

## CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DO AQUIFERO ADAMANTINA NA ÁREA URBANA DE BAURU, SP

*HYDROGEOCHEMISTRY CHARACTERIZATION FROM ADAMTINA AQUIFER IN THE URBAN AREA OF  
BAURU, SP*

**Helena Mello Canato<sup>1</sup>, Fabiano Tomazini Conceição<sup>2</sup>, Jorge Hamada<sup>3</sup>, Rodrigo Braga Moruzzi<sup>4</sup>,  
Guillermo Rafael Beltran Navarro<sup>5</sup>**

<sup>1,2,4,5</sup>Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, SP.

<sup>1</sup>E-mail: helena\_canato@hotmail.com

<sup>2</sup>E-mail: ftomazini@rc.unesp.br

<sup>4</sup>E-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br

<sup>5</sup>E-mail: grbnavarro@hotmail.com

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, SP. E-mail: joha@feb.unesp.br

### RESUMO

Neste trabalho buscou-se caracterizar as águas subterrâneas do Aquífero Adamantina na área urbana de Bauru, interior do Estado de São Paulo. Para tal, foram selecionados 24 pontos de amostragem de águas subterrâneas no Aquífero Adamantina, Sistema Aquífero Bauru, analisando-se os seguintes parâmetros: condutividade elétrica, temperatura, pH, alcalinidade, fosfato, sulfato, cloreto, fluoreto, nitrato, cálcio, sódio, potássio, magnésio, sílica, ferro e alumínio. Os resultados indicaram que as águas subterrâneas na área urbana de Bauru possuem pH ligeiramente ácido e baixa condutividade, com sua composição iônica apresentando baixa concentração de cátions e ânions, sendo elas classificadas como moles ou moderadamente duras e bicarbonatadas cálcicas. As fontes naturais de elementos/compostos podem ser atribuídas a dissolução dos carbonatos, durante o processo de interação água/rocha, controlando o pH, alcalinidade, condutividade elétrica e hidrólise dos demais minerais constituintes das rochas sedimentares da Formação Adamantina, com exceção do quartzo. As elevadas concentrações de  $N-NO_3^-$  encontradas em alguns poços de abastecimento público na área urbana de Bauru são originadas devido às atividades antrópicas, oriundas do esgotamento sanitário.

**Palavras-chave:** qualidade da água subterrânea, interação água-rocha, fontes antrópicas, Aquífero Adamantina.

### ABSTRACT

This work characterized the groundwater from Adamantina Aquifer in the urban area of Bauru, São Paulo State. Twenty four sampling points were established in the Adamantina Aquifer, Bauru Aquifer System, analyzing the following parameters: electrical conductivity, temperature, pH, alkalinity, phosphate, sulfate, chlorine, fluorine, nitrate, calcium, sodium, potassium, magnesium, silica, iron and aluminum. The results indicated that the groundwaters in the urban area of Bauru possess pH slightly acid and low conductivity, with the ionic composition presents low cations and anions concentration, being they classified as soft water and calcium-bicarbonated. Natural sources of elements/compounds can be attributed to the dissolution of carbonates during the water/rock interaction, controlling pH, alkalinity, electrical conductivity and hydrolysis of other mineral constituents of sedimentary rocks from Adamantina Formation, with the exception of quartz. High concentrations of  $N-NO_3^-$  found in some public supply wells in urban Bauru originated due to sewage.

**Keywords:** Quality of groundwater, water/rock interactions, anthropogenic sources, Adamantina Aquifer.

### 1 – INTRODUÇÃO

A água subterrânea apresenta, geralmente, excelente qualidade e disponibilidade, sendo apta para o consumo humano, muitas vezes empregando somente desinfecção (ZOBY, 2005). Assim, essas águas desempenham um papel fundamental no abastecimento público e privado em todo o mundo, sendo uma alternativa de baixo custo, fácil obtenção e boa qualidade natural, além de grande valor econômico. Outro importante papel desempenhado pelas águas subterrâneas é sua descarga em cursos de água superficial, permitindo sua manutenção durante a época de estiagem, além de ser uma reserva estratégica menos vulnerável a eventos catastróficos, tais como vulcanismo, terremotos, enchentes, inundações, entre outros.

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) representa uma das principais fontes de exploração de águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Dentre os 462 municípios paulistas que são abastecidos, parcial ou integralmente, por água subterrânea, aproximadamente 59% captam água do SAB, sendo que em 88% deles o abastecimento é feito exclusivamente por água subterrânea. As vazões obtidas em perfurações no SAB são extremamente variáveis, em virtude da diversidade litofaciológica existente, que coloca em contato lateral e vertical sedimentos com diferentes características de porosidades e permeabilidades (PAULA e SILVA; CHANG; CAETANO CHANG, 2005).

Uma grande preocupação, nos dias de hoje, em relação à água subterrânea, é a sua contaminação, pois mesmo o solo tendo a capacidade de imobilização de grande parte das impurezas, essa capacidade é limitada. A contaminação

ocorre quando alguma alteração na água coloca em risco a saúde e o bem estar de uma população. A contaminação da água subterrânea pode ter várias origens, naturais ou antrópicas. As naturais são decorrentes do intemperismo, dada pela dissolução das rochas a partir do contato com a água. As antrópicas, por sua vez, devem-se principalmente a atividades domésticas (matéria orgânica, microorganismos patogênicos e nitratos), industriais (componentes químicos, metais e elementos radioativos) e agrícolas (nutrientes, metais e compostos orgânicos não biodegradáveis usados como defensivos agrícolas), além de outras possíveis formas de contaminação.

O principal contaminante das águas subterrâneas é o nitrato, sendo suas fontes em áreas urbanas associadas ao sistema sanitário como fossas negras e vazamento na tubulação da rede de coleta e transporte de esgoto (REYNOLDS-VARGAS; FRAILE-MERINO; HIRATA, 2006; VANIER *et al.*, 2010). A Companhia de Tecnologia e Saneamento do estado São Paulo (CETESB) vem realizando monitoramento da qualidade da água subterrânea dos Sistemas Aquíferos Guarani e Bauru desde 1990 (CETESB, 2010), as quais indicaram concentração de  $N-NO_3^-$  acima do permitido pela Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde nº. 2914/11, ou seja, 10 mg/L de  $N-NO_3^-$  (BRASIL, 2011), para o SAB.

