Hidroquímica dos aquíferos Tubarão e Cristalino na região de Indaiatuba-Rafard, Estado de São Paulo

Sibele EZAKI¹, Geraldo, H. ODA¹, Mara A. IRITANI¹, Carla VEIGA² & Márcia R. STRADIOTO³

1. Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Av. Miguel Stéfano 3900, CEP 04301-903, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: sibezaiki@igeologico.sp.gov.br, mara.iritani@igeologico.sp.gov.br, ghoda1947@gmail.com.
2. Agência Nacional de Águas – ANA. Setor Policial, área 5, Quadra 3, Blocos “B”, “L”, “M”, e “T”, CEP 70610-200, Brasília, DF, Brasil. E-mail: carla.veiga@gmail.com.
3. Laboratório de Estudos de Bacias, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Av. 24-A, 515, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil. E-mail: marciastradioto@uol.com.br.

Recebido em 04/2013. Aceito para publicação em 02/2014.
Versão online publicada em 15/05/2014 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo – Este trabalho apresenta uma caracterização hidroquímica e da qualidade da água subterrânea dos aquíferos Tubarão (sedimentar, granular) e Cristalino (fissural) na porção sul da Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (UGRHI 05) que abrange os municípios de Indaiatuba, Salto, Monte Mor, Elias Fausto, Capivari e Rafard, Estado de São Paulo. O Aquífero Cristalino apresenta águas predominantemente bicarbonatadas cálcicas e sódicas, com pH médio de 7,35, enquanto as águas do Aquífero Tubarão são bicarbonatadas sódicas, com pH médio de 8,15, e ocorrência de águas sulfatadas sódicas. De modo geral, a salinidade e concentração de sódio destas águas tende a aumentar no sentido do fluxo subterrâneo das áreas de recarga para as de descarga nos principais rios da região. A correlação de dados isotópicos de δD e $\delta^{18}O$ evidenciou a influência de águas meteóricas na composição de ambos os aquíferos, mas também indicou que algumas porções do Aquífero Tubarão estão confinadas com a presença de águas de recarga mais antigas e associadas a um período em que o clima era frio. Nas análises químicas de poços amostrados e de laudos de relatórios de poços, foram averiguados alguns parâmetros que se apresentam acima do padrão de potabilidade como fluoreto, sólidos totais dissolvidos, ferro total, manganês e nitrato. A ocorrência de elevados teores de F^- e STD está associada a anomalias naturais da região; $Fe(t)$ e Mn^{2+} podem estar relacionados às características das formações geológicas embora sejam necessários estudos complementares para averiguar a influência de fontes de contaminação ou de problemas construtivos de poços. Casos de contaminação por NO_3^- são ainda pontuais, e indicam influência de cargas potenciais associadas à ocupação urbana e que merecem um monitoramento.

Palavras-chave: Hidroquímica, Aquífero Tubarão, Aquífero Cristalino, águas subterrâneas, qualidade

Abstract – HYDROCHEMISTRY OF TUBARÃO AND CRYSTALLINE AQUIFERS IN INDAIATUBA-RAFARD REGION, SÃO PAULO STATE. This paper presents a hydrochemical and groundwater quality characterization of the aquifers Tubarão (sedimentary, granular) and Crystalline (fissural) in the southern portion of the Basin of Piracicaba, Capivari and Jundiá Rivers (UGRHI 05) which involves the municipalities of Indaiatuba, Salto, Monte Mor, Elias Fausto, Capivari and Rafard, São Paulo State. The Crystalline Aquifer waters are predominantly calcium and sodium bicarbonate, with pH average of 7.35, while the waters of Tubarão Aquifer are sodium bicarbonate, with pH average of 8.15, and occurrence of sodium sulfate waters. The sodium concentration and salinity of these groundwaters tend to rise usually in the direction of groundwater flow, from recharge areas to discharge areas in the main rivers. The correlation of isotopic data δD and $\delta^{18}O$ demonstrated an influence of rainwater on the composition of both aquifers, but also indicated that certain portions of the Tubarão Aquifer are confined with the presence of older recharged waters associated with a cold weather period of time. Chemical analyzes of sampled well waters and of well reports, indicate some parameters that exceeded potability standard values: fluoride, total dissolved solids, total iron, manganese and nitrate. The occurrence of high levels of F^- and TDS is associated with natural anomalies of the region; $Fe(t)$ and Mn^{2+} may be related to the characteristics of the geological formations, although additional studies are necessary to investigate the influence of sources of contamination or well construction problems. Contamination cases by NO_3^- are still punctual and indicate a potential influence of sewage loads associated with the urban occupation and must be monitored.

Keywords: Hydrochemistry, Tubarão Aquifer, Crystalline Aquifer, ground water, quality

1 Introdução

A região que abrange os municípios entre Indaiatuba e Rafard (SP) apresenta crescente demanda por água subterrânea tanto para abastecimento público

como para usos privados, decorrente do crescimento populacional, desenvolvimento econômico e expansão urbana. A procura por este recurso intensificou-se nas duas últimas décadas, apesar da baixa disponibilidade hídrica relacionada às características intrínsecas dos

principais aquíferos explorados – Tubarão (sedimentar) e Cristalino (fissural) com vazões medianas de 7,3 m³/h e 7,0 m³/h (Pereira, 1997), respectivamente. Esta área situa-se a sul da região metropolitana de Campinas (SP) e apresenta problemas similares relacionados à degradação dos mananciais superficiais e consequente elevação do custo de tratamento dessas águas, assim como sinais de escassez. Nesse sentido, os mananciais subterrâneos se tornam importantes fontes alternativas para o abastecimento.

No Estado de São Paulo, aproximadamente 80% dos municípios são total ou parcialmente abastecidos por água subterrânea. Na área estudada (Fig. 1) os municípios de Rafard e Elias Fausto dependem totalmente das águas subterrâneas para abastecimento público, enquanto os demais dependem parcialmente: Capivari (63,72 %), Monte Mor (45,95 %) e Indaiatuba (0,59 %). Somente Salto utiliza 100 % de recursos hídricos superficiais (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2008).

Figura 1. Localização da área de estudo.

Considerando o intenso processo de urbanização e de industrialização, é importante que haja avaliação das características naturais das águas subterrâneas, bem como da influência de potenciais fontes de contaminação (naturais ou de origem antrópica) sobre a sua qualidade, visando garantir o melhor aproveitamento e estabelecer medidas de proteção quando houver perigo.

Este trabalho tem como proposta a caracterização hidroquímica e isotópica dos aquíferos Tubarão e Cristalino, além da avaliação da qualidade das águas subterrâneas nos municípios indicados, levando-se em consideração a ocorrência de anomalias geoquímicas naturais na região, como elevadas concentrações de fluoreto e de salinidade (Vidal, 2002; Hypolito *et al.*, 2010; Ezaki, 2011).

Trata-se de região que constitui uma lacuna em termos de estudos hidrogeológicos efetuados pelo Instituto Geológico-SMA numa faixa que se estende desde a região sul de Sorocaba até ao norte de Campinas com a finalidade de subsidiar o planejamento territorial, podendo ser citados os trabalhos de Sorocaba (Instituto Geológico, 1990); Folha de Salto de Pirapora (Instituto Geológico, 1990); Itu (Instituto Geológico, 1991); Campinas (Instituto Geológico, 1993); Média Bacia do Rio Piracicaba (Instituto Geológico, 1995).

