DOI: 10.5935/0100-929X.20140003 Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 35 (1), 31-45, 2014.

ESTUDO HIDROQUÍMICO DO SISTEMA AQUÍFERO TUBARÃO (SAT) NO MUNICÍPIO DE AMERICANA, SP

Filipe MONTANHEIRO
Hung Kiang CHANG
Didier GASTMANS

RESUMO

O Município de Americana (SP), situado em uma região de alta concentração populacional na Região Metropolitana de Campinas, caracteriza-se pela pequena disponibilidade hídrica superficial e grande número de poços tubulares profundos que explotam o Sistema Aquífero Tubarão - SAT. Face à demanda crescente de exploração desse aquífero, é essencial o conhecimento aprofundado sobre a hidroquímica desse aquífero para fins de planejamento e gestão dos recursos hídricos. Por meio dos diagramas *Piper - Stiff* e da análise estatística (*cluster analysis*) dos componentes químicos das amostras de água coletadas dos poços tubulares profundos de abastecimento público, três tipos hidroquímicos foram identificados: águas bicarbonatadas cálcio-sódicas, bicarbonatadas sódicas e cloretadas sódicas. As primeiras apresentam pH básico, condutividade elétrica entre 213 até 106,9 µS/cm e podem ser fracamente salinas. As bicarbonatadas sódicas ostentam pH entre 6,74 e 7,99 (média de 7,52) e valores de condutividade de 239 a 19,18 µS/cm, enquanto as águas cloretadas sódicas apresentam pH entre 5,08 e 7,13 e a condutividade fica entre 242 a 67,2 µS/cm. As amostras registram altas concentrações de nitrato associado a cloreto, que indicam a possibilidade da contaminação do aquífero por ação antrópica.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Tubarão, água subterrânea, hidroquímica, Americana.

ABSTRACT

HYDROCHEMICAL STUDY OF THE TUBARÃO AQUIFER SYSTEM (TAS) IN THE MUNICIPALITY OF AMERICANA, SP. The Municipality of Americana (SP), located in a densely populated area of the Campinas Metropolitan Region, is characterized by low surface water availability and a large number of deep wells that exploit the Tubarão Aquifer System (TAS). In the face of the increasing demand for exploitation of water resources, hydrochemical studies are essential for planning and management of these resources. Using Piper - Stiff diagrams and statistical analysis (cluster analysis) of the chemical components of the water samples collected from deep wells for public supply, three hydrochemical types were identified: Ca-Na-HCO_3, Na-HCO_3 and Na-Cl. The first type presents basic pH, weak salinity and electrical conductivity between 106.9 and 213 µS/cm. The sodium bicarbonate type shows pH between 6.74 and 7.99 (average 7.52) and conductivity values from 239 to 19.18 µS/cm, while the chlorinated water with sodium type has a pH between 5.08 and 7.13 and electrical conductivity from 242 to 67.2 µS/cm. The samples registered high concentrations of nitrate with chloride, which indicates the possibility of contamination of the aquifer by human action.

Keywords: Tubarão Aquifer System, groundwater, hydrochemistry, Americana.

1 INTRODUÇÃO

O uso crescente dos recursos hídricos subterrâneos em áreas com alta concentração populacional é estimulado, principalmente, pelas vantagens econômicas que sua captação oferece quando comparada às águas superficiais. Junta-se a isso também, alguns fatores nocivos da ação antrópica sobre fontes naturais visíveis como, por exemplo, a progressiva degradação dos rios causada pela elevada carga de dejetos industriais, esgotos urbanos e efluentes domiciliares sem o adequado tratamento, um cenário ainda não observado com frequência nas águas subterrâneas, devido à sua maior proteção.

O Município de Americana, Estado de São Paulo, alvo desse estudo, está situado na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e, portanto, está incluído na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos nº 5 (UGRHI 5), cujo déficit hídrico é conhecido, devido a excessiva exploração das águas superficiais. Os registros da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo mostram que a disponibilidade hídrica nesta bacia é de 67m^3/s e o consumo populacional está em torno de 429 m^3/habitante/ano (SMA/CRH 2009). O município, apesar de estar localizado às margens do Rio Piracicaba, apresenta pequena disponibilidade hídrica superficial e grande número de poços tubulares profundos para explorar o Sistema Aquífero Tubarão (SAT).