De acordo com Barcha (2010), alguns poços localizados na área urbana do município de Bauru apresentaram concentrações de  $N-NO_3^-$  acima do Valor de Alerta (5 mg/L de  $N-NO_3^-$ ) e/ou Valor de Intervenção (10 mg/L de  $N-NO_3^-$ ) estabelecidos pela CETESB (CETESB, 2005), sendo as altas concentrações de  $N-NO_3^-$  associadas a problemas no sistema de esgotamento sanitário. Outros municípios que também exploram o SAB apresentaram o mesmo problema, ou seja, os municípios de Marília, Presidente Prudente e São José do Rio Preto (VANIER *et al.*, 2010; HIRATA, 2000; GODOY *et al.*, 2004; PROCEL, 2011). Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma caracterização hidrogeoquímica do Aquífero Adamantina, SAB, na área urbana do município de Bauru, Estado de São Paulo.

## 2 – ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Bauru está situado no interior do estado de São Paulo, distante 326 km de sua capital, encontrando-se na porção centro-oeste, possuindo uma área de 673,5 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 346.650 habitantes. A taxa de urbanização do município cresce anualmente, chegando a 98,3% no ano de 2011. A população rural voltou a crescer a partir de 2000, contudo ainda em menor proporção referente à população urbana (IBGE, 2011).

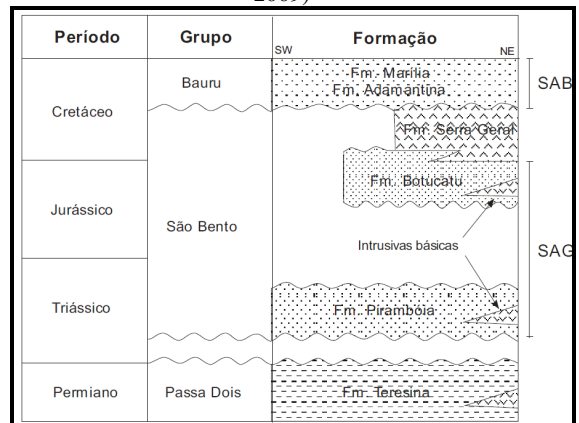
O município está inserido em uma posição privilegiada no estado, com ligações via rodovia, ferrovia e aérea com as demais cidades do estado. As principais vias são Rodovia Marechal Rondon e Castello Branco, além do Aeroporto Bauru – Arealva. A cidade de Bauru tem sua economia voltada basicamente para a prestação de serviços, indústrias e pecuária bovina, sendo os principais produtos a cana-de-açúcar, mandioca, laranja, café arábico e banana (IBGE, 2011).

A cidade de Bauru possui um clima tropical (Aw) que, segundo a classificação de Koeppen caracteriza-se como tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18 °C. O período de maior precipitação encontra-se no intervalo dos meses de dezembro (226 mm) a fevereiro (211 mm) e os meses mais secos de abril a setembro, sendo o mês mais seco o de agosto (35 mm). Os meses de junho (55 mm) a agosto (35 mm) apresentam 91% dos dias sem chuvas, diferentemente de janeiro e fevereiro em que quase metade dos dias há ocorrência de chuva no município. A velocidade dos ventos é de fraca intensidade, em média de 10 km/h, com direção predominante dos ventos do sul e sudeste (FIGUEIREDO; PAZ, 2010).

O município de Bauru está inserido em duas bacias hidrográficas, ou seja, as bacias dos rios Batalha e Bauru. A bacia do Rio Batalha ocupa a maior área do município, sendo responsável por grande parte do abastecimento público da cidade, com captação de 529 L/s, sendo este valor maior que o outorgado pelo DAEE (350 L/s). O restante da água provém da captação em poços do Aquífero Guarani. Todos os poços são operados pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru – DAE. Devido à falta de uma estação de tratamento de esgoto no município de Bauru, todos os esgotos domésticos (1000 L/s) são lançados *in natura* no Rio Bauru.

Em relação à geologia, o município situa-se sobre rochas sedimentares do Grupo Bauru com afloramento das unidades litoestratigráficas Marília e Adamantina, conforme Figura 1. Essas formações estão assentadas, em contato discordante, sobre as formações Serra Geral, do Grupo São Bento. A deposição do Grupo Bauru teve início no Cretáceo Superior, em ambiente árido e semiárido, com litologia dominante representada por arenitos (STRADIOTO, 2007).

Figura 1 – Coluna estratigráfica do município de Bauru (SILVA, 2009)



A Formação Adamantina é constituída por arenitos carbonáticos, com granulometria fina e muito fina, cor rósea a castanha, com ocorrências de estratificações cruzadas, alternadas com lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, com ocorrências de seixos de argilitos e nódulos carbonáticos (SOARES *et al.*, 1980). A Formação Marília encontra-se sobreposta à Formação Adamantina, sendo composta por arenitos grossos e conglomeráticos, com teor

de matriz rara e variável, ricos em feldspatos e minerais pesados, raramente apresenta estratificação cruzada de médio porte e camadas de lamitos vermelhos e calcários (SOARES *et al.*, 1980).

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, foi feito um levantamento dos poços cadastrados no município de Bauru que retiram água do Aquífero Bauru junto ao DAEE e DAE, buscando uma distribuição que abrangesse a maior parte da área urbana deste município. Trinta pontos amostragem foram selecionados, contudo avaliou-se a qualidade de 24 poços

de localizados no Aquífero Adamantina devido a não operacionalidade de alguns poços, conforme Figura 2. A amostragem para a avaliação da qualidade da água subterrânea dos poços de abastecimento na área urbana de Bauru foi feita em dias distintos de maio de 2012, conforme Tabela 1. Os poços amostrados neste estudo não possuem dados referentes a profundidade, bem com suas características construtivas. Em relação à vazão, fica evidente uma grande variação nos valores, com a menor e maior vazão obtidas para os poços 1 (0,5 m<sup>3</sup>/h) e 2 (10,00 m<sup>3</sup>/h), respectivamente, sendo a vazão média de 4,0 m<sup>3</sup>/h.

Figura 2 – Mapa de localização dos poços de amostragem na área urbana do município de Bauru.