Os resultados deste trabalho compõem parte de projeto desenvolvido pelo Instituto Geológico (2012), e auxiliaram na identificação de áreas potenciais de restrição e controle ao uso da água subterrânea no que se refere ao potencial de contaminação das águas.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Contexto geológico da área

A área situa-se na borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná, na Depressão Periférica Paulista, onde sedimentos permocarboníferos do Grupo Tubarão recobrem o embasamento cristalino pré-cambriano representado, na região, por rochas de médio a alto grau metamórfico do Complexo Amparo, que correspondem a gnaisses com intercalações de quartzitos, xistos, anfibolitos, gonditos e metaultrabasitas (Almeida *et al.*, 1981; Bistrichi *et al.*, 1981; Sachs, 1999a, 1999b; Neves, 2005). Ainda compondo o embasamento, ocorrem intrusões granitóides encaixadas nos gnaisses e migmatitos, dentre as quais se destaca o Complexo Granitóide Itu ou Granito Itu (Galembeck, 1997).

Na região, as rochas sedimentares do Grupo Tu-

barão subdividem-se em duas unidades, o Subgrupo Itararé e a Formação Tatuí. O Subgrupo Itararé corresponde à unidade basal, mais espessa do Grupo Tubarão, e foi depositado em ambientes lacustres, deltaicos e marinhos presentes na interface entre o continente e a plataforma marinha, sob influência glacial, periglacial e interglacial (Stevaux *et al.*, 1987; Zalán *et al.*, 1991; Petri & Pires, 1992; Santos, 1996, Salvetti, 2005). Constitui-se de litotipos bastante variáveis e descontínuos representados por intercalações e associações de arenitos, siltitos, folhelhos, argilitos, diamictitos e ritmitos, com variação e interdigitação faciológica, tanto horizontal como verticalmente. A totalidade dos poços tubulares construídos e que explotam as águas do Grupo Tubarão correspondem a esta unidade.

Ocorrem também rochas intrusivas básicas (*sills* ou diques) da Formação Serra Geral (Grupo São Bento) e materiais de cobertura cenozóicos (Fig. 2).

Figura 2. Mapa geológico simplificado da área de estudo.

Estas unidades correspondem aos principais sistemas aquíferos da região que foram denominados de Tubarão, Cristalino e Diabásio. O Sistema Aquífero Tubarão (SAT) consiste na principal fonte de abastecimento de água subterrânea e é um aquífero livre com características locais de semi-confinado devido à disposição irregular de camadas e lentes de sedimentos finos (lamito, siltito, folhelho) em meio a sedimentos clásticos grossos (arenito, conglomerado e diamictito), conforme seu ambiente sedimentar de deposição. Isolamento de corpos arenosos, baixa permeabilidade devido presença de lentes de argila e baixa porosidade, dificultam o fluxo vertical da água, conferindo-lhe características anisotrópicas (Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1981a, 1981b).

O SAT apresenta produtividade limitada, contendo localmente áreas de maior potencial. A capacidade específica mediana é de $0,125 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e a vazão de $7 \text{ m}^3/\text{h}$ para poços situados fora dos lineamentos de drenagem, na região metropolitana de Campinas (RMC) (Pereira, 1997). O fluxo regional das águas subterrâneas é de leste para oeste, da borda para o interior da Bacia do Paraná, podendo apresentar direção N-S próximo a vales dos principais rios da região (Rio Capivari, Rio Tietê e Rio Sorocaba) (Vidal, 2002).

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) ocorre na porção leste dos municípios de Salto e Indaiatuba e corresponde ao embasamento do SAT. O armazenamento e a circulação das águas subterrâneas ocorrem através das fraturas das rochas e/ou através do manto de alteração das mesmas. Pelos estudos realizados por Departa-

mento de Águas e Energia Elétrica (1981b), na Região Administrativa de Sorocaba, a capacidade específica mediana deste aquífero é de $0,22 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ nos poços localizados em lineamentos de drenagem. Fora dos lineamentos de drenagem a mediana é de $0,038 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Pereira (1997) encontrou na RMC capacidades específicas mediana e média de $0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ (intervalos de 0,05 a 0,5) e $0,28 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, respectivamente, e vazões mediana e média de $5,2 \text{ m}^3/\text{h}$ e $7,3 \text{ m}^3/\text{h}$. O escoamento da água subterrânea regional deste sistema aquífero na Bacia do Rio Jundiá dirige-se para oeste, rumo à Bacia Sedimentar (Neves, 2005).

O terceiro sistema é o Aquífero Diabásio, composto por rochas intrusivas básicas (principalmente, diabásios) e ocorre de forma irregular e restrita. Por ser pouco explorado (menos de 1 % dos poços) na área não foi avaliado neste estudo.

2.2 Materiais e métodos

Durante as campanhas de levantamento de campo foram cadastrados 1262 poços tubulares, dos quais se selecionaram 41 poços para amostragem de água e análise química, priorizando-se aqueles em funcionamento, de abastecimento público ou particulares, situados na proximidade de estabelecimentos industriais. Dentre estes poços, 7 exploram o Aquífero Cristalino, 28 o Aquífero Tubarão, 2 correspondem a poços mistos (Tubarão/Cristalino e Tubarão/Diabásio) e 7 exploram aquífero não definido (Fig. 3).

Figura 3. Localização dos poços tubulares profundos amostrados.

Amostras de água subterrânea foram coletadas na saída do poço, após período de 5 a 10 min de bombeamento e acondicionadas em frascos plásticos de polietileno de alta densidade (PEAD). Logo após a coleta, foram analisados *in situ* os parâmetros pH, Eh (potencial de óxido-redução), temperatura, utilizando eletrodos de vidro e combinado de platina e condutividade elétrica (DIGIMED). A alcalinidade foi determinada por titulometria, conforme Hypolito *et al.* (2009).

Em seguida, as amostras foram filtradas (filtro de acetato de 0,45 μm), armazenadas em frascos de PEAD e mantidas à temperatura inferior a 4°C para encaminhamento ao laboratório de análises químicas. A preservação das amostras foi realizada no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro. Os parâmetros químicos analisados foram: Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- (cromatografia iônica); Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{(\text{total})}^{3+}$, Mn^{4+} , Al^{3+} (espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma de argônio indutivo ICP-AES). A alcalinidade em laboratório foi determinada por titulometria potenciométrica. As análises basearam-se no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Health Association/ American Water Works Association/ Water Environment Federation, 1995).

Cerca de 50 mL de amostras de água foram coletadas em duplicata e armazenadas em frasco de vidro âmbar à temperatura ambiente para análises de isótopos ^{18}O e deutério, efetuadas no Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências, USP, São Paulo.

Os íons maiores foram selecionados de modo a possibilitar o cálculo do balanço iônico e a classificação química das águas subterrâneas. O balanço iônico (erro em %) foi calculado conforme procedimentos propostos por Custódio & Llamas (1983).

Para classificação dos tipos hidroquímicos os dados foram tratados e lançados em Diagramas de Piper e de Stiff, com recurso do programa AcquaChem 5.1 da Schlumberger Water Services.

Os valores de sólidos totais dissolvidos foram calculados pela razão: STD calculado / Condutividade Elétrica = 0,65. O fator de conversão 0,65 foi obtido através da média de valores (STD/CE) extraídos de relatórios de poços da região.