Além disso, nos sistemas aquíferos subterrâneos desta UGRHI 5 (domínios hidrogeológicos Cristalino Fraturado, Paleozoico e Mesozoico) estima-se que atualmente a exploração desse recurso seja feita por cerca de 5.000 poços, que geram um volume de água da ordem de 127 milhões de m^3/ano ou 3,0 m^3/hora/poço (SÃO PAULO 2006). Essa produção representa apenas 16% do potencial dos três domínios devido à natureza heterogênea dos aquíferos, como é o caso do SAT, que dificulta a exploração do recurso e o sucesso de grandes vazões. Essa heterogeneidade advém da diversidade e descontinuidade de suas litofácies (alternância de sedimentos grossos e finos e camadas com espessuras variadas), as quais prejudicam a circulação da água subterrânea e, consequentemente, acabam refletindo na qualidade e na variabilidade de tipos hidroquímicos das águas subterrâneas do SAT (VIDAL 2002, EZAKI 2011).

Assim, esse trabalho foi direcionado a integrar as informações geológicas de subsuperfície com a hidroquímica das águas do SAT na cidade de Americana, no sentido de identificar a distribuição das diferentes fácies hidrogeoquímicas do aquífero, avaliar a interação água-rocha e a influência antrópica, por meio da construção de um modelo hidrogeoquímico conceitual, com base no reconhecimento das possíveis reações que imprimem as características químicas da água subterrânea na área.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS DA ÁREA DE ESTUDO

O Município de Americana abrange uma área territorial de 133,4 km^2 na porção centro-leste do Estado de São Paulo (Figura 1) e possui uma população de 210,6 mil habitantes, conferindo-lhe uma elevada densidade demográfica de 1579 habitantes/km^2 (IBGE 2010). O município pertence à Região Metropolitana de Campinas, de grande importância no cenário econômico paulista, com altos níveis de industrialização e infraestrutura privilegiada.

Os domínios municipais estendem-se sobre unidades litoestratigráficas da Bacia Sedimentar do Paraná que englobam rochas paleozoicas do Subgrupo Itararé (PETRI 1964), representadas por tilito, arenito, siltito, folhelho, ritmito, conglomerado e, eventualmente, camadas de carvão. Essas rochas foram afetadas por intrusivas (*sills* ou diques) do magmatismo Serra Geral representadas por diabásio, diorito pórfiro, microdiorito pórfiro, lamprófiro, andesito, mozonito pórfiro e traquiandesito. Depósitos cenozoicos de grandes extensões constituídos por areias, cascalho, silte, argila e, localmente, turfa, correlacionados à Formação Rio Claro (LANDIM & SOARES 1979), recobrem as unidades geológicas citadas anteriormente. A base geológica utilizada no presente trabalho foi compilada do Projeto "Mapeamento faciológico do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo", escala 1:50.000, elaborado por DAEE/UNESP (1980).

A rede hidrográfica sobre a qual se instalou o Município de Americana faz parte da bacia do Rio Piracicaba, que abrange uma área de 12.400 km^2. Esse rio é formado a partir do encontro dos rios Jaguari e Atibaia, na divisa entre os municípios de Americana e Limeira. Próximo à foz do Rio Atibaia, já no município de Americana, a construção da barragem de Salto Grande, em 1940, fez elevar o leito do Rio Atibaia em cerca de 20 metros e, consequentemente, formar um reservatório para acúmulo de, pelo menos, 106 x 10^6 m^3 de água sobre uma área de 13 km^2 (COELHO 1993). O Ribeirão Quilombo, tributário do Rio Piracicaba, recorta a zona urbana no sentido N-S e recebe esgotos urbanos e industriais das cidades de Campinas, Sumaré, Nova Odessa e Americana; o Rio Piracicaba será o receptador de toda essa poluição (DAEE 1981).

As unidades hidrogeológicas que ocorrem na área estudada compreendem os aquíferos Tubarão e Diabásio. O primeiro é representado pelas rochas sedimentares do Subgrupo Itararé, enquanto o segundo, de ocorrência irregular, pelas rochas ígneas intrusivas básicas da Formação Serra Geral; ambos comportam-se como unidades hidrogeológicas heterogêneas, descontínuas e anisotrópicas (ODA *et al*. 2012).