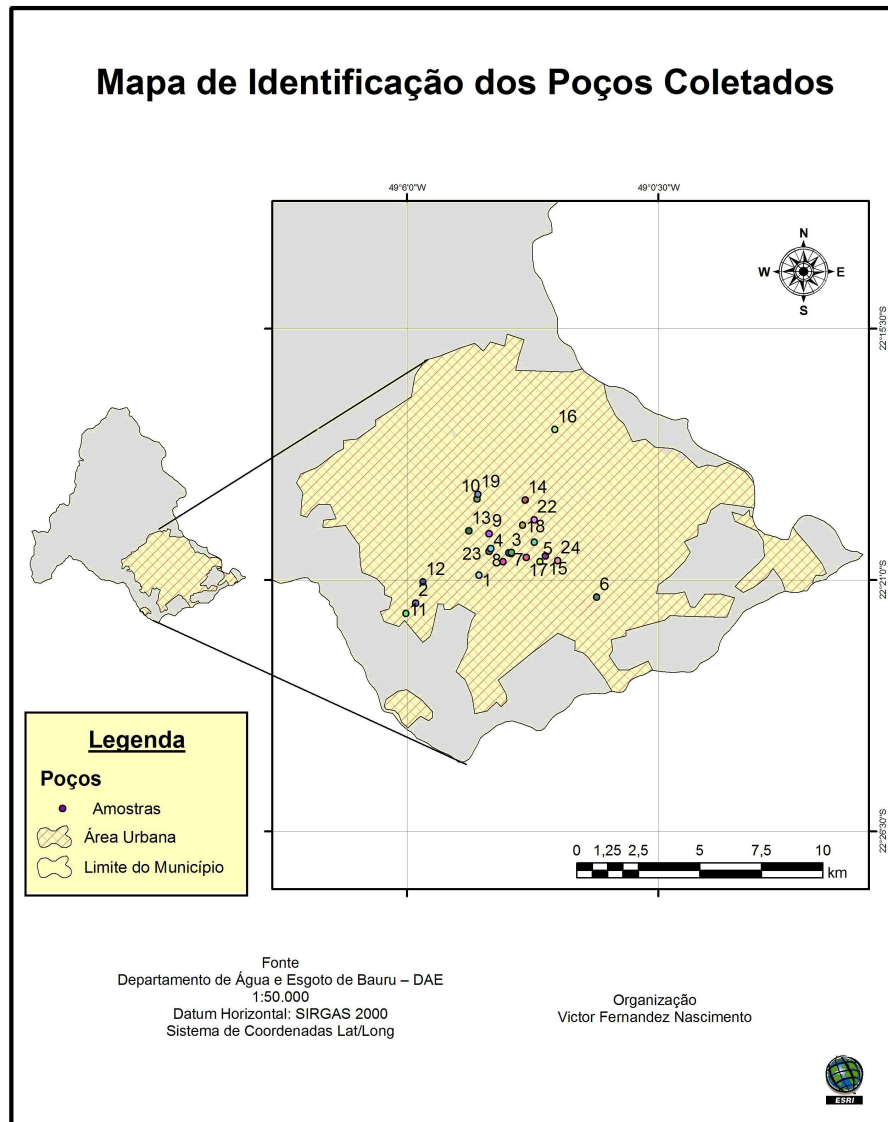


Tabela 1 – Poços amostrados para a avaliação da qualidade de água subterrânea na área urbana do município de Bauru

Poço	UTM (N) (km)	UTM (E) (KM)	Q (m <sup>3</sup> /h)	USO
1	7527,360	698,370	0,5	Hotel
2	7526,260	695,970	10,0	Hotel
3	7528,240	699,500	1,0	Posto de gasolina
4	7528,430	698,820	1,8	Lanchonete
5	7527,870	700,670	3,0	Posto de gasolina
6	7526,410	702,780	4,0	Salão de eventos
7	7528,210	699,580	3,8	Salão de eventos
8	7528,310	698,750	8,0	Escola infantil
9	7529,020	698,770	3,0	Supermercado
10	7530,430	698,330	3,0	Posto de gasolina
11	7525,840	695,610	7,0	APAE
12	7527,110	696,260	9,0	Hípica
13	7529,150	698,000	8,5	SESI
14	7528,670	698,950	4,0	Concessionária
15	7528,100	700,870	2,5	Concessionária
16	7533,200	701,290	2,0	Posto de gasolina
17	7528,050	700,150	1,0	Lava rápido
18	7529,360	700,040	2,2	Hotel
19	7530,370	700,140	5,5	Concessionária
20	7528,510	702,100	1,0	Posto de gasolina
21	7527,890	699,280	2,0	Posto de gasolina
22	7529,570	700,480	5,0	Empresa de ônibus
23	7528,660	700,460	4,0	Lanchonete
24	7527,910	701,330	3,0	Supermercado

Foram coletados diretamente do poço de amostragem, antes da fluoretação e cloração, dois litros de águas subterrâneas por poço, após escoamento de 15 minutos, para que não fossem coletadas amostras estagnadas e/ou contaminadas (CONCEIÇÃO *et al.*, 2009; SILVA; CHANG, 2010). Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ) e potencial hidrogeniônico (pH) foram medidos com equipamento de leitura direta no próprio local de amostragem (sonda multiparâmetros YSI 556). O eletrodo de pH é do tipo combinado e os padrões de alta pureza utilizados para calibração foram de pH 4,00 ( $4,00 \pm 0,01$  à  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ) e 7,00 ( $7,00 \pm 0,01$  à  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ). O condutivímetro foi calibrado utilizando-se uma solução padrão de KCl (1,0 mmol/L) de condutividade conhecida, ou seja,  $147 \mu\text{S}/\text{cm}$  à  $25^{\circ}\text{C}$ .

Um frasco, contendo 1.000 mL, foi conservado em caixas de isopor com gelo, e transportadas até o Laboratório de Geoquímica Ambiental (LAGEA) do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento (DEPLAN) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP de Rio Claro, onde foram mantidas à  $4^{\circ}\text{C}$  até a realização das análises hidrogeoquímicas. As amostras de águas subterrâneas foram filtradas no próprio local de amostragem utilizando-se membrana Millipore  $0,45 \mu\text{m}$ , para a determinação de alcalinidade, sulfato, fosfato, nitrato, cloreto, fluoreto. Outro frasco com 1000 mL foi coletado e também filtrado na mesma membrana, ainda em campo, preservadas em  $\text{HNO}_3$ , a 2%, sendo estas amostras utilizadas para a

quantificação dos teores de alumínio cálcio, ferro, potássio, magnésio, sódio e silício.

