o elemento Ra-226 (Bq/l).

Amostra	Média de Ra-226 (Bq/m ³)	Ra-226 (Bq/l)	Amostra	Média de Ra-226 (Bq/m ³)	Ra-226 (Bq/l)
RP-1	15,4	0,16	RP-26	37,2	0,39
RP-2	17,4	0,18	RP-27	26	0,27
RP-3	17,6	0,18	RP-28	27,8	0,29
RP-4	12,6	0,13	RP-29	19,6	0,20
RP-5	14,2	0,15	RP-30	15,6	0,16
RP-6	15,0	0,16	RP-31	24,4	0,25
RP-7	15,0	0,16	RP-32	61,6	0,64
RP-8	9,0	0,09	RP-33	47	0,49
RP-9	10,2	0,11	RP-34	21,6	0,23
RP-10	17,8	0,19	RP-35	18,6	0,19
RP-11	18,0	0,19	RP-36	22,2	0,23
RP-12	10,8	0,11	RP-37	21,8	0,23
RP-13	15,0	0,16	RP-38	24,8	0,26
RP-14	7,5	0,07	RP-39	9	0,09
RP-15	19,0	0,20	RP-40	26,2	0,27
RP-16	16,4	0,17	RP-41	16,2	0,17
RP-17	8,8	0,09	RP-42	22,8	0,24
RP-18	7,8	0,08	RP-43	12,4	0,13
RP-19	9,8	0,10	RP-44	23	0,24
RP-20	14,6	0,15	RP-45	13,4	0,14
RP-21	25,6	0,27	RP-46	9,2	0,10
RP-22	33,8	0,35	RP-47	8,6	0,09
RP-23	19,0	0,20	RP-48	10,6	0,11
RP-24	20,8	0,22	RP-49	26,2	0,27
RP-25	28,8	0,30	RP-50	22,6	0,24

Verificou-se que a presença deste radioelemento é baixa, entre 0,07 e 0,64 Bq/l, o que é compatível com outros dados na literatura, que registram sua menor concentração atividade nas águas em relação à do Rn-222 (Figura 43). Os valores muito baixos estão também ligados ao fato da área estudada não estar em uma região de rochas graníticas, pois estas são ricas em minerais contendo urânio, o que aumentaria os valores do radionuclídeo rádio em água.