Para avaliar a qualidade das águas foram considerados os resultados destas 41 amostras, além de dados coletados em 470 laudos referentes a 360 poços outorgados. Parâmetros como nitrato, fluoreto, ferro, manganês e total de sólidos dissolvidos foram utilizados como indicadores da qualidade das águas dos aquíferos. Os dados de concentração destes parâmetros de água foram representados espacialmente utilizando-se o programa ArcView 10.1 da ESRI (versão de 2012).

3 Resultados e discussões

As tabelas 1 e 2 contêm informações dos poços tubulares amostrados na região entre Indaiatuba e

Rafard e resultados das análises químicas a partir dos quais foram identificados os tipos hidroquímicos dominantes para os aquíferos estudados – Cristalino, Tubarão e sistema misto Tubarão/Cristalino.

3.1 Hidroquímica

No Aquífero Cristalino as águas são do tipo bicarbonatada sódica, cálcica ou mista (Na-Ca-HCO_3 , Ca-Na-HCO_3), com proporções variáveis de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Fig. 4). Esta classificação é concordante com as de Campos (1993) e Diogo *et al.* (1981). O Departamento de Águas e Energia Elétrica (1981b) classificou as águas do Aquífero Cristalino como predominantemente bicarbonatadas cálcicas (89 %) e bicarbonatadas sódicas (11%), considerando-se dados de 18 poços da Região Administrativa de Sorocaba.

As amostras dos poços N°16, 19 e 35 sofrem influência da cobertura sedimentar (com pequena espessura variando de 25 a 48 m) sobreposta ao granito na sua composição química, podendo ocorrer ocasionalmente alguns casos de águas enriquecidas em sulfato ($\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$). Isto também foi observado por Ezaki (2011) em poços que exploram o Cristalino em Salto (SP).

O pH médio das águas do Aquífero Cristalino é de 7,35 variando de 6,3 a 8,1. Suas águas são fracamente mineralizadas, constatado pelos baixos valores de condutividade elétrica com média de 170 $\mu\text{S/cm}$, também condizentes com valores encontrados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (1981b), inferiores a 260 $\mu\text{S/cm}$. Um poço em Salto (SA-1) apresentou valor elevado de CE (1306 $\mu\text{S/cm}$) e não foi considerado na média por representar uma anomalia que deverá ser investigada quanto à origem da salinidade.

As águas do Aquífero Tubarão são predominantemente bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3 , Na-Ca-HCO_3), podendo ocorrer águas bicarbonatadas cálcicas (Ca-Na-HCO_3 , Ca-Mg-Na-HCO_3) e magnesianas (Mg-Ca-HCO_3) e águas sulfatadas ($\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$, $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$) (Fig. 4). Estas características são concordantes com dados regionais obtidos a partir de 30 poços dos estudos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (1981b) para a Região Administrativa de Sorocaba que são, em sua maioria, bicarbonatadas sódicas (66,7 %), seguidas de bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (30%) e, em pequena proporção (3,3 %), cloretadas sódicas. Campos (1993) constatou tais características e teores mais elevados de cloretos e sulfatos em relação ao Aquífero Cristalino.

Os valores de pH variam de 6,2 a 9,6 e a média é de 8,15 denotando característica alcalina. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (2007) também registrou pH alcalino com valor médio em torno de 9,0. Diniz (1990) averiguou pH das águas entre 7,0 e 9,7 na região do Médio Tietê (SP).

Tabela 1. Dados dos poços tubulares amostrados e resultados físico-químicos das águas subterrâneas da região estudada.

Nº	Amostra	Nº Poço IG	UTME (m)	UTMN (m)	Aquífero	Prof. (m)	CE (µS/cm)	pH	Temperatura (°C)	Classificação de Piper
1	CAP - 1	1675	243426	7452292	T	301	321	8,3	25,2	Na-HCO3-SO4
2	CAP - 2	1703	242620	7451888	T	300	274	7,8	25,1	Na-Ca-HCO3
3	CAP - 3	355	241540	7454750	T	300	259	8,3	25,0	Na-HCO3
4	CAP - 4	1674	242836	7453930	T	292	271	7,9	24,6	Na-HCO3
5	CAP - 5	860	242010	7455622	ND	300	286	7,8	23,8	Na-Ca-HCO3
6	CAP - 6	584	248340	7468375	TD	400	311	9,6	28,8	Na-HCO3-CO3
7	CAP - 7	918	246394	7455822	T	137	308	6,7	25,2	Ca-Na-HCO3
8	EF - 1	4207	256427	7448870	T	320	299	7,9	22,2	Na-Ca-HCO3
9	EF - 2	2937	257363	7451410	T	252	255	8,4	25,2	Na-HCO3
10	EF - 3	4213	263616	7446913	T	172	284	7,9	24,0	Ca-Na-HCO3
11	EF - 4	4182	253970	7446139	T	104	54	6,2	26,0	Na-HCO3
12	EF - 5	4191	258096	7449600	T	102	356	7,5	24,9	Ca-Na-HCO3
13	EF - 6	3366	261988	7449970	T	156	219	8,2	25,2	Na-Ca-HCO3
14	IN - 1	3523	281697	7449060	C	220	188	7,6	23,9	Na-Ca-HCO3
15	IN - 2	4345	277878	7440847	C	80	291	7,1	23,0	Ca-Na-Mg-H
16	IN - 3	3668	271521	7440175	C	250	212	8,1	26,6	Na-HCO3
17	IN - 4	3854	274859	7444935	T	282	291	7,9	25,7	Na-Ca-HCO3
18	IN - 5	3929	276362	7449094	T	74	175	7,5	24,1	Ca-Na-HCO3
19	IN - 6	3867	267613	7442943	C	144	28,5	6,3	24,9	Na-Ca-HCO3-CO3
20	IN - 7	4305	271659	7440546	C	270	107	6,9	25,6	Ca-Na-Mg-HCO3
21	MM - 1	4430	272230	7463350	T		156	8,0		Na-HCO3
22	MM - 2	569	263676	7459650	T	315	371	9,2	26,5	Na-HCO3
23	MM - 3	3926	255212	7456920	ND		406	9,0	26,4	Na-HCO3
24	MM - 4	1448	261129	7457662	T	186	209	8,9	26,0	Na-HCO3
25	MM - 5	570	256632	7456483	T	236	442	9,1	27,3	Na-HCO3
26	MM - 6	4154	263996	7459708	T	150	345	9,2	27,4	Na-HCO3
27	MM - 7	1441	269397	7463997	ND		97	6,3	26,1	Na-Ca-HCO3
28	MM - 8	1648	274017	7461580	ND		197	6,6	24,0	Na-Ca-HCO3
29	RA - 1	317	240416	7454105	T	251	415	8,8	26,9	Na-HCO3
30	RA - 2	1081	241362	7452632	T	181	299	9,1	26,8	Na-HCO3
31	RA - 3	315	233205	7443705	T	160	260	8,0	22,9	Na-Ca-HCO3
32	RA - 4	1834	239832	7450975	T	340	222	7,0	25,5	Ca-Mg-Na-HCO3
33	RA - 5	1830	233173	7448782	T	120	230	9,2	26,0	Na-HCO3-CO3
34	RA - 6	1079	241641	7451944	T	176	227	8,7	26,5	Na-HCO3
35	SA - 1	4444	261,890	7432970	C	198	1306	7,8	24,4	Ca-Na-SO4
36	SA - 2	4145	268,300	7437700	T	150	309	7,8	24,0	Na-Ca-HCO3-SO4
37	SA - 3	948	267331	7436051	T	200	335	8,2	25,0	Na-Ca-HCO3-SO4
38	SA - 4	3821	267419	7430794	C	270	195	7,7	24,9	Ca-Na-HCO3
39	SA - 5	3665	265030	7435994	TC	282	320	8,6	27,3	Na-HCO3
40	SA - 6	4129	260393	7441919	T	190	274	8,6	25,0	Na-HCO3
41	SA - 7	952	260063	7439064	T	120	237	7,7	25,6	Ca-Na-HCO3

Aquífero: T=Tubarão; C=Cristalino; TC=Tubarão/Cristalino; ND=Não Definido

Tabela 2. Resultados analíticos químicos (concentração em mg/L) e isotópicos (em ‰) das águas subterrâneas da região estudada.