Alcalinidade ( $1$  e  $500 \pm 0,2 \text{ mg/L}$ ) foi quantificada por titulação com ácido sulfúrico  $0,01 \text{ N}$ . Sulfato (método turbidimétrico de sulfato de bário,  $1$  a  $70 \pm 1 \text{ mg/L}$ ), fosfato (método do ácido ascórbico,  $0,01$  a  $3 \pm 0,01 \text{ mg/L}$ ), nitrato de nitrogênio (redução de cádmio,  $0,10$  a  $30 \pm 0,3 \text{ mg/L}$ ), e cor (método platina-cobalto,  $1$  a  $500 \pm 0,2 \text{ mg/L}$ ) e foram quantificados por espectrofotômetro Hach DR-2800. Cloreto ( $0,01$  a  $100 \pm 0,02 \text{ mg/L}$ ) e fluoreto ( $0,01$  a  $2 \pm 0,01 \text{ mg/L}$ ) foram quantificados por eletrodos seletivos (Orion) calibrados com padrões específicos para cada íon. Alumínio, cálcio, ferro, potássio, magnésio, sódio e silício foram quantificados por Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES), instalado no Departamento de Engenharia Civil da UNESP de Bauru, com os seguintes limites de determinação:  $0,005 \text{ mg/L}$  para  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $0,067 \text{ mg/L}$  para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $0,276$  para  $\text{Na}^+$ ,  $0,042 \text{ mg/L}$  para  $\text{Si}^{4+}$ .

O critério usado para controlar a qualidade dos resultados obtidos para as águas subterrâneas na área urbana do município de Bauru foi feito com base no balanço de massa iônica. O balanço de massa molar ( $\Delta_{\text{ion}}$ ) foi calculado, conforme Equação 1. Do total de vinte e quatro poços estudados, nenhum foi descartado, pois mostraram um balanço iônico menor que 10%, indicando que os resultados foram representativos da realidade do aquífero estudado e adequados para este estudo (VANIER *et al.*, 2010).

$$\Delta_{\text{ion}} = \frac{[(\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions})100]}{(\sum \text{cátions} + \sum \text{ânions})} \quad (1)$$

Em que:

$$\begin{aligned} \sum \text{cátions} &= [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{K}^+] + [\text{Al}^{3+}] + [\text{F}^{3+}] + \\ &[\text{Si}^{4+}]; \\ \sum \text{ânions} &= [\text{HCO}_3^-] + [\text{Cl}^-] + [\text{F}^-] + [\text{PO}_4^{3-}] + [\text{NO}_3^-] \\ &+ [\text{SO}_4^{2-}]. \end{aligned}$$

Para a obtenção das correlações entre os parâmetros quantificados neste trabalho utilizou-se o *software Statistica for Windows 4.3<sup>TM</sup>*. A análise de correlação linear de Pearson foi utilizada para identificação em que valores acima de  $\pm 0,7$  indicam forte grau de correlação (direta ou indireta), sendo que valores iguais a zero indicam variáveis estatisticamente independentes (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2003). Foi usado, ainda, um programa computacional que visa à especificação hidroquímica, i.e. o programa *Phreeq C* (PARKRUSRT; APPELO, 1999).

#### 4 – RESULTADOS

Os resultados das análises físico-químicas e da composição química obtidos neste trabalho são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4. A temperatura média das águas subterrâneas foi de  $25,0^{\circ}\text{C}$ . O valor máximo de temperatura da água subterrânea foi registrado no poço 10 ( $26,8^{\circ}\text{C}$ ), sendo o menor valor obtido para o poço 5 ( $23,4^{\circ}\text{C}$ ). A média dos valores de condutividade elétrica foi de

101  $\mu\text{S/cm}$ , sendo os maiores valores caracterizados nos poços 14 e 19 ( $> 200 \mu\text{S/cm}$ ).

Tabela 2 – Resultados dos parâmetros físico-químicos obtidos para a avaliação da qualidade de água subterrânea na área urbana do município de Bauru

Poço	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	Cond ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH
1	24,6	122	6,9
2	24,5	34	5,4
3	25,1	78	6,5
4	25,4	125	6,8
5	23,4	48	6,0
6	24,8	48	5,9
7	24,3	30	5,6
8	24,6	41	5,9
9	25,0	182	7,2
10	26,8	167	6,7
11	24,8	46	5,8
12	24,6	33	5,7
13	25,7	184	6,4
14	25,3	252	7,6
15	24,9	59	6,5
16	25,1	48	6,3
17	24,5	113	6,1
18	25,4	182	7,4
19	25,7	207	7,4
20	25,5	81	6,5
21	24,1	92	6,7
22	25,4	27	5,7
23	25,8	180	6,2
24	25,3	57	6,0
Média	25,0	101	6,4

A hidrólise é a reação mais importante que afeta o pH de águas naturais. O valor médio encontrado para as águas subterrâneas do município de Bauru foi de 6,4, sendo o valor máximo obtidos no poço 14 (7,6). Destaca-se que o menor valor de pH foi obtido para o poço 2 (5,4). Ao todo, sete poços (2, 6, 7, 8, 11, 12 e 22) possuem pH abaixo do mínimo recomendado pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011, a qual define o padrão de potabilidade de água para o consumo no Brasil (BRASIL, 2011), ou seja, valores de pH entre 6 e 9.

Os processos de intemperismo químico são os principais responsáveis pelo aumento dos valores de alcalinidade nas águas subterrâneas e fluviais em relação às águas de chuva. Nas amostras analisadas, o valor médio de alcalinidade encontrado foi de 43 mg/L. O maior resultado obtido foi do poço 14 (105 mg/L) e o menor do poço 12 (10 mg/L).