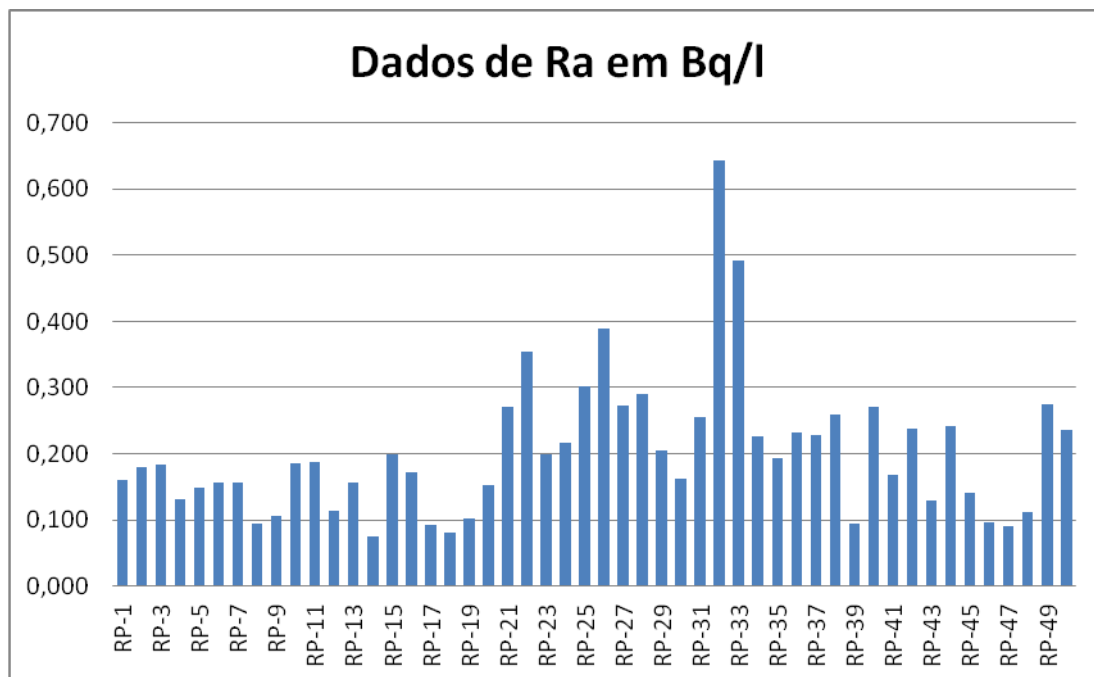


Figura 43: Dados da concentração atividade do radionuclídeo Ra-226 nas amostras analisadas, em Bq/l.

A maior concentração atividade do Ra-226 na área estudada é a sudeste, como pode ser visto no mapa de isovalores (Figura 44). Na Fig. 44 também são apresentados os valores médio, máximo, mínimo, desvio padrão e variância, para Ra-226 na área de estudo.

Notou-se também que a maior concentração atividade do Ra-226 ocorre em uma região diferente daquela onde se verificou a maior concentração atividade do gás radônio. Isto foi observado tanto no mapa de isovalores como na correlação entre os dois radionuclídeos, que não foi significativa (Figura 45).

Observando os mapas de isovalores do elemento rádio e de profundidade, foi verificado que nos locais onde temos a maior concentração deste radionuclídeo a profundidade do N.E. é maior, evidenciando que as regiões com maior atividade deste elemento em São José do Rio Preto ocorre em locais onde a camada da zona não saturada é mais espessa. Em relação à condutividade, isso também ocorre já que as regiões de maior atividade no mapa de isovalores do rádio e da condutividade são coincidentes; isto se deve ao aumento da força iônica na solução, aumentando a atividade do elemento rádio na água subterrânea, devido ao efeito salino (Figuras 30 e 44).