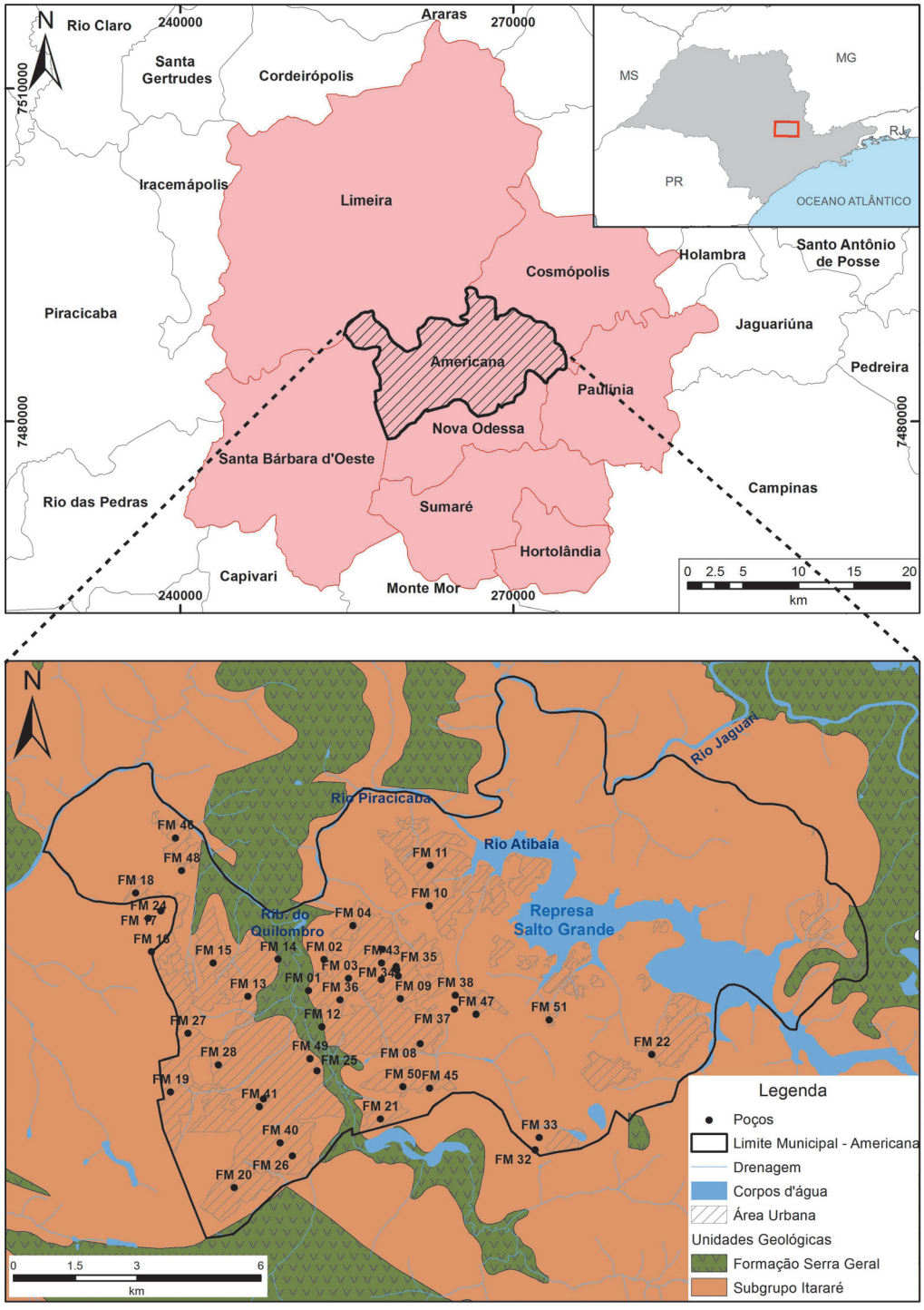

FIGURA 1 – O Município de Americana no contexto da Região Metropolitana de Campinas. Abaixo, representação geológica com localização dos poços utilizados neste estudo. (Fonte: modificado de Convênio DAEE/UNESP 1980).

O Aquífero Tubarão constitui a principal fonte de abastecimento de água subterrânea. É caracterizado como granular, de porosidade primária e sob condições de confinamento e/ou semi-confinamento locais. A circulação e o armazenamento de água estão associados tanto aos poros das rochas como às suas descontinuidades estruturais, tais como juntas, fraturas ou falhas (porosidade secundária) (ODA *et al*. 2012). No Aquífero Diabásio o armazenamento e a circulação da água subterrânea estão condicionados preferencialmente pelas fraturas e fissuras abertas nos diabásios, o que configura, na maioria dos casos, aquíferos localizados, descontínuos e heterogêneos (DAEE 1981). Esse aquífero possui pouca representatividade na área e ocorre, principalmente, em subsuperfície e de forma irregular entre os sedimentos do Subgrupo Itararé.