Tabela 3 – Resultados dos ânions (mg/L) obtidos para a avaliação da qualidade de água subterrânea na área urbana do município de Bauru

Poço	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{N-NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{F}^-$
1	55	<1,0	0,12	0,6	<0,01	<0,01
2	15	<1,0	0,70	0,2	<0,01	<0,01
3	30	<1,0	0,80	0,7	<0,01	<0,01
4	49	<1,0	0,80	2,6	<0,01	<0,01
5	19	<1,0	0,14	0,7	<0,01	<0,01
6	29	<1,0	0,70	0,1	<0,01	<0,01
7	11	<1,0	0,70	0,1	<0,01	<0,01
8	17	<1,0	0,11	0,5	<0,01	<0,01
9	82	<1,0	0,12	1,2	<0,01	<0,01
10	70	<1,0	0,90	3,1	<0,01	<0,01
11	24	<1,0	0,23	0,1	<0,01	<0,01
12	10	<1,0	0,50	1,0	<0,01	<0,01
13	89	<1,0	0,10	3,4	<0,01	<0,01
14	105	<1,0	0,10	0,8	<0,01	<0,01
15	29	<1,0	0,11	0,4	<0,01	<0,01
16	26	<1,0	0,11	0,2	<0,01	<0,01
17	34	<1,0	0,08	3,2	<0,01	<0,01
18	83	<1,0	0,10	1,5	<0,01	<0,01
19	93	<1,0	0,28	0,2	<0,01	<0,01
20	26	<1,0	0,12	1,5	<0,01	<0,01
21	25	<1,0	0,09	1,5	<0,01	<0,01
22	11	<1,0	0,07	0,5	<0,01	<0,01
23	75	<1,0	0,06	1,5	<0,01	<0,01
24	26	<1,0	0,07	0,6	<0,01	<0,01
Média	43	<1,0	0,29	1,1	<0,01	<0,01

O fósforo é um elemento fundamental para o metabolismo dos seres vivos e sua presença em águas naturais depende das características das rochas da região. O íon sulfato constitui a principal fonte de enxofre para os produtores primários. O valor médio de fosfato encontrado para as águas subterrâneas do município de Bauru foi de 0,29 mg/L. Em relação ao sulfato, todas as amostras ficaram abaixo do limite de detecção da técnica utilizada para sua quantificação, ou seja,  $<1 \text{ mg/L}$ , bem abaixo do valor máximo permitido da Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) que é de 250 mg/L.

Os valores encontrados para os íons cloreto e fluoreto indicam que nenhuma amostra ultrapassou o valor limite recomendado pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011 (BRASIL, 2011), ou seja, 250 mg/L para o cloreto e 1,5 mg/L para o flúor, pois para todas as amostras, o valor da concentração destes íons ficaram abaixo do limite de detecção de 0,01 mg/L do método usado neste trabalho.

O nitrato, por sua vez, é o poluente de ocorrência mais frequente nas águas subterrâneas. Em concentrações superiores a 10 mg/L  $\text{N-NO}_3^-$  pode causar metahemoglobinemia e câncer. O valor médio de nitrato encontrado nas análises das águas subterrâneas do município de Bauru foi de 1,1 mg/L. Nenhum poço apresentou valores acima do valor máximo permitido pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011 (BRASIL, 2011), ou seja, 10 mg/L.

A CETESB tem uma referência de valor de alerta de 5 mg/L de  $\text{N-NO}_3^-$ , o qual indica que se um poço deve ser monitorado anualmente, além de que a vigilância sanitária municipal e a CETESB devem ser avisadas sobre estes valores. Tomando como base este valor, nenhum poço

apresentou concentração deste parâmetro acima do valor de alerta estabelecido pela CETESB. Apesar disso, todos os poços por possuírem concentrações de  $\text{N-NO}_3^-$  menores que 5 mg/L, devem ser monitorados a cada cinco anos, de acordo com a mesma agência.

Tabela 4 – Resultados dos cátions (mg/L) obtidos para a avaliação da qualidade de água subterrânea na área urbana do município de Bauru

Poço	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Si <sup>4+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
1	2,07	3,85	14,49	3,67	9,65	0,009	0,094
2	0,58	2,07	2,69	1,04	8,87	0,010	0,098
3	1,99	2,51	9,55	2,18	10,79	0,022	0,109
4	1,68	2,29	13,96	3,58	9,69	<0,005	0,056
5	2,19	1,16	4,73	1,19	8,75	0,062	0,150
6	0,55	2,08	5,81	1,66	10,49	<0,005	0,065
7	0,48	1,72	2,94	0,82	9,51	0,022	0,095
8	1,03	1,88	3,45	1,35	10,09	0,029	0,131
9	2,16	2,94	24,69	7,92	12,89	0,041	0,107
10	3,78	5,29	13,93	4,81	9,69	<0,005	0,068
11	1,09	1,94	4,39	1,39	9,99	0,033	0,129
12	1,37	2,66	1,29	0,80	7,36	0,032	0,100
13	9,45	2,79	15,09	4,09	11,03	0,006	0,110
14	2,14	5,00	22,99	7,43	8,29	0,061	0,180
15	0,62	1,29	7,78	1,63	8,03	0,034	0,142
16	0,72	1,99	5,78	1,12	8,14	0,014	0,108
17	2,66	1,78	10,92	2,72	10,53	0,031	0,117
18	4,97	2,33	22,40	6,29	13,78	0,019	0,063
19	12,84	2,51	21,26	3,35	7,06	0,037	0,088
20	1,33	2,18	9,49	2,84	11,15	<0,005	0,062
21	1,66	2,07	11,05	2,88	10,65	<0,005	0,079
22	0,74	1,78	1,71	0,82	7,47	0,044	0,149
23	3,49	3,12	17,87	5,03	9,89	0,052	0,118
24	1,16	1,60	11,54	2,35	10,18	0,085	0,110
Média	2,53	2,45	10,82	2,96	9,75	0,034	0,105

Os valores de cálcio nas amostras analisadas indicam um valor máximo de 24,69 mg/L (poço 9) e mínimo de 1,29 mg/L (poço 12), sendo a média dos valores encontrados nas águas subterrâneas de 10,82 mg/L. Estes mesmos poços apresentaram a maior e menor concentração de magnésio, ou seja, 7,92 e 0,80 mg/L, sendo 2,96 mg/L a média deste parâmetro nos poços de água subterrânea do município de Bauru.