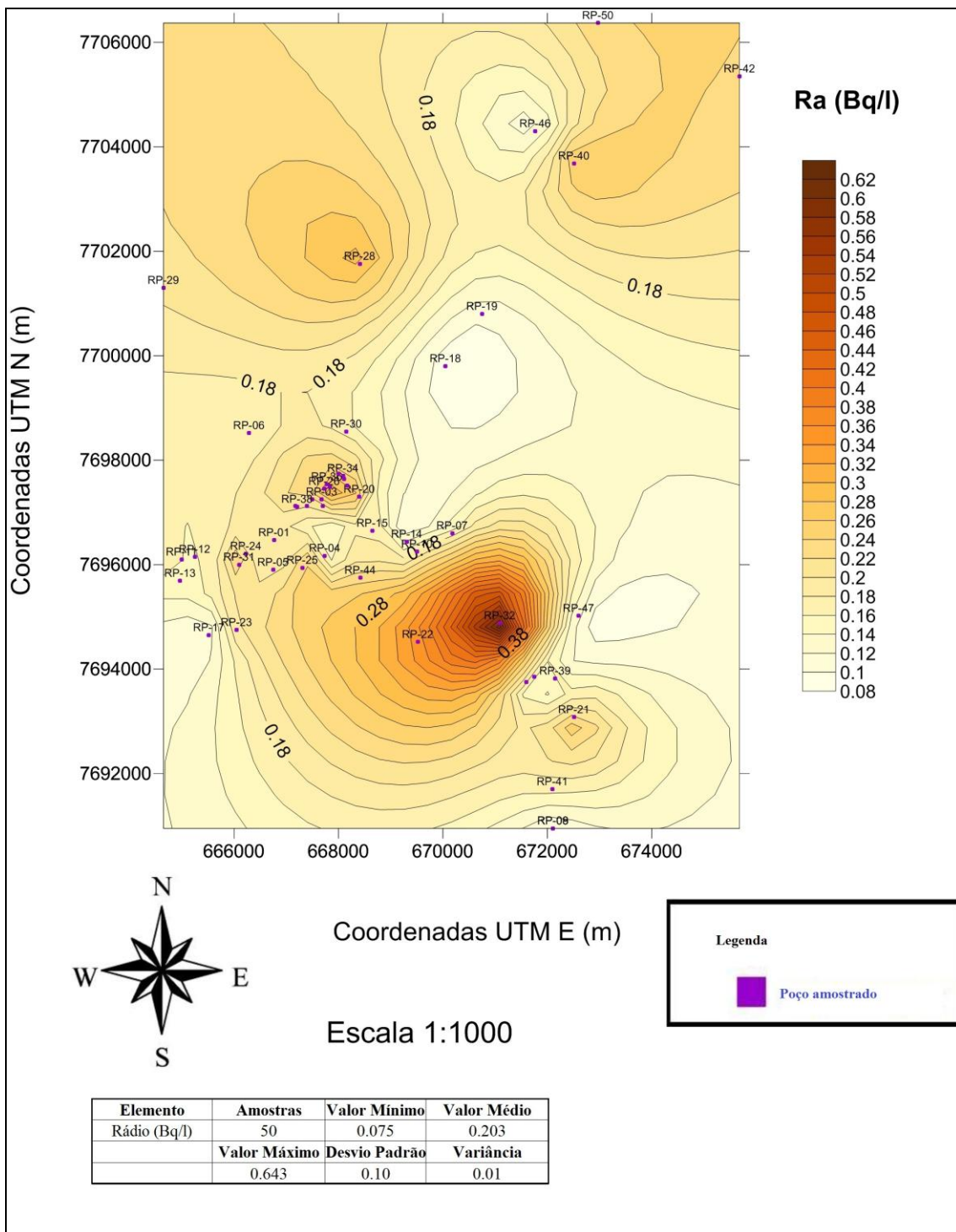


Figura 44: Mapa de isovalores e dados estatísticos para o radionuclídeo Ra-226.

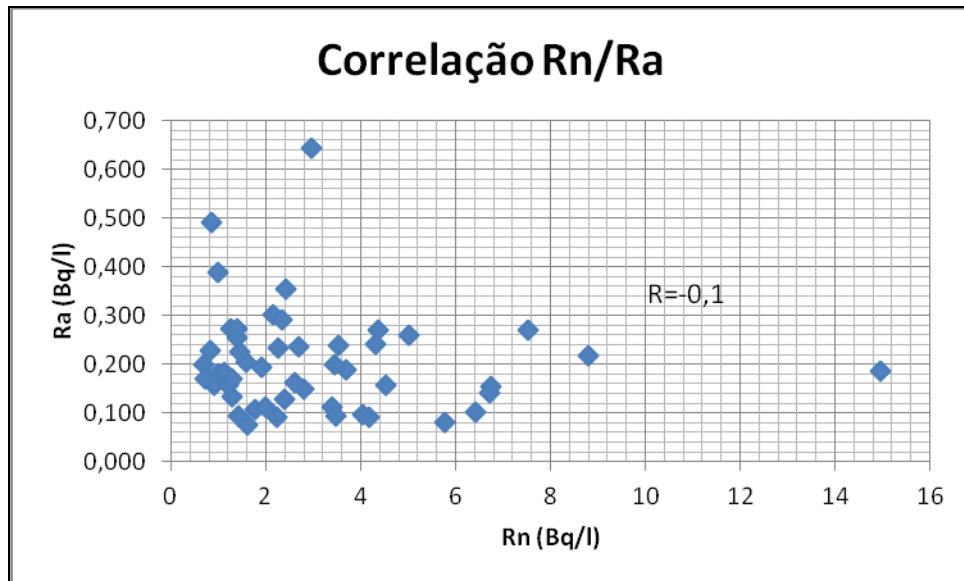


Figura 45: Correlação entre os elementos radônio e rádio na área de estudo.

A literatura informa que a atividade do radônio costuma ser muito maior que a do rádio em águas subterrâneas e isto foi constatado no município de São José do Rio Preto.

Observando-se o mapa potenciométrico (Anexo 5) e os mapas de isovalores tanto do rádio como do gás radônio, foi notado a proximidade entre os poços de maior valor de rádio (RP-32= 0,64 Bq/l) e maior valor de radônio (RP-10), havendo possibilidade que o valor de 14,95 Bq/l para o gás esteja sendo influenciado por esta região fonte. O radônio por ter uma rápida dispersão e com a ajuda do fluxo da água, pode estar sendo transportado da região do poço RP-32 para a área do poço RP-10.