Nº	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Fe _t	δD	δ ¹⁸ O
			250,00*	250,00*	1,50*	45,00*	200,00*				0,20*	0,10*	0,30*		
1	154	< 2,00	36,1	3,51	1,54	0,46	60,6	10,4	1,01	0,3	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-61,56	-8,25
2	181	< 2,00	2,25	0,51	0,06	0,86	42,5	25,5	1,70	1,03	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-51,08	-6,96
3	163	< 2,00	7,53	0,57	0,1	0,3	50,4	8,65	1,44	0,34	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-60,87	-8,25
4	148	< 2,00	12,1	5,28	0,17	3,95	58,5	3,36	0,78	0,23	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-55,93	-7,75
5	189	< 2,00	5,02	1,43	< 0,02	< 0,10	34,7	28,6	1,75	0,69	< 0,010	0,018	< 0,010	-52,4	-7,28
6	130	36,7	2,78	0,38	0,37	< 0,10	72,4	1,95	< 0,025	< 0,20	0,014	< 0,010	< 0,010	-60,87	-8,15
7	143	< 2,00	21,10	10,2	< 0,02	9,03	23,4	34,3	4,35	1,84	< 0,010	0,036	< 0,010	-44,75	-6,33
8	194	< 2,00	5,32	0,71	0,08	0,43	35,6	27,3	3,89	2,07	< 0,010	0,36	0,13	-53,00	-7,59
9	164	< 2,00	6,32	0,33	0,05	0,28	57,9	2,2	0,3	0,3	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-63,44	-8,96
10	188	< 2,00	2,40	0,43	0,02	0,26	29,7	32,3	6,17	2,13	< 0,010	0,13	0,046	-48,46	-7,12
11	30,1	< 2,00	1,07	0,97	0,03	1,39	6,63	1,47	1,19	2,6	0,019	< 0,010	0,011	-49,8	-7,04
12	245	< 2,00	4,33	0,08	0,12	< 0,10	20,2	45,6	8,71	1,2	< 0,010	0,62	< 0,010	-46,51	-7,04
13	145	< 2,00	3,12	0,21	0,06	< 0,10	25,8	17,6	3,29	1,71	< 0,010	0,11	< 0,010	-53,88	-7,83
14	91,4	< 2,00	11,40	5,42	1,41	0,3	28,9	9,44	1,91	< 0,20	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-51,56	-7,70
15	109	< 2,00	7,28	11,3	0,29	44,5	22,3	24,7	10,2	3,18	< 0,010	0,016	0,056	-43,68	-6,6
16	121	< 2,00	9,35	1,21	1,72	< 0,10	40,8	7,11	0,4	0,55	0,025	< 0,010	< 0,010	-50,02	-7,4
17	149	< 2,00	2,52	5,41	0,13	24,6	40,1	14,4	4,95	1,8	0,028	< 0,010	< 0,010	-46,86	-7,01
18	112	< 2,00	2,43	0,21	0,08	< 0,10	12,4	20,6	2,15	1,96	0,023	< 0,010	< 0,010	-45,67	-7,11
19	17,7	< 2,00	0,15	0,02	< 0,02	0,15	2,24	1,37	0,51	2,28	0,012	< 0,010	< 0,010	-45,41	-6,92
20	67,2	< 2,00	0,16	0,16	0,05	0,96	6,87	9,59	3,09	1,62	0,016	< 0,010	< 0,010	-42,81	-6,52
21	103	< 2,00	3,61	0,32	0,04	0,21	32,4	2,48	0,21	0,75	0,032	< 0,010	< 0,010		
22	192	16,60	12,30	1,72	0,29	0,67	88	0,99	0,056	1,87	0,011	< 0,010	< 0,010	-65,39	-8,94
23	241	11,30	7,15	0,86	0,15	0,5	99,5	1,21	0,18	< 0,20	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-61,79	-8,90
24	103	13,10	4,37	0,16	0,09	< 0,10	47,3	1,6	0,039	< 0,20	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-60,79	-8,70
25	245	22,20	8,22	1,2	0,21	< 0,10	108	1,02	0,11	< 0,20	0,014	< 0,010	< 0,010	-61,83	-8,97
26	177	18,30	10,50	1,43	0,25	< 0,10	82,1	1,02	0,033	< 0,20	0,012	< 0,010	< 0,010	-62,00	-9,14
27	46	< 2,00	0,45	1,9	0,06	8,32	9,47	4,54	2,15	3,53	< 0,010	0,01	< 0,010	-49,55	-6,91
28	94,7	< 2,00	1,88	11,5	< 0,02	1,89	17,5	15,1	3,07	3,09	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-49,13	-7,18
29	234	6,98	12,80	6,64	0,25	< 0,10	97,5	1,61	0,084	1,91	0,01	< 0,010	< 0,010	-55,7	-8,04
30	170	8,73	9,07	1,42	0,21	8,71	69,5	1,32	0,1	0,51	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-61,93	-9,00
31	165	< 2,00	9,64	0,9	0,10	< 0,10	35	20,3	2,63	1,11	< 0,010	0,11	< 0,010	-58,46	-8,44
32	126	< 2,00	0,30	8,84	0,10	0,15	11	20,9	8,38	2,01	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-42,48	-5,56
33	99,1	18,80	8,48	0,82	0,23	< 0,10	51,1	2,29	0,33	< 0,20	0,019	< 0,010	< 0,010	-60,07	-8,76
34	135	6,09	2,36	0,73	0,11	< 0,10	50,4	3,85	0,087	0,26	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-54,80	-8,23
35	103	< 2,00	469,00	95,3	2,58	< 0,10	148	132	4,52	0,53	0,03	0,021	< 0,010	-52,07	-7,93
36	108	< 2,00	45,40	11,4	0,54	< 0,10	29,6	24	5,09	1,58	0,029	< 0,010	< 0,010	-48,97	-7,51
37	131	< 2,00	38,90	9,44	3,49	< 0,10	54,4	16,7	0,55	0,26	0,024	< 0,010	< 0,010	-55,85	-8,09
38	118	< 2,00	1,67	0,69	1,26	< 0,10	16,1	18,8	3,58	0,54	0,025	< 0,010	< 0,010	-48,15	-7,31
39	133	2,62	22,80	5,14	7,45	< 0,10	69,9	4,25	0,066	0,18	0,03	< 0,010	< 0,010	-60,89	-9,03
40	167	3,93	7,87	0,24	< 0,02	< 0,10	63,7	2,54	0,59	0,69	0,021	< 0,010	< 0,010	-66,02	-9,73
41	158	< 2,00	1,93	0,44	< 0,02	< 0,10	18,1	20,5	5,6	2,05	0,017	0,027	< 0,010	-47,09	-7,51