O valor médio de sódio encontrado nas águas subterrâneas do município de Bauru foi de 2,53 mg/L, com os poços 19 (12,84 mg/L) e 2 (0,58 mg/L) apresentando a maior e menor concentração deste parâmetro, respectivamente. Todos os valores obtidos de sódio ficaram bem abaixo do valor limite permitido pela Portaria do Ministério da Saúde nº. 2914/2011 (BRASIL, 2011) de 200 mg/L. O valor médio obtido de potássio para as águas subterrâneas da área urbana de Bauru foi de 2,45 mg/L, com variação entre 1,16 mg/L para o poço 5 e 5,29 mg/L para o poço 10.

A média de silício, alumínio e ferro para as águas subterrâneas da área urbana do município de Bauru foi de 9,75, 0,034 e 0,105 mg/L, respectivamente. Nenhuma amostra coletada apresentou valores de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  maiores que o valor máximo permitido estabelecido pela Portaria

do Ministério da Saúde nº. 2914/2011 (BRASIL, 2011), ou seja, 0,20 e 0,30 mg/L, respectivamente. Estes mesmos limites são estabelecidos pela CETESB no estado de São Paulo para intervenção em poços de abastecimento de água subterrânea.

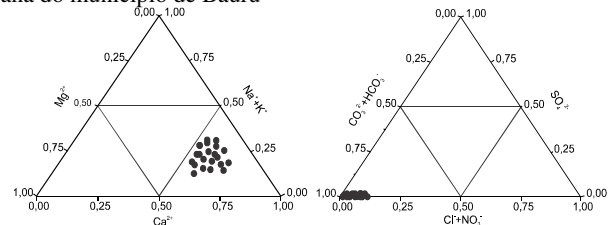
A média dos valores de dureza para as águas subterrâneas da área urbana de Bauru foi de 39,19 mg/L, variando de 6,51 mg/L (poço 12) a 94,20 mg/L (poço 9). De acordo com o proposto por Sawyer; McCarty; Parkin (2000), conforme a Tabela 5, estas águas subterrâneas podem ser classificadas como moles ou moderadamente duras, não prejudicando o abastecimento público devido à baixa dureza.

De maneira a classificar quimicamente as águas subterrâneas da área urbana de Bauru, decidiu-se utilizar um dos diagramas mais úteis para representar e comparar os resultados das análises de águas subterrâneas, isto é, o diagrama de Piper (1944), o qual indica a característica química da água e aponta semelhanças entre várias águas. Os cátions e ânions (expressos em porcentagem de mEq/L) são representados por dois triângulos distintos. Conforme o diagrama apresentado na Figura 3, todas as amostras são classificadas como cálcicas bicarbonatadas.

Tabela 5 – Classificação de dureza das águas (SAWYER; MCCARTY; PARKIN, 2000)

Dureza (mg/L de $\text{CaCO}_3$ )	Classificação das águas
0 – 75	Mole
75 – 150	Moderadamente dura
150 – 300	Dura
Maior que 300	Muito dura

Figura 3 – Diagrama de Piper para as águas subterrâneas na área urbana do município de Bauru



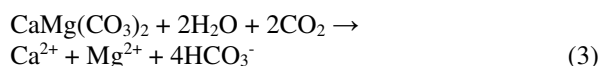
## 5 – DISCUSSÕES

Os testes estatísticos de correlação de Pearson que subsidiaram as discussões são apresentados na Tabela 6 e indicaram que não houveram parâmetros influenciados pela temperatura. Houve correlações significativas entre condutividade elétrica e pH ( $r = 0,84$ ), condutividade elétrica e alcalinidade ( $r = 0,98$ ), condutividade elétrica e cálcio ( $r = 0,94$ ) e condutividade elétrica e magnésio ( $r = 0,91$ ). Significativas correlações também foram obtidas entre pH e alcalinidade ( $r = 0,82$ ), pH e cálcio ( $r = 0,89$ ), pH e magnésio ( $r = 0,86$ ), alcalinidade e cálcio ( $r = 0,93$ ), alcalinidade e magnésio ( $r = 0,90$ ) e cálcio e magnésio ( $r = 0,94$ ).

Tabela 6 – Matriz de correlação obtida pela função de Pearson ( $P < 0,01$ ) para os resultados obtidos para os diversos parâmetros quantificados nas águas subterrâneas na área urbana do município de Bauru. Não foram feitas as correlações envolvendo  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{F}^-$ , pois os valores mensurados ficaram abaixo do limite de detecção

	Temp	Cond	pH	$\text{HCO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{N-NO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Si}^{4+}$	$\text{Al}^{3+}$	$\text{Fe}^{3+}$
Temp	1,00												
Cond	0,54	1,00											
pH	0,39	0,84	1,00										
$\text{HCO}_3^-$	0,57	0,98	0,82	1,00									
$\text{PO}_4^{3-}$	0,14	-0,18	-0,20	-0,18	1,00								
$\text{N-NO}_3^-$	0,40	0,42	0,24	0,39	0,04	1,00							
$\text{Na}^+$	0,42	0,45	0,48	0,48	-0,12	0,32	1,00						
$\text{K}^+$	0,57	0,48	0,53	0,46	0,19	0,34	-0,23	1,00					
$\text{Ca}^{2+}$	0,47	0,94	0,89	0,93	-0,24	0,36	0,56	-0,55	1,00				
$\text{Mg}^{2+}$	0,46	0,91	0,86	0,90	-0,20	0,42	0,35	0,46	0,94	1,00			
$\text{Si}^{4+}$	0,07	0,26	0,26	0,25	-0,09	0,37	0,01	0,02	0,42	0,50	1,00		
$\text{Al}^{3+}$	0,02	0,08	0,04	0,03	-0,36	-0,14	-0,13	-0,04	0,16	0,15	-0,16	1,00	
$\text{Fe}^{3+}$	-0,26	-0,04	-0,13	-0,03	-0,46	-0,28	-0,15	-0,04	-0,13	-0,06	-0,41	0,80	1,00

Estas correlações indicam que o pH e a condutividade elétrica estão sendo controlados pela alcalinidade, cálcio e magnésio, além de confirmar que a alcalinidade nas águas subterrâneas na área urbana do município de Bauru deve-se principalmente a bicarbonatos de cálcio e magnésio, como indicado pelo Diagrama de Piper, conforme Figura 3. A insaturação das águas subterrâneas do município de Bauru em relação à calcita, conforme figura 4a, indica que as fontes de cálcio, magnésio e alcalinidade estão relacionadas à dissolução dos carbonatos [calcita –  $\text{CaCO}_3$  e dolomita –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] presentes nas rochas sedimentares da Formação Adamantina, conforme as Equações 2 e 3.