7. CONCLUSÕES

Na área de estudo, as águas pertencentes ao Aquífero Bauru foram classificadas como bicarbonatadas sódicas (64%) e bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (34%); secundariamente, aparecem as águas sulfatadas ou cloretadas sódicas (2%). A existência de águas mais sódicas em São José do Rio Preto, pode ser constatada também observando os mapas de isovalores de sódio e de carbonatos/bicarbonatos, pois, as regiões de suas maiores concentrações são coincidentes.

As concentrações de cálcio, magnésio e de carbonatos ocorrem dentro das normas de potabilidade, sendo que em algumas amostras os valores mais elevados de cálcio podem prejudicar tanto a população de São José do Rio Preto como também as tubulações dos poços artesianos. Os bicarbonatos presentes na água subterrânea dos poços estudados RP-05 (calcário), RP-22 (nódulos e cimentos carbonáticos), RP-28, RP-30, RP-34 e RP-45 deve ser pela dissolução das rochas e cimentos carbonáticos, presentes na formação Adamantina em São José do Rio Preto, como pode ser observados nos perfis (Anexo 3). A presença do sulfato de cálcio como pode ser observado pela correlação descrita anteriormente, é por causa da dissolução do gesso (gipsita) presente na formação Adamantina do Grupo Bauru.

Já o elemento bário, que é reativo e cujos sais solúveis são venenosos, possui concentração média elevada nas 50 amostras estudadas. O valor médio foi de 0,036 meq/l (2,5 mg/l), sendo que o máximo permitido pela Portaria N° 2.914 de 12 de dezembro de 2011 é de 0,7 mg/l, evidenciando um possível problema para a saúde da população local. Neste caso, seria adequado um estudo mais aprofundado no município, para a obtenção de dados mais detalhados que auxilie na proposição de iniciativas para a remediação. Nos poços estudados (RP-1 a RP-50), este elemento possivelmente aparece como carbonato de bário, talvez devido a dissolução de feldspatos potássicos e de barita (sulfato de bário), ricos em bário, e a dissolução de carbonatos de cálcio presentes nas rochas do Grupo Bauru; o cátion Ba talvez esteja se ligando com o ânion carbonato, formando o carbonato de bário.

O nitrato, bastante investigado na região de São José do Rio Preto, exibiu, o valor médio de 0,089 meq/l (1,20 mg/l), abaixo do limite estabelecido pela Portaria N° 2.914 de 12 de dezembro de 2011 que é de 10 mg/l. As amostras RP-10 e RP-50 forneceram valores acima de 0,260 meq/l (3 mg/l), podendo ser um risco futuro para a

população, pois, o nitrato pode acarretar doenças como a Metahemoglobinemia, conhecida como Síndrome do Bebê Azul e o Câncer Gástrico.

Os outros constituintes estudados como potássio, sílica, cloreto, sódio e sulfato, estão dentro do limite estabelecido pela Portaria Nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011, não trazendo nenhum risco à população local a sua ingestão nas águas. Porém, algumas amostras estudadas forneceram valores abaixo de 2 mg/l para o cloreto, que é importante para a purificação da água ao eliminar a presença de coliformes fecais.

Nas correlações realizadas com o auxílio do Excel, há indicação da existência dos sais KCl e sulfato de potássio, oriundos dos fertilizantes utilizados na agricultura no município de São José do Rio Preto. O NaCl pode ter origem caso haja saturação em reações de troca catiônica (sódio se ligando ao cloreto e formando este sal) ou da dissolução do mineral halita presente no Grupo Bauru.

As correlações realizadas juntamente com as análises dos mapas de isovalores, sugeriram possível presença dos sais KCl, sulfato de potássio, NaCl e cloreto de cálcio, caso haja saturação dos mesmos. A existência destes sais e de carbonatos pode indicar a formação de depósitos salinos (evaporitos) em São José do Rio Preto. Este tipo de depósito é formado em bacias fechadas, como é o caso, pois, o município estudado se encontra na Depressão Rio Preto, circundada por altos basálticos. A evaporação intensa durante os períodos áridos na formação do Grupo Bauru pode ter formado depósitos de cloretos, sulfatos e carbonatos.