* Limite de Potabilidade (em mg/L)

A mineralização deste aquífero também é considerada fraca, apesar de apresentar valores mais elevados de condutividade elétrica em relação ao Aquífero Cristalino, variando de 54 a 442 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 273 $\mu\text{S}/\text{cm}$. São águas fracamente salinas, comparáveis com as médias encontradas em outros estudos como os da Região de Campinas (Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1981a), onde os valores são inferiores a 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, da Região de Sorocaba (Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1981b), inferiores a 790 mS/cm e da Região do Médio Tietê (Diniz, 1990), inferiores a 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

As características das águas dos poços mistos (Tubarão/Cristalino e Tubarão/Diabásio) são mais próximas às do Tubarão (Fig. 4), apresentando pH médio elevado de 9,10 e salinidade mais elevada em relação ao Aquífero Cristalino, com média de 315,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Na figura 5 é apresentado o fluxo regional das águas subterrâneas e a distribuição dos principais tipos hidroquímicos na área de estudo.

Em geral os fluxos das águas subterrâneas seguem das porções mais elevadas para as mais rebaixadas topograficamente, onde se situam rios de maior porte da região que correspondem às principais drenagens e áreas de descarga como o rio Jundiá (em Indaiatuba); rio Tietê e córrego do Buru (em Salto); rios Capivari e Capivari-Mirim (em Monte Mor, Elias Fausto e Capivari). As altitudes máximas do nível d'água situam-se na porção leste da área de estudo, onde predomina o Aquífero Cristalino, enquanto as porções mais rebaixadas encontram-se a oeste da área, principalmente nas

cidades de Capivari e Rafard, nos domínios do Aquífero Tubarão. Os valores de altitude do nível d'água foram extraídos de Instituto Geológico (2012).

Águas bicarbonatadas cálcicas e cálcicas-sódicas são típicas na porção leste da área (Indaiatuba), por estarem associadas, principalmente ao Embasamento Cristalino. Em direção a oeste (Elias Fausto, Monte Mor, Capivari) e a sudoeste (Salto) as águas adquirem composição predominantemente bicarbonatada sódica. Esta variação tende a ocorrer ao longo do fluxo subterrâneo, desde a área de recarga até a descarga, com aumento em sais dissolvidos.

O aumento da concentração de sódio nas águas foi correlacionado por Diogo *et al.* (1981), Campos (1993), Vidal (2002) e Vidal *et al.* (2005) ao aumento dos valores de condutividade elétrica, da borda da Bacia Sedimentar do Paraná em direção ao interior no sentido E-W. Vidal *et al.* (2005) estabeleceram teor de corte de 314 $\mu\text{S}/\text{cm}$, acima do qual as águas foram consideradas mineralizadas na área de afloramento do Aquífero Tubarão na porção central do Estado de São Paulo.

Na área de estudo alguns poços situados na proximidade de drenagens apresentaram valores mais elevados de CE ($>300 \mu\text{S}/\text{cm}$), como por exemplo, os poços nº 1 (Capivari); 12 (Elias Fausto); 22, 23, 25 e 26 (Monte Mor); 29 (Rafard); 35 e 37 (Salto), corroborando com este modelo de evolução química das águas em direção às áreas de descarga. Deve-se destacar que o poço 35 é um caso particular de água sulfatada sódica, provavelmente associado a águas de circulação restrita e local do Aquífero Tubarão.

Figura 4. Diagramas de Piper e classificação das águas do Aquífero Tubarão, Cristalino e misto.

Figura 5. Classificação hidroquímica de águas de poços tubulares nos municípios estudados e potenciométrica dos aquíferos.

3.2 Análises isotópicas

As concentrações de isótopos estáveis determinadas para amostras de águas do Aquífero Cristalino variaram de $-7,96$ a $-6,52$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e de $-52,06$ a $-42,81$ ‰ para δD . Nas amostras do Aquífero Tubarão

os valores variaram de $-9,72$ a $-5,56$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e de $-52,06$ a $-42,81$ ‰ para δD (Tab. 3). Vidal (2002) obteve média similar de δD ($-57,201$ ‰) e $\delta^{18}\text{O}$ ($-8,57$ ‰) para o Aquífero Tubarão em 16 poços amostrados em Capivari, Monte Mor, Elias Fausto e Rafard.

Tabela 3. Dados estatísticos dos isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio para águas dos Aquíferos Cristalino e Tubarão.

Aquífero	Número de amostras	valores	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰
Cristalino	6	mínimo	-7,93009	-52,06734
		máximo	-6,52199	-42,81188
		média	-7,056023	-47,67174
		desvio padrão	0,57876	3,76138
Tubarão	27	mínimo	-9,72832	-66,01593
		máximo	-5,56368	-42,47607
		média	-7,768945	-54,93234
		desvio padrão	1,06591	6,99327

As correlações entre dados isotópicos δD e $\delta^{18}O$ das águas dos aquíferos Cristalino e Tubarão foram projetadas no diagrama da figura 6 e demonstram que a maior parte das amostras está próxima à linha meteórica global, indicando que a composição das águas subterrâneas pode ser controlada pelas águas meteóricas.

Figura 6. Correlação isotópica entre D e ^{18}O para os aquíferos Tubarão e Cristalino.

As amostras de água do Aquífero Cristalino são mais enriquecidas em isótopos de D e de O^{18} . A maior parte das amostras do Aquífero Tubarão (incluindo neste grupo os poços mistos Tubarão/Cristalino, Tubarão/Diabásio e Não definidos) apresenta valores de $\delta^{18}O$ inferiores a -7‰ chegando a atingir $< -9\text{‰}$, e valores de δD inferiores a -52‰ , contudo algumas amostras apresentam o mesmo padrão que as do Cristalino.

Estas amostras com valores mais negativos de $\delta^{18}O$ e de δD podem indicar que algumas porções do Aquífero Tubarão estão confinadas com a presença de águas de recarga mais antigas e associadas a um período em que o clima era frio. Aravena *et al.* (1995) encontraram padrão similar em aquífero regional confinado, ao sul de Ontário. Hirata *et al.* (2011) também associaram baixos valores de $\delta^{18}O$ ($< -9\text{‰}$) e de δD a uma zona confinada profunda na Bacia do Paraná com águas muito antigas (> 10.000 anos), cuja recarga ocorreu sob período climático frio.

Estas características de água antiga relacionada a porções (semi-)confinadas na área indicam a necessidade de estudos mais aprofundados com o objetivo de

avaliar a recarga do Aquífero Tubarão, uma vez que implicam na necessidade de um controle na extração das águas por captações em poços.