O Sistema Aquífero Tubarão estende-se por uma estreita faixa de cerca de 20.700 km^2 no sentido nordeste-sul do Estado de São Paulo, onde abastece importantes núcleos habitacionais como Casa Branca, Americana, Itapetininga, Itu e Itararé. Essa unidade é caracterizada por apresentar vazões abaixo de 10 m^3/h e, portanto, consideradas de baixa produtividade (DAEE/IG/IPT/CPRM 2005).

Na avaliação dos dados de produção de poços perfurados no SAT na região central do Estado de São Paulo, VIDAL (2002) encontrou vazões médias de 9,42 m^3/h, com variação de 1 m^3/h a 140 m^3/h. Esse autor indicou, ainda, que o fluxo regional das águas subterrâneas era leste-oeste, ou seja, da borda para o interior da Bacia do Paraná, podendo apresentar direções N-S próximo a vales dos principais rios da região.

O complexo arcabouço geológico e estrutural do SAT contempla inúmeras intrusões de diabásio, de caráter local ou regional, que interrompem a continuidade do reservatório. A heterogeneidade produtiva é uma característica marcante deste aquífero, uma vez que é comum encontrar poços próximos com vazões bem diferentes. Essa particularidade é resultado da alternância de camadas com espessuras e composição granulométrica variadas, que refletem na circulação da água subterrânea, e tornam a pesquisa e a exploração desse recurso extremamente difícil (CAETANO-CHANG 1984, MASSOLI *et al*. 1986, STEVAUX *et al.* 1987).

Apesar de apresentar maior teor de sais em comparação com outros aquíferos do Estado de São Paulo, devido principalmente ao enriquecimento de suas águas em sódio, fluoreto e sulfato, o SAT apresenta características apropriadas para o consumo humano e outros usos em geral (IRITANI & EZAKI 2009).

O Tubarão é, basicamente, o aquífero que abastece o município de Americana. Segundo BIAZZI (2007), à época em que realizou o estudo, estavam outorgados no DAEE 249 poços tubulares profundos, dos quais 216 explotavam água somente do SAT, 21 utilizavam o SAT mais corpos de diabásio, e outros 21 não possuíam informação sobre a fonte. Segundo a autora, metade do volume extraído, ou seja, 2,5 x 10^6 m^3/ano, era destinada para uso industrial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A elaboração e desenvolvimento deste trabalho obedeceu a uma sequência de etapas: levantamento das informações básicas sobre a geologia, dados construtivos dos poços tubulares profundos da área de estudo, compilação dos resultados analíticos das águas subterrâneas anteriores, amostragens e análises da água subterrânea de poços selecionados, interpretação e avaliação global de todos os dados.

3.1 Cadastro de poços

As informações registradas no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS (CPRM) e no Serviço de Águas e Esgoto da Prefeitura de Americana mostram que no município foram perfurados 327 poços tubulares profundos. Deste total, apenas 45 poços (Figura 1) dispõem de informações consistentes para compor um banco de dados com características quanto à posição global (coordenadas UTM e datum), perfis geológicos, resultados dos ensaios de bombeamento e das análises hidroquímicas, profundidade e aquíferos em exploração, os quais serviram de base para a seleção dos poços a serem amostrados.

3.2 A relação entre sedimentos grossos e finos

Índices determinados pela relação entre a espessura total das camadas dos sedimentos grossos (arenitos finos a grossos e diamictitos) e dos sedimentos finos (siltitos, argilitos e folhelhos) foram utilizados para confeccionar um mapa de isovalores a partir de interpolação por análise de superfície de tendência de 2º grau, utilizando-se o software ArcGis. Os índices que apresentaram relação menor que 1,00, foram considerados predominantemente finos, enquanto os valores maiores ou iguais a 1,00 foram classificados como grossos.

3.3 Amostragem e análises da água subterrânea

Após análise das informações cadastradas no banco de dados (45 poços) selecionou-se, em função da importância da vazão dos poços e respectivo posicionamento geográfico dentro de uma possível malha de amostragem regular, 22 poços tubulares

da Prefeitura Municipal de Americana como pontos de coleta. Duas campanhas de campo realizadas ao longo dos meses de março e junho/2011 possibilitaram a amostragem dos referidos poços utilizados pelo abastecimento público do município.

As coletas foram executadas diretamente no cavalete dos poços ou na entrada dos reservatórios, para evitar possíveis alterações das propriedades físico-químicas das águas subterrâneas representativas do aquífero. Duas amostras de cada poço foram acondicionadas em frascos de polietileno de 300 mL, e conservadas sob refrigeração à temperatura de 4 ºC. No laboratório as amostras foram previamente filtradas antes de se iniciar os procedimentos analíticos.