A análise do pH mostrou que a área estudada possui águas alcalinas (básicas), principalmente nas regiões sudeste e noroeste, isso se deve a maior quantidade de íons bicarbonatos, sulfatos e cloretos que aumentam a alcalinidade da solução aquosa. Além disto, o estudo conjunto da condutividade elétrica e do STD (Sólidos Totais Dissolvidos), utilizando o software Qualigraf, mostrou que a água nas 50 amostras estudadas é doce, portanto, de boa qualidade para o consumo pela população.

Com relação às águas subterrâneas no Aquífero Bauru, no município de São José do Rio Preto (SP), observa-se um quadro bastante complexo no que diz respeito à situação dos parâmetros hidrogeológicos básicos analisados. Quanto à rede de poços que exploram o Sistema Aquífero Bauru, verifica-se nos inúmeros cadastros consultados, a falta de dados básicos de construção, bombeamento, perfis geológicos e de proteção sanitária, dificultando o estudo realizado.

Em relação à situação do nível da água subterrânea (nível estático) do Sistema Aquífero Bauru, verifica-se em função da super-exploração, um abaixamento na

superfície da água, com nível atual mais profundo do que em épocas anteriores. A média calculada para o nível estático no município é de 31,5 metros, servindo este valor como referência a novos projetos de poços tubulares e outras pesquisas a serem realizadas no município.

Outro ponto importante quanto à profundidade do nível estático é o fato de que este representa a espessura da zona não saturada para os aquíferos livres. Desta forma, os relevos caracterizados pelos espigões podem estar mais apropriados a receber possíveis instalações de empreendimentos considerados poluidores, uma vez que o caminho percorrido pelo contaminante será maior que nas regiões mais baixas.

De forma geral, o nível freático alimenta as principais drenagens do local, fazendo com que o fluxo percorra um sentido que vai das cotas topográficas mais altas (espigões) para as mais baixas (vales). Sendo assim, é de extrema importância o mapa potenciométrico, com as linhas preferenciais do fluxo subterrâneo, pois, auxiliam na definição dos locais a serem instalados poços de monitoramento para empreendimentos potencialmente poluidores.

Em relação ao principal enfoque deste trabalho, o gás radônio, foi observado que os teores deste gás dissolvido na água, na área de estudo, variaram entre 0,699 Bq/l e 14,95 Bq/l. A concentração de radônio dissolvido na água para o abastecimento público, segundo a Organização Mundial de Saúde, deve ser no máximo de 100 Bq/l. Portanto, em São José do Rio Preto, a concentração deste gás na água subterrânea está bem abaixo do máximo estabelecido pela OMS.

A amostra RP-10 forneceu um valor de 14,95 Bq/l, elevado em relação aos de outras amostras analisadas. Isto se deve possivelmente a diferenças litológicas, pois, como foi observado, apenas neste poço ocorreu uma alternância de siltitos e arenitos da Formação Adamantina, levando a uma situação de semiconfinamento do Aquífero Bauru. Também pode estar associado ao fato que de acordo com o mapa potenciométrico, este poço situa-se numa região que recebe maior quantidade de água, estando em constante renovação.

Ainda em relação ao gás radônio, foi observado que em locais como do poço RP-20, onde há lineamentos estruturais, o valor encontrado foi de 6,75 Bq/l, pois, a presença de fendas, falhas ou fraturas, ocasiona maior exalação do gás em relação a locais sem falhamentos.

Adicionalmente à medição do gás radônio, foram realizados testes estatísticos de correlação com todos os outros constituintes analisados neste trabalho, porém, praticamente todos os valores encontrados não foram significativos.

Também foi analisado neste trabalho o Ra-226, cujas concentrações foram baixas, entre 0,07 e 0,64 Bq/l, o que é compatível com outros dados na literatura que indicam sua menor concentração atividade nas águas em relação à de Rn-222.

A correlação entre radônio e rádio também não foi significativa, por não terem sido coincidentes as regiões de sua maior concentração. Pelo fluxo da água subterrânea observado no mapa potenciométrico, a região dos maiores valores de rádio pode ser fonte para o radônio no poço RP-10.