3.3 Qualidade das águas subterrâneas

Os resultados analíticos de 41 amostras de poços deste Projeto indicaram que alguns parâmetros excedem o valor máximo permitido nas águas para consumo humano, conforme Portaria de Potabilidade Nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011): nitrato (3 poços), manganês (6 poços); fluoreto (4 poços); sulfato (1 poço). Reunindo estas informações com os dados de análises químicas de laudos de relatórios de poços, avaliou-se a distribuição das concentrações de ferro, manganês, fluoreto, nitrato e sólidos totais dissolvidos nos poços da área de estudo (Fig. 7). Na tabela 4 são apresentados, sucintamente, dados de concentrações médias e medianas, mínimo e máximo, destes parâmetros utilizados como indicadores de qualidade.

A presença de íons **ferro** e **manganês** na água de abastecimento destinada ao uso doméstico é desagradável, mas não apresenta riscos à saúde, uma vez que não há comprovação de efeitos tóxicos quando ingeridos em grandes quantidades.

Sob determinadas condições de pH prevalentes no abastecimento de água potável, os sais de Fe (II) são instáveis e reagem com água para formar hidróxidos insolúveis, que conferem cor de ferrugem à água. A água muitas vezes apresenta aparência e gosto intragável, podendo manchar a roupa e utensílios domésticos. O manganês tem o mesmo comportamento do ferro, provocando sabor desagradável e manchas de coloração preta quando em concentrações superiores a $0,15\text{ mg/L}$.

No sistema de distribuição, os íons de ferro e de manganês podem oxidar e precipitar formando depósitos na rede de distribuição e reduzir gradualmente a vazão através do tubo. Mesmo em concentrações de aproximadamente $0,02\text{ mg/L}$, o manganês pode formar revestimentos nas tubulações de distribuição de água que podem se desprender como precipitados de cor preta (World Health Organization, 2003).

Tabela 4. Concentrações de Fe(t), Mn^{2+} , F, $N-NO_3^-$ e STD (mg/L) encontradas na área.

Concentração (mg/L)	Fe (t)	Mn^{2+}	F	$N-NO_3^-$	STD
Média	0,14	0,08	0,61	3,53	201,02
Mediana	0,05	0,02	0,20	0,49	162,82
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	16,00
Máximo	3,22	2,20	8,75	21,80	1242,00
Potabilidade (Portaria Nº 2914/2011)	0,30	0,10	1,50	10,00	1000,00
Total de poços	328	173	220	322	235
Poços com concentrações acima da potabilidade	32 (9,75%)	27 (15,60%)	25 (11,36%)	3 (0,93%)	3 (1,3%)

Figura 7. Distribuição das concentrações de ferro, manganês, fluoreto, nitrato e sólidos totais dissolvidos em poços da região entre Indaiatuba e Capivari (SP).

O ferro pode também promover o crescimento de ferro-bactérias que obtêm energia a partir da oxidação do Fe (II) a Fe (III), e, no processo, uma camada viscosa é depositada nas tubulações de distribuição de água, levando contaminação biológica na água para consumo humano (Canadian Council of Resource and Environment Ministers, 1987; World Health Organization, 2003). O manganês também pode favorecer o crescimento de certos organismos ("manganês"-bactérias) que causam problemas de sabor, odor e turbidez da água distribuída.

A ocorrência do ferro e do manganês em concentrações elevadas, respectivamente em 9,75 % e 15,60

% dos poços da área (Tab. 4), pode estar relacionada às características das formações geológicas da região ou a problemas construtivos do poço.

Em dez poços ocorrem teores de ferro e de manganês acima da potabilidade, dos quais quatro são destinados ao abastecimento público: um em Monte Mor (poço IG nº 4160) com Fe=3,22 mg/L e Mn=0,78 mg/L; e três em Elias Fausto (poço IG nº 1637, com Fe=0,94 mg/L e Mn=0,21 mg/L; poço IG nº 4206, com Fe=1,22 mg/L Mn=0,21 mg/L; e poço IG nº 396, com Fe=0,49 mg/L Mn=0,13 mg/L).

A presença de íons **fluoreto** nas águas é considerada benéfica à saúde bucal, na dosagem de 0,7 mg/L,

podendo variar de 0,6 a 0,8 mg/L, uma vez que o flúor fortalece o esmalte do dente e inibe sua desmineralização, prevenindo à cárie (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2013). A ingestão contínua de águas com concentrações elevadas pode acarretar riscos à saúde, como a doença fluorose esquelética ou dentária, sendo esta identificada por leves manchas esbranquiçadas no esmalte do dente até manchas castanhas levando a fratura na estrutura dental; pode também ocasionar mal estar, ânsia, vômitos e até a morte quando associada à toxicidade. O limite para ingestão em água potável considerado pela Organização Mundial de Saúde é de 1,5 mg/L (World Health Organization, 2006), também adotado pela Portaria Nº 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Alguns exemplos podem ser citados como fontes de fluoreto para as águas como: atividades industriais como cerâmica, produção de alumínio, fertilizantes (rochas fosfáticas), fabricação de sabões e detergentes, preparação de couros, entre outras.

Na área estudada a origem provável está na alteração e hidrólise de minerais de rocha enriquecidos em flúor, sob condições específicas de pH, temperatura, alcalinidade, etc., do meio por onde a água subterrânea percola. Assim como outros autores, foram constatadas correlações positivas entre as concentrações de fluoreto, valores de pH superior a 7,5 e teores elevados de sódio. Ezaki (2011) considerou a presença de flúor nas águas subterrâneas como ocorrência natural associada à alteração de argilominerais e micas das rochas sedimentares e de biotitas dos granitos da região de Salto (SP), com teores mais elevados no Aquífero Tubarão em relação ao Cristalino.

Considerando 220 poços levantados na região de estudo, em 11,36 % o limite de potabilidade de fluoreto foi ultrapassado (Tab. 4), predominando nos municípios de Salto e Indaiatuba em poços particulares, e pontualmente em Capivari num poço de abastecimento público (nº IG 1675) (Fig. 7).

Não há registros de casos de fluorose dentária nos município de Salto e Indaiatuba, uma vez que o abastecimento público dá-se, fundamentalmente por mananciais superficiais.

Outro aspecto relevante na região é a ocorrência de água com sabor amargo/salgado, conforme depoimentos de moradores de Salto e Indaiatuba, que denominam a água subterrânea destes poços como salobra.

A salinidade pode ser avaliada em termos de **sólidos totais dissolvidos** (STD). A Resolução CONAMA Nº 357, de 17/03/2005, classifica as águas superficiais no território nacional em: doces – STD < 500 mg/L; salobras – 500 < STD < 30.000 mg/L; e salgadas – STD > 30.000 mg/L. O Padrão de aceitação para consumo humano, segundo Portaria de Potabilidade Nº 2914/2011 Ministério da Saúde, é de no máximo 1.000 mg/L de total de sólidos dissolvidos.

Menegasse et al. (2003) utilizam como referência o trabalho de Companhia de Saneamento de Minas Ge-

rais / Hidrosistemas Engenharia de Recursos Hídricos Ltda (1995) para atribuir qualidade de água para consumo humano e irrigação, conforme faixa de concentração de sólidos totais dissolvidos (mg/L): STD ≤ 150 mg/L, Boa; 150 mg/L < STD ≤ 500 mg/L, Razoável; 500 mg/L < STD, Tolerável; STD > 1000 mg/L, Inaceitável.