Durante os trabalhos de amostragem, mediu-se os seguintes parâmetros físico-químicos: condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico (pH) e temperatura das amostras. A condutividade foi obtida com condutivímetro da marca DIGIMED, modelo DM-3P, enquanto para o pH e temperatura utilizou-se o aparelho de modelo DM-2P da mesma fabricante.

As amostras de água coletadas em campo foram submetidas a análises físico-químicas para determinar as concentrações dos principais cátions e ânions, no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (IGCE/UNESP) de Rio Claro - SP. Os cátions metálicos Na^+, K^+, Li^+, NH_4^+ foram quantificados por Espectrometria de Absorção Atômica e os demais (Ca^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Si^{4+}, Al^{3+}, Ni^{2+}, Cr^{2+}, P^{3+} e Cd^{2+}) pelo método da Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Plasma e Argônio Induzido (ICP-AES). Por outro lado, os ânions (F^-, CH_3COO^-, BrO_3^-, ClO_2^-, Cl^-, NO_2^-, Br^-, NO_3^-, PO_4^{3-}, SO_4^{2-} e $C_2O_4^{2-}$) foram determinados por cromatografia de íons.

A análise da alcalinidade (carbonatos, bicarbonatos e hidroxila) foi realizada por titulação potenciométrica, utilizando-se eletrodo indicador de pH.

A validação dos resultados analíticos desse estudo foi definida a partir do cálculo de erro do balanço iônico com o objetivo de aferir a qualidade dos resultados.

3.4 Tratamento dos dados hidroquímicos

Os resultados analíticos validados foram interpretados com auxílio dos diagramas *Piper* e *Stiff*, utilizando-se o software RockWorks (1999).

O diagrama de *Piper* permitiu classificar as amostras de acordo com os seus íons dominantes. Essa classificação é baseada no ânion ou cátion cuja concentração, expressa em meq/L, ultrapasse 50% de suas respectivas somatórias. Caso nenhum deles ultrapasse esse valor, a água é classificada segundo os ânions ou cátions mais abundantes. O posicionamento desses dados no diagrama é feito separadamente, transformando o valor de cada íon (expresso em meq/L) numa porcentagem do total de ânions e de cátions (PIPER 1944).

No diagrama de *Stiff* a composição química das amostras de água é representada por gráficos, que permitem uma rápida comparação entre elas. As concentrações iônicas, expressas em miliequivalentes por litro (meq/L), são representadas por linhas dispostas à esquerda (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Fe^{2+}) e à direita (HCO_3^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, NO_3^-, Cl^-) de uma linha vertical que representa o valor zero de concentração (STIFF 1951). Os pontos gerados são interligados e resultam numa figura geométrica característica para cada amostra de água analisada, o que facilita a sua classificação. Estes diagramas são plotados em mapa, possibilitando a visualização espacial dos tipos hidroquímicos.

A análise estatística multivariada dos dados hidroquímicos permitiu correlacionar os grupos hidroquímicos identificados nos diagramas *Piper* e *Stiff* com os dendrogramas estatísticos gerados nas análises de agrupamento (*cluster analysis,* TRYON 1939, EVERITT *et al*. 2011*)* e dos componentes principais. Esses estudos foram realizados utilizando-se o *software* Xlstat 2010 (Addinsoft, New York/EUA) e considerando uma estrutura multidimensional, tanto sob o enfoque clássico como espacial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Arcabouço geológico

Uma criteriosa avaliação fundamentada nas descrições das amostras de calha de todos os poços perfurados no município (cadastro SIAGAS) permite inferir que no substrato rochoso há uma predominância dos sedimentos finos (siltitos, argilitos e folhelhos) sobre os grossos (arenitos finos a grossos e diamictitos) e intrusivas básicas, conforme resumido na tabela 1.

As descrições geológicas apresentadas nos 38 “logs” de poços analisados mostram que há predomínio na espessura dos sedimentos finos (64,61%) sobre os sedimentos grossos (33,16%), ao passo que as camadas de rochas básicas somam 2,23% do total. Pelos índices da relação grossos/finos constata-se que em 81,6% dos poços, há maior predominância de argilitos, siltitos e folhelhos e nos demais (18,4%) predominam arenitos finos a grossos e diamictitos. Estes fatos podem estar diretamente relacionados com as vazões médias de exploração de porte pequeno,

cuja média é de 6,3 m^3/h em Americana (valor obtido de acordo com o cadastro dos poços do SIAGAS).