Além do processo de dissolução dos carbonatos, que cimentam as rochas sedimentares da Formação Adamantina, outros minerais são encontrados nestas rochas, tais como microclínio –  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ , albita –  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  e quartzo –  $\text{SiO}_2$  (SOARES *et al.*, 1980). Pedro; Sieffermann (1979) consideram que o intemperismo deve-se basicamente à alteração de minerais primários, ou seja: minerais primários + solução de ataque = minerais secundários + lixiviados. A degradação primária ou total destruição das estruturas dos minerais primários pode produzir fases secundárias, onde o processo é fortemente influenciado pela natureza dos minerais primários, clima, biosfera e pelo tempo (MARTINI; CHESWORTH, 1992).

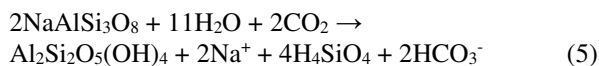
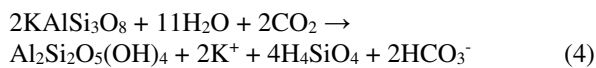
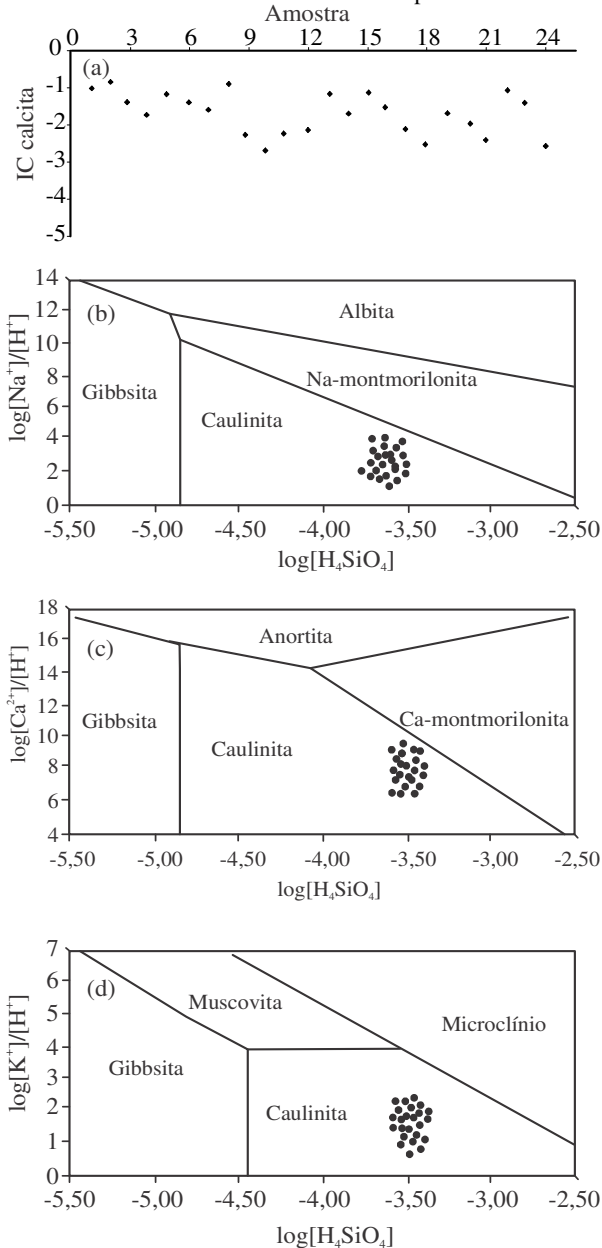
De acordo com o equilíbrio químico das amostras de águas subterrâneas coletadas nos poços da área urbana do município de Bauru obtido com o uso do programa Phreeq C (PARKRUSRT; APPELO, 1999), todas as amostras encontram-se no campo das caulinitas –  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , conforme as Figuras 4b, 4c e 4d, indicando que o principal processo intempérico atuante nos minerais primários das rochas sedimentares da Formação Adamantina é a hidrólise parcial, ou monossilicificação.

Esse processo ocorre pela hidrólise parcial da rocha mãe, com parte do  $\text{Si}^{4+}$  permanecendo no perfil de

alteração e  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  sendo eliminados. Assim, o  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  são esperados ser lixiviados pela hidrólise do microclínio e da albita, conforme as Equações 4 e 5 respectivamente. Quartzo não sofre processo intempérico, ou seja, não sofre alteração química, indicando que a presença de  $\text{Si}^{4+}$  nas águas subterrâneas deve-se a hidrólise dos mesmos minerais.



Figura 4 – Índice de saturação da calcita (a), diagrama de estabilidade à 25°C NaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>O (b), CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>O (c) e K<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>O (d) para as amostras de água subterrânea coletadas na área urbana do município de Bauru



De acordo com Soares *et al.* (1980), as rochas sedimentares da Formação Adamantina não apresentam minerais que possuem Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ou PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> nas suas fórmulas estruturais, sendo esperada pouca entrada desses elementos/compostos nas águas subterrâneas coletadas na área urbana do município de Bauru devido à interação água-rocha, como indicado pelos resultados aqui apresentados. A exceção foram as concentrações de nitrato acima de 2,5 mg/L de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nos poços 4, 10, 13 e 17. Os

elevados valores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> podem ser atribuídos a contaminação dos poços pela infiltração no solo de efluentes domésticos originados por vazamentos na rede coletora de esgoto sanitário ou fossas negras.

Nas condições de pH das águas subterrâneas coletadas nos poços de abastecimento público na área urbana de Bauru, tanto o alumínio quanto o ferro são imóveis, e suas concentrações esperadas devem ser baixas. Boa correlação entre alumínio e ferro foi obtida ( $r = 0,80$ ), sugerindo que a presença destes elementos deve ser associada à mesma fonte antrópica, ou seja, pela possível corrosão dos tubos de ferro fundido antigos usados como revestimentos de alguns destes poços de abastecimento.