Na área estudada, dos 235 poços (Fig. 7), 17 % apresentam valores na faixa de 10 a 100 mg/L; 63,4 % entre 100 e 250 mg/L; e 15,7 % entre 250 e 500 mg/L. A maioria, portanto, apresenta qualidade de boa a razoável conforme classificação utilizada por Menegasse et al. (2003). Uma pequena parcela apresenta elevados valores de STD, dos quais 2,6 % na faixa de 500 a 1.000 mg/L e 1,3 % com valores maiores que 1.000 mg/L sendo já consideradas águas salobras (Tab. 4).

Os valores anômalos de STD (maiores que 500 mg/L) ocorrem, em sua maioria, em poços situados em Salto (SP), próximos às áreas de descarga dos aquíferos em drenagens, e um deles na proximidade de um aterro em Indaiatuba. Ezaki (2011) associou as elevadas concentrações de HCO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^- nas águas às porções confinadas ou de circulação isolada/restrita nos sistemas aquíferos. Os elevados teores de STD também implicam em elevada dureza e consequente desativação de alguns poços em indústrias, em função de problemas de incrustação em tubulações ou devido interferência nos processos de produção.

O **nitrato** é utilizado como indicador da contaminação das águas subterrâneas, por apresentar alta mobilidade na água subterrânea e persistência, podendo atingir extensas áreas (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo, 2007). Nas áreas urbanas, onde os sistemas de saneamento são precários, a presença de nitrato nas águas também pode estar associada a contaminantes microbiológicos (bactérias patogênicas, vírus e protozoários) e, em alguns casos, substâncias orgânicas sintéticas.

As principais fontes de nitrato para as águas podem estar associadas ao uso excessivo de fertilizantes inorgânicos nitrogenados e de esterco nas atividades agrícolas, ao vazamento de redes coletoras de efluentes e de tanques e fossas sépticas (excreta humano e animal), à falta de saneamento nas zonas urbanas, entre outras. No solo, estes fertilizantes inorgânicos e os resíduos contendo nitrogênio orgânico são decompostos formando amônia, que é oxidado a nitrito e nitrato. Parte do nitrato pode ser absorvida pelas plantas, mas o excedente move-se rapidamente para as águas subterrâneas.

O limite de ingestão de nitrato pela água é de 10 mg/L de N-NO_3^- (ou o equivalente a 45 mg/L NO_3^-), conforme o Ministério da Saúde. Sua toxicidade é principalmente atribuída à redução do nitrato a nitrito no organismo, cujo efeito biológico é a oxidação de hemoglobinas normais a metahemoglobinas (10 % ou mais) que são instáveis para o transporte de oxigênio para os tecidos (World Health Organization, 2007). A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São

Paulo (2007) considera concentrações de nitrogênio nitrato acima de 5,0 mg/L como indicativas de alteração do equilíbrio natural, e adota esta concentração como um valor de prevenção.

Na área estudada foram constatados apenas 3 casos que ultrapassam o limite de potabilidade, em condomínio de Indaiatuba (poços IG n^{os} 4247, 4277 e 4293) (Fig. 7). Em outros 4 poços (poços IG n^{os} 1765, 3854, 3864 e 4345) teores entre 5 e 10 mg/L N-NO₃⁻ foram constatados, já indicando a influência de atividade antrópica sobre a qualidade das águas. Estes poços estão situados nas porções mais antigas das cidades onde normalmente o uso de fossas foi mais intenso e onde a concentração de edificações ocorre de forma mais adensada, aumentando a carga potencial de contaminação.

4 Conclusões

A caracterização hidroquímica das águas subterrâneas na região estudada indica predomínio de águas bicarbonatadas cálcicas e sódicas no Aquífero Cristalino com pH médio de 7,35 e condutividade elétrica média de 170 µS/cm, e de águas bicarbonatadas sódicas no Aquífero Tubarão e, secundariamente, sulfatadas sódicas, com pH médio de 8,15 e condutividade elétrica um pouco mais elevada de 273 µS/cm. As águas de alguns poços que exploram o Cristalino, indicam que há influência das propriedades mineralógicas da cobertura sedimentar sobre sua composição, como nos poços n^{os} 16, 19 e 35, que apresentam maior condutividade elétrica. As águas dos poços mistos assemelham-se às do Aquífero Tubarão.

As águas destes aquíferos são, em geral, fracamente mineralizadas (< 300 µS/cm), mas há uma tendência da salinidade (expressa em termos de condutividade elétrica) aumentar das áreas de recarga para as de descarga nos principais rios da região (Tietê, Jundiá, Buru, Capivari). Valores anômalos (> 500 mg/L) e águas salobras ocorrem em Salto (SP) e podem estar associados a circulação restrita e local de águas do Aquífero Tubarão.

Isótopos de D (-52 ‰) e ¹⁸O (< -9 ‰) também indicam que porções do aquífero podem estar (semi-) confinadas com a presença de águas de recarga mais antigas e associadas a um período em que o clima era frio. Um aprofundamento dos estudos com o objetivo de avaliar a recarga do Aquífero Tubarão pode confirmar, portanto, a necessidade de controle na extração das águas por captações em poços.

A avaliação da qualidade das águas a partir dos parâmetros analisados indica, de modo geral, que as águas dos poços amostrados apresentam boa qualidade. A ocorrência de casos de contaminação por nitrato é ainda pontual, já sofrendo influência de cargas potenciais de contaminação associadas à ocupação urbana, embora mereçam um acompanhamento da evolução das concentrações e de ocorrência de novos casos. Os

elevados valores de ferro e de manganês encontrados, respectivamente, em 9,75 % e 15,60 % dos poços, podem estar relacionados às características das formações geológicas da região ou a problemas construtivos do poço, mas a investigação da origem destes metais deve ser aprofundada em estudos complementares. As anomalias de fluoreto ocorrem, principalmente, em poços particulares de Salto e Indaiatuba, e estão associadas à alteração de rochas sedimentares (no Aquífero Tubarão) e de granitos (no Aquífero Cristalino).

Agradecimentos - Os autores agradecem ao FEHIDRO pelo auxílio financeiro concedido (Contrato FEHIDRO 450/2006), a Francisco Antonio Moschini (SAE Salto) e Felipe Rodrigues Ferroni (LEBAC-UNESP) pela colaboração nos trabalhos de amostragem, a Ramon Aravena (Universidade de Waterloo) pelas indicações bibliográficas, e a Renan Penasso Pacheco pela confecção de algumas figuras.

Referências

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Ponçano, W.L., Dantas, A.S.L., Carneiro, C.D., Melo, M.S. & Bistrichi, C.A. 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Nota Explicativa. São Paulo, IPT, v. 1, Escala 1:500.000.
- American Public Health Association / American Water Works Association / Water Environment Federation. 1995. *Standard methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19. Ed. Washington, American Public Health Association.
- Aravena, R., Wassenaar, L. & Plummer, L.N. 1995. Carbon 14 Groundwater ages with Methanogenesis. *Water Resources Research*, 31(9): 2307-2317.
- Bistrichi, C.A., Carneiro, C.D.R., Dantas, A.S.L., Ponçano, W.L., Campanha, G.C., Nagata, N., Almeida, M.A., Stein, D.P., Melo, M.S. & Cremonini, O.D. 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, IPT, v. 2, Escala 1:500.000.
- Brasil. Ministério da Saúde. 2011. Portaria n^o 2914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 14 dez. 2011, Seção 1, p. 39.
- Campos, H.C.N.S. 1993. *Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo*. São Paulo, 177p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Canadian Council of Resource and Environment Ministers. 1987. *Canadian water quality guidelines*. Prepared by the Task Force on Water Quality Guidelines.
- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. SABESP. 2013. Flúor na água contribui para prevenção e controle de cárie dentária. Notícias. 03/10/2013. Disponível em: www.sabesp.com.br. Acesso em: 10/10/2013.
- Companhia de Saneamento de Minas Gerais/ Hidrosistemas Engenharia de Recursos Hídricos Ltda. 1995. Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Ed. Sergio Menin Teixeira de Souza, 525 p.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo. CETESB. 2007. *Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo 2004-2006*. São Paulo, CETESB. Disponível em: www.cetesb.sp.gov.br. Acesso em: 15/12/2012.