O comportamento espacial dessas variáveis (sedimentos grossos/finos) está representado na figura 2 com valores distribuídos em curvas de isovalores da relação "grosso/fino". A análise desse mapa mostra que há predomínio de sedimentos grossos nas porções central - sudeste e sudoeste do município e uma tendência de aumento dessas camadas no sentido leste para oeste. No geral, os sedimentos finos predominam principalmente na porção central em direção ao norte e nordeste.

Os resultados obtidos são semelhantes ao estudo regional realizado por VIDAL (2002), que trabalhou com porcentagem de arenitos e identificou na região de Americana uma porcentagem de arenito de aproximadamente 30%.

TABELA 1 – Resumo das características físicas e litológicas dos poços selecionados para estudo no Município de Americana.

Poço	*Coordenadas UTM (m)*		*Profundidade Total (m)*	*Diabásio (m)*	*Sedimentos (m)*		*Relação Grossos/Finos*
	E	*N*			*Grossos*	*Finos*	
FM 02	261575	7485224	204	96	47	61	0,77
FM 03	262166	7484773	131	24	38	69	0,55
FM 04	262279	7486048	180	0	75	105	0,71
FM 05	262992	7485478	200	0	25	175	0,14
FM 07	262962	7484745	240	0	56	184	0,30
FM 09	263429	7484276	210	0	47	163	0,29
FM 10	264127	7486535	330	0	155	175	0,89
FM 11	264149	7487514	307	0	115	192	0,60
FM 13	259727	7484331	183	7	68	108	0,63
FM 15	258879	7485142	306	0	86	220	0,39
FM 17	257612	7486407	200	0	26	174	0,15
FM 18	257005	7486845	150	0	69	81	0,85
FM 20	259392	7479684	202	0	28	174	0,16
FM 21	262940	7481357	202	0	105	97	1,08
FM 22	269531	7482915	230	0	18	212	0,08
FM 24	257310	7486230	150	0	22	128	0,17
FM 25	261400	7482530	290	0	110	180	0,61
FM 26	260807	7480457	252	0	55	197	0,28
FM 27	258270	7483440	274	0	171	103	1,66
FM 28	259010	7482670	207	0	84	123	0,68
FM 32	266700	7480600	272	0	70	202	0,35
FM 33	266800	7480900	255	0	140	115	1,22
FM 34	263380	7484830	222	0	66	156	0,42
FM 35	263340	7484980	220	0	76	144	0,53
FM 36	261960	7484250	134	0	76	58	1,31
FM 37	264740	7484020	240	0	149	91	1,64
FM 38	264760	7484360	156	0	66	90	0,73
FM 39	260100	7481840	111	0	21	90	0,23
FM 40	260510	7480770	182	6	68	108	0,63
FM 41	260000	7481650	150	0	90	60	1,50
FM 43	262970	7485140	305	0	82	223	0,37
FM 45	264140	7482100	165	50	63	52	1,21
FM 46	257970	7488180	290	0	25	265	0,09
FM 47	265270	7483900	207	0	52	155	0,34
FM 48	258120	7487390	225	0	65	160	0,41
FM 49	261230	7482820	232	0	60	172	0,35
FM 50	263489	7482140	100	0	50	50	1,00
FM 51	267040	7483760	297	0	104	193	0,54
Total			8211	183	2723	5305	
% de espessura			100	2,23	33,16	64,61	