Outro fato a se destacar é que na região do poço RP-32, ocorreu um valor de 0,64 Bq/l para o Ra-226, que está próximo do valor máximo permitido pela Portaria N° 2.914 de 12 de dezembro de 2011 que é de 1 Bq/l, para a radioatividade beta (β) total. Neste sentido, sugere-se um estudo mais detalhado neste local, pois a população pode passar futuramente por problemas de saúde devido à ingestão em excesso deste elemento radioativo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M.A. *Síntese sobre a Tectônica da Bacia do Paraná*. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, 1980, Curitiba. Atas... Curitiba: SBG, 1980. v1, p. 01-20.

ALMEIDA, M. A.; FERNANDES, L. A.; DANTAS, A. S. L.; SAKATE, M. T.; GIMENEZ, A. F.; TEIXEIRA, A. L.; BISTRICHI, C. A. & ALMEIDA, F. F. M. *Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Bauru na região do Pontal do Paranapanema no Estado de São Paulo*. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, 1981, Curitiba, p. 77-89.

ARID, F. M. (1966). *A Formação Bauru na Região Norte-Occidental do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado*. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de São José do Rio Preto (SP), 93 p.

ARID, F. M.; CASTRO, P. R. M.; BARCHA, S.F. (1970) *Estudos Hidrogeológicos no Município de São José do Rio Preto (SP)*. Boletim Sociedade Brasileira de Geologia, 19 (1). São Paulo, p. 43-69.

ATLAS REGIONAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (1978) Região 8. São José do Rio Preto (SP). Secretaria de Economia e Planejamento.

BARCELOS, J. H.; SUGUIO, K. *Correlação e extensão das unidades estratigráficas do Grupo Bauru definidas em território paulista, nos estados de minas gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná*. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6, 1987. Rio Claro - SP, Atas..., 1987, p.313-321.

BARCHA, S.F.; ARID, F.M. (1973). *Água subterrânea na Formação Bauru, Região Norte-Occidental do Estado de São Paulo*. Boletim de Ciências No 1. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras. São José do Rio Preto (SP), p.68-101.

BARCHA, S. F. (1980). *Aspectos Geológicos e Províncias Hidrogeológicas da Formação Bauru na Região Norte-Occidental do Estado de São Paulo*. Tese de Livre Docência. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, 209 p.

BARCHA, S.F. *Estratigrafia do Bauru na região norte-occidental do estado de São Paulo*. In: *Mesa Redonda: A Formação Bauru no Estado de São Paulo e regiões adjacentes*, São Paulo, 1981, Sociedade Brasileira de Geologia, p.48-59.

BARCHA, S.F. (1992). *Nitratos em Água Subterrânea no meio Urbano*. Anais XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia – SBG/SP, São Paulo (SP), p.200-201.

BARCHA, S.F. (1998). *Água e abastecimento urbano em São José do Rio Preto, SP*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10. 1998. *Anais*. São Paulo, ABAS, CD-ROM.

BATEZELLI, A. 1998. *Redefinição litoestratigráfica da unidade Araçatuba e da sua extensão regional na Bacia Bauru no Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Inst. Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 110 p.

BONOTTO, D.M.; CAPRIOGLIO, L. *Radon in groundwaters from Guarani aquifer, South America: environmental and exploration implications*. Applied Radiation and Isotopes, 57, pp. 931-940, 2002.

BONOTTO, D. M. ; ARMADA, Priscilla Cardoso Padron ; SILVA, Altino . *Radon occurrence in water-supply systems linked to Guarani Aquifer*. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 2005, Porto de Galinhas. CDROM dos Resumos Expandidos do X Congresso Brasileiro de Geoquímica. Rio de Janeiro : SBGq, 2005. p. 1-4.

BORGHETTI, N.R.B., BORGHETTI, J.R., FILHO, E.F.R. (2004). *Aquífero Guarani – A verdadeira integração dos países do Mercosul*. Curitiba 2004 – Maxigráfica.

BRAGA, A. C. O. (1999). *Material Didático para os cursos de Hidrogeologia e Mecânica de Fluidos*. Curso de Geologia. Unesp Campus de Rio Claro (SP). CD-ROM.