## CONCLUSÕES

O município de Bauru encontra-se localizado na área do Sistema Aquífero Bauru, onde há uso da água subterrânea para diferentes atividades. Em geral, os resultados obtidos neste trabalho evidenciam que as águas subterrâneas do município de Bauru possuem pH ligeiramente ácido e baixa condutividade elétrica. Já os parâmetros químicos indicaram que essas águas são de moles a moderadamente duras (em relação a sua dureza total), possuem baixa concentração de ânions e cátions, sendo as amostras consideradas como bicarbonatadas cálcicas. Testes estatísticos de correlação e especiação hidrogeoquímica sugerem que tanto a condutividade elétrica como o pH devem estar sendo controlados pelas dissoluções de carbonatos durante o processo intempérico de interação água/rocha. Além disso, indica que o principal processo intempérico atuante nos minerais silicatados formadores das rochas sedimentares da Formação Adamantina é a hidrólise parcial, ou monossilatização. As concentrações de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> encontradas em alguns poços de Bauru podem ser explicadas pela contaminação por efluentes domésticos. Da mesma maneira, a moderada concentração de ferro e alumínio, juntamente com a correlação entre esses metais, sugere uma fonte antrópica para eles, provavelmente advinda da corrosão dos antigos tubos usados como revestimentos de alguns poços de abastecimento da área urbana de Bauru.

Sendo a água subterrânea um recurso renovável que pode degradar-se e converter-se em um recurso não utilizável, deve-se prevenir esta situação, controlando o lançamento de efluentes, principal fonte de contaminação das águas subterrâneas na área de estudo. Além disso, é conveniente e necessária a delimitação de áreas de proteção, as quais já deveriam estar caracterizadas por um plano diretor municipal. Nas zonas urbanas seria importante estabelecer o zoneamento da vulnerabilidade à poluição, a partir das características naturais dos aquíferos. Além disso, seria necessário desenvolver campanhas de divulgação, educação e capacitação de todos os atores em relação ao manejo desse recurso natural, para que haja uma exploração adequada sustentável sem que se comprometa a sua qualidade, preservando-o para as gerações futuras.



REFERÊNCIAS

- BARCHA, S. F. **Aspectos geológicos e províncias hidrogeológicas da Formação Bauru na região norte-ocidental do Estado de São Paulo**. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, UNESP, São José do Rio Preto, Tese de Livre Docência, 1980.
- BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ª ed. Editora Unicamp, 2003.
- BRASIL – **MINISTÉRIO DA SAÚDE**. Portaria MS nº. 2914. Brasília, Ministério da Saúde, 2011.
- CETESB – **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. Decisão de Diretoria nº. 195-2005. CETESB, São Paulo, 2005.
- \_\_\_\_\_. – **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo: 2007-2009. CETESB, São Paulo, 2010.
- CONCEIÇÃO, F. T.; CUNHA, R.; SARDINHA, D. S.; SOUZA, A. D. G.; SINELLI, O. Hidrogeoquímica do Aquífero Guarani na área urbana de Ribeirão Preto, SP. **Geociências**, v. 28, n. 1, p. 65-77, 2009.
- FIGUEIREDO, J. C.; PAZ, R. M. **Nova Classificação Climática e o aspecto climatológico de Bauru, SP**. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém, 2010.
- GODOY, M. T. F.; BOIN, M. N.; SANAIOTTI, D. C.; SILVA, J. Contaminação das águas subterrâneas por nitrato em Presidente Prudente, SP, Brasil. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 63, n. 2, p. 208-214, 2004.
- HIRATA, R. Estudo da contaminação por nitrato no Distrito de Tibiricá, Bauru. São Paulo, **DAE/IGc-USP**. Relatório técnico, 2000.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de 2010**. IBGE, 2011. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 19 jan. 2012.
- MARTINI, I. P., CHESWORTH, W. **Weathering, soils and paleosols**. Elsevier Science Publications, Amsterdam, 1992, p. 618.
- PARKHURST, D. L.; APPELO, C. A. J. User's guide to PHREEQ C – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. Denver: USGS, **Water-resources investigation**, Report 99-4259, 1999, 310 p.
- PAULA e SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO  
CHANG, M. R. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, p. 19-36, 2005.
- PEDRO, G.; SIEFFERMANN, G. Weathering of rocks and formation of soils. In: Siegel, F. R. (ed.), **Review in Modern Problems of Geochemistry**. UNESCO, p. 39-55, 1979.
- PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Transactions American Geophysical Union**, v. 25, p. 914-928, 1944. <http://dx.doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.
- PRANDI, E. **Gestão integrada das águas do Sistema Aquífero Bauru nas bacias hidrográficas dos rios do Aguapeí e Peixe, SP**. Tese de Doutorado, IGCE, UNESP, Rio Claro, 2010, 142 p. PMCID:PMC3019669.
- PROCEL, S. **Contaminação por nitrato e sua relação com o crescimento urbano no Sistema Aquífero Bauru em Presidente Prudente, SP**. Dissertação (Mestrado), IGc, USP, 2011. PMCID:PMC3163535.
- REYNOLDS-VARGAS, J.; FRAILE-MERINO, J.; HIRATA, R. Trends in nitrate concentrations and determination of their origin using stable isotopes (<sup>18</sup>O and <sup>15</sup>N) in groundwater of the western Central Valley, Costa Rica. **Ambio: A Journal of the Human Environment**, v. 35, n. 5, p. 229-236, 2006.
- SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. **Chemistry for sanitary engineers**. 4<sup>th</sup> ed., New York, McGraw-Hill, 2000.
- SILVA, S. R.; CHANG, H. K. Hidroquímica dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani na região metropolitana de Bauru, SP. **Águas Subterrâneas**, v. 24, n. 1, p. 69-84, 2010.
- 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**, v. 10, n. 3, p. 177-185, 1980.
- STRADIOTO, M. R. **Hidrogeoquímica e aspectos diagenéticos do sistema aquífero Bauru na região sudoeste do Estado de São Paulo**. Dissertação Mestrado em Geociências e Meio Ambiente - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", - Campus de Rio Claro, 2007.
- VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M.; ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R. Nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru área urbana do município de Marília, SP. **Revista do Instituto Geológico**, v. 31, n. 1/2, p. 01-21, 2010.
- ZOBY, J. L. G. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília, ANA, 2005.