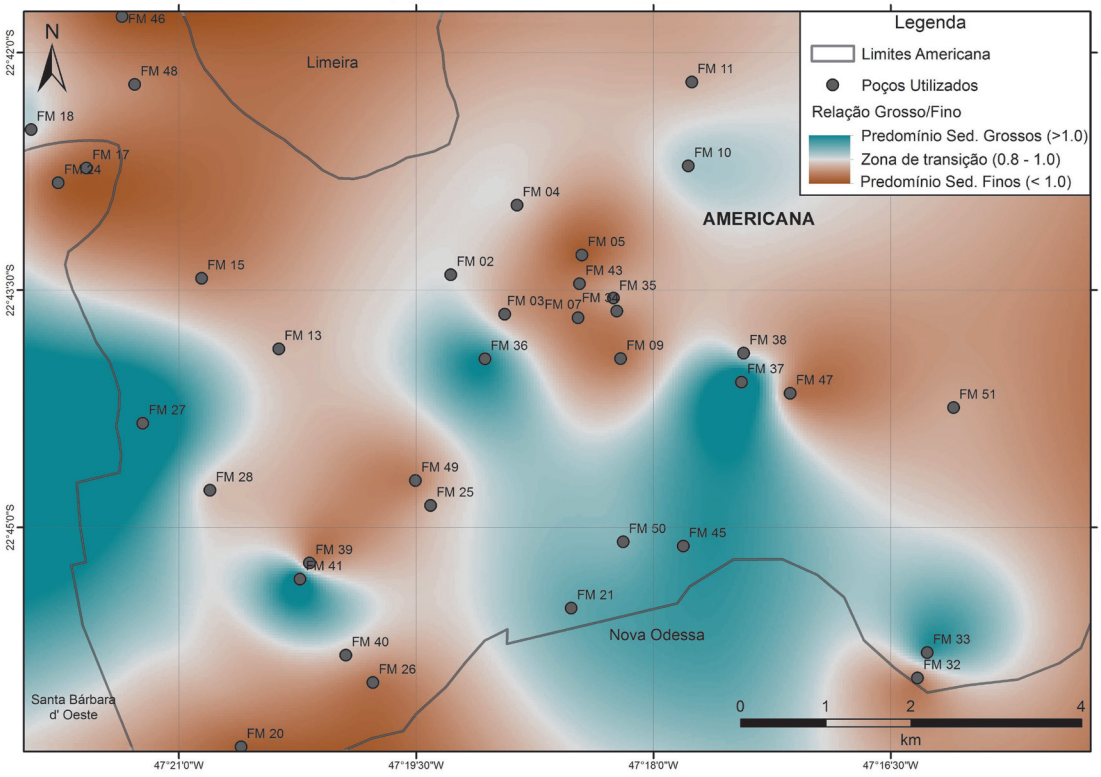

FIGURA 2 – Mapa de tendência da distribuição dos sedimentos grossos - finos.

4.2 Hidroquímica

A validação das análises químicas mostrou que 77% das amostras apresentam erros positivos e, portanto, indicam concentrações superiores de ânions, enquanto 23%, erros negativos. Todos os resultados apresentam erros menores que 5%, exceto a amostra FM-16 que apresenta erro de 6,36%, mas ainda dentro do intervalo permitido.

As características construtivas dos poços tubulares, os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas, bem como os componentes químicos das amostras de água subterrânea coletadas no Município de Americana/SP compõem as tabelas 2 e 3.

A tabela 2 mostra que os valores do pH variam entre 5,08 a 7,99, ou seja, de ácido a alcalino, enquanto a condutividade elétrica média é de 166,89 µS/cm, mas com desvio padrão alto devido os baixos valores de condutividade de até 19,18 µS/cm. Esses resultados são semelhantes aos valores já observados pelo DAEE (1981) na região de Americana, que registrou valores de condutividade elétrica inferiores a 350 µS/cm e pH com variações entre 5,6 a 8,9, porém com valores alcalinos mais frequentes.

O estudo dos componentes químicos com o auxílio do diagrama Piper (Figura 3) permitiu classificar as águas subterrâneas do SAT em três grupos hidroquímicos principais: bicarbonatadas cálcio-sódicas (Grupo 1, 41% das amostras), bicarbonatadas sódicas (Grupo 2, 36% das amostras) e cloretadas sódicas (Grupo 3, 23% das amostras).

A presença dos dois primeiros grupos já havia sido observada por outros autores (DAEE 1984, SEPE 1990), que classificam as águas do SAT como fracamente salinas e predominantemente bicarbonatadas sódicas, seguidas de bicarbonatadas cálcicas ou mistas (cálcio-sódicas). Além dessas características, CAMPOS (1993) constatou teores mais elevados de cloretos e sulfatos, fato que não foi observado no Município de Americana.

A distribuição espacial dos tipos hidroquímicos da área de estudo está apresentada na figura 4 por meio dos diagramas de Stiff. Espacialmente as amostras não apresentam um padrão definido de distribuição, porém verificou-se que as amostras bicarbonatadas sódicas exibem maior salinidade e pH, quando comparadas às amostras

bicarbonatadas cálcio-sódicas. Já as águas cloretadas sódicas ostentam grande variação nos valores de condutividade elétrica e pH, uma vez que esse tipo hidroquímico é resultante da misturas de águas oriundas de contaminação antrópica com água do aquífero, como será descrito adiante.

As águas classificadas como bicarbonatadas sódicas ocorrem nos poços com maiores profundidades, iguais ou superiores a 200 m. Já as águas bicarbonatadas cálcio-sódicas provém tanto de poços profundos, de 330 m, como de poços relativamente rasos (130 m).