- Custodio, E. & Llamas, M.R. 1983. *Hidrologia Subterranea*. 2 ed. Barcelona, Omega, 2v.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica / Universidade Estadual Paulista-UNESP. 1980. *Mapeamento faciológico do Subgrupo Tubarão*. Convênio DAEE-UNESP, Escala 1:50.000.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica. 1981a. *Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 5. Campinas*. São Paulo, DAEE, 2 v.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica. 1981b. *Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 4. Sorocaba*. São Paulo, DAEE, 2 v.
- Diogo, A., Bertachini, A.C., Campos, H.C.N.S. & Silva, R.B.G. 1981. Estudo preliminar das características hidráulicas e hidroquímicas do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. Atas..., Curitiba, SBG., v. 1, p. 359-368.
- Diniz, H.N. 1990. *Estudo hidrogeológico do Subgrupo Itararé no médio rio Tietê. Município de Tietê, SP*. São Paulo, 118p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Ezaki, S. 2011. *Hidrogeoquímica dos Aquíferos Tubarão e Cristalino na Região de Salto (SP)*. São Paulo, 180 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Galembeck, T.M.B. 1997. *O Complexo Múltiplo, Centro e Plurisserial Itu-SP*. Rio Claro, 374 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- Hirata, R., Gesicki, A., Sracek, O., Betolo, R., Giannini, P.C. & Aravena, R. 2011. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani Aquifer System in São Paulo State, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31: 444-456.
- Hypolito, R., Ezaki, S. & Pérez-Aguilar, A. 2010. Fluoreto nas águas subterrâneas dos aquíferos Tubarão e Cristalino, região de Salto-Indaiatuba (SP). *REM: Revista Escola de Minas*, 63(4): 715-726.
- Hypolito, R., Andrade, S., Ezaki, S., Marques, J.F. & Nascimento, S.C. 2009. Método para Amostragem e Detecção de Íons em Águas da Zona Não Saturada. *Analytica*, 38: 85-92.
- Instituto Geológico. 1990. *Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento da região do Município de Sorocaba (SP)*. São Paulo, IG/SMA. 1v. e mapas (Relatório Técnico do Instituto Geológico).
- Instituto Geológico. 1991. *Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do Município de Itu (SP)*. São Paulo, IG/SMA, 2 v. (Relatório Técnico do Instituto Geológico).
- Instituto Geológico. 1993. *Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do Município de Campinas (SP)*. Programa Cartas Geológicas e Geotécnicas para o Planejamento Ambiental na Região de Sorocaba e Campinas. São Paulo, IG/SMA, 3v. (Relatório Técnico do Instituto Geológico).
- Instituto Geológico. 1995. *Subsídios para o planejamento regional e urbano do meio físico na porção média da bacia do Rio Piracicaba*. São Paulo, IG/SMA. (Relatório Técnico do Instituto Geológico).
- Instituto Geológico. 2012. *Identificação de Áreas Potenciais de Restrição e Controle de Captação e Uso das Águas Subterrâneas na Porção Sul da UGRHI 05 – Projeto ARC-TUB1*. São Paulo, IG/SMA, 2v. (Relatório Técnico do Instituto Geológico).
- Menegasse, L.N., Oliveira, F.R., Mourão, M.A.A., Duarte, U., Castro, R.E., Diniz, A.M.A., Elmiro, M.A.Y. & Pereira, P. E. 2003. Hidroquímica das Águas Subterrâneas do Médio Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil. *Revista Latino-Americana de Hidrogeologia*, 3: 49-58.
- Neves, M.A. 2005. *Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP)*. Rio Claro, 200 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.
- Pereira, S.Y. 1997. *Proposta de representação cartográfica na avaliação para estudo de planejamento e meio ambiente. Exemplo da Região Metropolitana de Campinas-SP*. São Paulo, 190 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Petri, S. & Pires, F.A. 1992. O Subgrupo Itararé (Permocarbonífero) na região do Médio Tietê, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(3): 301-310.
- Sachs, L.L.B. 1999a. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Integração Geológica da Folha São Paulo. SF-23-Y-C. Estado de São Paulo*. Mapa Geológico. São Paulo, CPRM, Escala 1:250.000.
- Sachs, L.L.B. 1999b. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Integração Geológica da Folha São Paulo. SF-23-Y-C. Estado de São Paulo. Nota Explicativa*. São Paulo, CPRM, 36 p., il., mapas, escala 1:250.000.
- Salveti, R.A.P. 2005. *Sistemas Depositionais e Paleogeografia do Subgrupo Itararé (Neopaleozóico da Bacia do Paraná), na Região entre Itu e Indaiatuba, SP*. São Paulo, 100 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Santos, P.R. 1996. *Condicionamento geológico da sedimentação glacial: o Neopaleozóico da Bacia do Paraná e o Terciário da Antártida*. São Paulo, 111p. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento / Ministério das Cidades. 2008. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto*. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em: 10/10/2012.
- Stevaux, J.C., Souza Filho, E.E., Teixeira, J.A. & Landim, P.M.B. 1987. Sistemas deposicionais do Subgrupo Itararé (P-CP na bacia hidrográfica do baixo Rio Capivari (SP): um modelo de prospecção de água subterrânea. In: SIMP. REG. GEOL., 6, Rio Claro, 1987. Atas... Rio Claro, SBG, v.1, p.335-374.
- Vidal, A.C. 2002. *Estudo hidrogeológico do Aquífero Tubarão na área de afloramento da porção central do Estado de São Paulo*. Rio Claro, 109p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- Vidal, A.C., Rostirolla, S.P. & Kiang, C.H. 2005. Análise de favorabilidade para a exploração de água subterrânea na Região do Médio Tietê, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 35: 475-481.
- World Health Organization. 2003. *Iron in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. Geneva, WHO Press. (WHO/SDE/WSH/03.04/8).
- World Health Organization. 2006. *Fluoride in Drinking-water*. World Health Organization titles with IWA Publishing. Printed by TJ International (Ltd), Padstow, Cornwall - UK.
- World Health Organization. 2007. *Nitrate and nitrite in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. Geneva, WHO Press. (WHO/SDE/WSH/07.01/16).
- Zalán, P.V., Wolf, S., Conceição, J.C.J., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S.,

Appi, V.T., Zanotto, O.A. & Marques, A. 1991. Tectonics and sedimentation of the Paraná Basin. *In*: Ulbrich, H. & Ro-

cha Campos, A.C. (Ed). *Gondwana Seven. Proceedings*. São Paulo, p. 83-117.

Manuscrito 518.

Editores: Carla E. Barros