CAMPOS, J.E.; ALBUQUERQUE FILHO, J.L.; ODA, G.H.; IRITANI, M.A.; PERROTA, M.M.; SILVEIRA, R.E.I.; TAKAHASHI, A.T. (2000). *Carta Hidrogeológica do Estado de São Paulo (Brasil) na escala de 1:1.000.000*. Resultados Parciais. I Congresso Internacional de Água Subterrânea. Fortaleza, Brasil.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Radioatividade*. Acesso em 12 de agosto de 2011. <http://www.cnen.gov.br>.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS - CPRM (1998a) *Noções Básicas sobre Poços Tubulares*. Cartilha Informativa. Superintendência Regional do Recife. [http:// www.cprm.gov.br/](http://www.cprm.gov.br/)

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS - CPRM (1998b) *Execução de Testes de Bombeamento em Poços Tubulares*. Manual Prático de Orientações. Superintendência Regional do Recife. [http:// www.cprm.gov.br/](http://www.cprm.gov.br/)

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB (1974) *Água Subterrânea e Poços Tubulares*. São Paulo, SP.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB (1994)-*Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. 95p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB (2001)-*Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. 97p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB (2004)-*Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. 97p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB (2006)-*Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. 97p.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983). *Hidrologia Subterrânea*. Tomo I e II. Ediciones Ómega, S. A. – Barcelona. 2350 pp.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 6, Ribeirão Preto - SP, São Paulo: Geopesquisadora —Tahal, 2v., 1974.*

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE (1976). *Estudo de Águas Subterrâneas*. Regiões administrativas 7, 8, 9 (Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba), 3 vol.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 10 e 11: Presidente Prudente e Marília*. São Paulo: v.1e v.2, 1979.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. *Sistema de informações para gerenciamento de recursos hídricos do Estado de São Paulo*, São Paulo - SP, 2000.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, W., 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. Second Edition, Wiley.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL, F. J. (1997). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. v. 68 (n. 2), p.195-205, 1996.

FERREIRA, F.J.F., 1982. *Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa*. MSc Thesis. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 170p.

GENITRON 2000. *Alpha Guard PQ2000/MC50 - Multiparameter Radon Monitor*. Frankfurt, Genitron Instruments.

GUYMON, G.L. (1994) *Unsaturated Zone Hydrology*. New Jersey, Prentice Hall. 209p.

HEATH, RALPH C. (1982). "*Hidrologia de água subterrânea básica*". (Geological Survey water-supply paper; 2220) Bibliography: 81 p.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA) Censo-2010. Acesso no dia 12 de julho de 2011. <http://www.ibge.gov.br/>

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT (1981) *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500000, v.1.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT (1996). *Diagnóstico Básico da Situação das Águas Subterrâneas de São José do Rio Preto e seus Entornos*. Parecer Técnico No. 6.870. São Paulo, 74p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Diagnóstico da Situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande*. São Paulo: Convênio IPT/ CBH-TG/ FEHIDRO, 1999. (Relatório, 40 515).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT (2001). *Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande - Relatório Final*. Relatório No. 40.515 - Relatório Zero do Comitê de Bacias do Turvo/Grande. São Paulo, 341 p.

LANDIM, P. M. B. (1998). *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Editora Unesp. São Paulo, 266 p.

LIMA, A. A. 2004. *Hidrogeologia do sistema aquífero Bauru no Município de São José do Rio Preto (SP)*. Dissertação de Mestrado – UNESP, Rio Claro (SP), 82 p.

LOGAN, J. 1965. *Interpretação de Análises Químicas da Água*. US. Agency for International Development. Recife.

MELO, M.S., STEIN, D.P.; ALMEIDA, M.A. *Aspectos litoestratigráficos do Grupo Bauru*. In: ENCONTRO DE GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA, 1982, São Paulo. Atas... São Paulo: SBG/ABAS, n°9, p. 01-19, 1982.

MEZZALIRA, S. *Contribuição ao conhecimento da estratigrafia e paleontologia do arenito Bauru*. In: Boletim o Instituto Geográfico e Geológico - IGG, São Paulo - SP. 51: 162p., 1974.

NELSON, P.; RACHIELLE, R.; SMITH, A. *Transport of radon in flowing boreholes at stripa Sweden*. (*Geophysics Res. V. 88, n. B3*), p. 2395-2405, 1983.

OLIVEIRA, J.B., CAMARGO, M.N., ROSSI, M. CALDERANO FILHO, B. 1999. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo*. Instituto Agrônomo, Embrapa Solos: Campinas, Rio de Janeiro.

PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. *Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP*. In: Revista Geociências. UNESP. p.83-99, 1994.

PAULA E SILVA, F.; SAAD, A. R.; PERINOTTO, J. A. J.; FULFARO, V. J. *Arquitetura deposicional do Grupo Bauru (Ks) na região sudoeste do Estado de São Paulo*. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 5; SIMPÓSIO SOBRE EL CRETÁCIO DE AMERICA DEL SUR, 1, 1999. Serra Negra. Boletim...p. 45-49.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M. R. *Perfis de referência do Grupo Bauru no Estado de São Paulo*. Revista Geociências. Rio Claro. v. 22 (n. 1), p.127- 139, 2003.

PAULA E SILVA, F. *Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP (Tese de Doutorado). Rio Claro. 166 p., 2003.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M. R.; STRADIOTO, M. R. *Sucessão Sedimentar do Grupo Bauru na Região de Pirapozinho (SP)*. Revista Geociências. Rio Claro. v.25 (n.1), p.17-26, 2006.

PERROTTA, M. M. et al. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000*. São Paulo: CPRM, 2005. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

PIPER, A. M. A. *A Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*. Reprinted: American Geophysical Union Transactions, v.25, p. 914-923, 1944.

REBOUÇAS, A. C. “Águas subterrâneas”, cap. 4. p. 119-151, in REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B. & TUNDISI, J.G. - *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*, 703 p. 2ª edição revisada e ampliada, São Paulo, 2002.

SANTORO, J.; MASSOLI, M. *Mapa de contorno estrutural do topo do basalto subjacente ao Grupo Bauru no Estado de São Paulo*. Revista IG, São Paulo, v.6, n.1/2, p. 39-44, 1985.

SAVAZZI, E. A. *Determinação da presença de Bário, Chumbo e Crômio em amostras de água subterrânea coletadas no Aquífero Bauru*. 2008. Dissertação (Mestrado em Toxicologia) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2008.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J., AMARAL, G.; SUGUIO, K; COIMBRA, A. M.; SOBREIRO NETO, A. F.; GIANCURSI, F.; CORREA, W. A. G.; CASTRO, C.G.J. *Geologia da região sudoeste do Estado de São Paulo*. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2, 1979. Rio Claro - SP, Boletim de resumos. p. 307-319.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. *Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru*. Revista Brasileira de Geociências. São Paulo. v. 10 (n. 3): p.177-185, 1980.

SUGUIO, K.; FULFARO, V. J.; AMARAL, G.; GUIDORZI, L. A. *Comportamentos estratigráfico e estrutural da Formação Bauru nas regiões administrativas 7 (Bauru), 8 (São José do Rio Preto) e 9 (Araçatuba) no Estado de São Paulo*. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1, 1977. São Paulo. Atas...p. 231-247.

SUGUIO, K.; BARCELOS, J.H. *Calcretes of the Bauru Group (Cretaceous), Brazil: Petrology and Geological Significance*. Boletim. IG, São Paulo, v.14, p. 31-47, 1983a.

SUGUIO, K.; BARCELOS, J.H. *Significado paleoambiental de estrutura "boudinóide" e outras feições presentes na Seção Tipo da Formação Santo Anastácio do Grupo Bauru, Estado de São Paulo*. Boletim IG, São Paulo, v.14, p. 49-54, 1983b.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP). *Clima dos Municípios Paulistas - São José do Rio Preto*. Página visitada em 11 de setembro de 2011. <http://www.cpa.unicamp.br>

VIEIRA, P.C. *Sugestões para estudo de captação de água subterrânea no Grupo Bauru: considerações tectônicas*. Revista do Instituto Geológico - IG. São Paulo. v. 2 (2): 5-16, 1981.

KRUMBEIN, W.C.; SLOSS, L.L. *Stratigraphy and Sedimentation*, 2nd edition, 1963.

ZALÁN, P. V. ; WOLF, S. ; ASTOLFI, M. A. M. ; VIEIRA, I. S. ; CONCEIÇÃO, J. C. J. ; APPI, V. T.; NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES A. (1990). *The Paraná Basin in: Intracratônica Basins*. AAPG Memoir 51, p. 681-708.

ZIMBRES, E. (2000). *Meio Ambiente pro Br - Guia Avançado sobre Água Subterrânea*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. <http://www.meioambienteprobr.com.br>.