A relação entre os parâmetros físico-químicos e sua distribuição espacial refletem as reações químicas e misturas entre águas dentro de uma unidade aquífera. Neste sentido, ao se analisar a alcalinidade (HCO_3^-) em relação à condutividade elétrica, constata-se boa correlação (R^2=0,85) para as águas bicarbonatadas (cálcio-sódicas e sódicas), ou seja, para essas águas o bicarbonato é o íon que possui relação direta com a salinidade, ao contrário do grupo das águas cloretadas sódicas que não apresenta correlação (Figura 5).

No diagrama da figura 6 as razões iônicas Na^+/Ca^{2+} mostram que as águas bicarbonatadas cálcio-sódicas apresentam resultados próximos do valor "um" (1), enquanto as águas bicarbonatadas sódicas e cloretadas sódicas apresentam razões iônicas maiores que "dois" (2).

TABELA 2 – Características construtivas dos poços tubulares e parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas da região de estudo (CE = condutividade elétrica; Q = vazão; -- = não analisado).

Amostras	*Coordenadas UTM (m)*		*Profundidade (m)*	*Q (m^3/h)*	*CE (µS/cm)*	*pH*	*T (°C)*	*Classificação da amostra*
	E	*N*						
FM 01	261195	7484475	165	9,0	225,0	6,40	20,2	Cloretada Sódica
FM 02	261575	7485224	204	3,0	153,8	7,88	20,3	Bicarbonatada Sódica
FM 03	262166	7484773	131	5,7	213,0	7,27	20,4	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 04	262279	7486048	180	4,0	175,6	7,16	22,0	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 05	262992	7485478	200	12,7	205,0	7,62	21,9	Bicarbonatada Sódica
FM 06	263328	7485057	220	4,2	157,8	7,13	21,9	Cloretada Sódica
FM 07	262962	7484745	240	3,0	206,0	7,99	21,9	Bicarbonatada Sódica
FM 08	263913	7483180	200	--	122,3	6,92	21,9	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 09	263429	7484276	210	3,0	239,0	7,68	22,0	Bicarbonatada Sódica
FM 10	264127	7486535	330	30,0	136,4	7,19	22,0	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 11	264149	7487514	307	8,0	242,0	5,83	21,8	Cloretada Sódica
FM 12	261521	7483595	120	1,0	106,9	6,97	21,8	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 13	259727	7484331	183	4,5	194,9	6,88	21,8	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 14	260459	7485235	--	--	176,1	7,24	21,8	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 15	258879	7485142	306	2,5	172,0	7,51	21,8	Bicarbonatada Sódica
FM 16	257387	7485418	224,5	3,0	19,2	6,74	21,8	Bicarbonatada Sódica
FM 17	257612	7486407	200	4,2	129,6	5,08	21,8	Cloretada Sódica
FM 18	257005	7486845	150	3,0	67,2	5,75	21,6	Cloretada Sódica
FM 19	257848	7482009	200	3,0	202,0	7,21	21,6	Bicarbonatada Sódica
FM 20	259392	7479684	202	4,8	182,5	6,82	22,0	Bicarbonatada Cálcio-Sódica
FM 21	262940	7481357	202	3,0	203,0	7,54	21,9	Bicarbonatada Sódica
FM 22	269531	7482915	230	3,0	142,4	6,63	21,9	Bicarbonatada Cálcio-Sódica

TABELA 3 – Componentes químicos de amostras de água subterrânea (mg/L) coletadas no Município de Americana/SP.

Amostra	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+ (mg/L)	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Mn^{2+}	Fe^{2+}
FM 01	21,00	< 2,00	<0,02	20,80	0,04	43,40	<0,04	2,92	19,00	7,14	3,64	0,35	0,02	<0,01
FM 02	97,70	< 2,00	0,83	0,05	0,09	<0,06	<0,04	0,63	23,30	11,20	0,08	0,45	<0,01	0,02
FM 03	131,00	< 2,00	1,98	0,14	0,05	<0,06	<0,04	0,20	19,80	20,00	3,47	1,93	0,17	0,50
FM 04	108,00	< 2,00	1,41	0,46	0,06	<0,06	<0,04	0,53	11,80	20,20	2,99	1,78	<0,01	<0,01
FM 05	127,00	< 2,00	3,35	0,13	0,06	<0,06	<0,04	0,25	35,50	10,60	0,48	0,75	<0,01	<0,01
FM 06	42,60	< 2,00	3,21	15,90	0,05	6,98	0,06	0,13	20,80	5,69	0,89	1,96	0,01	<0,01
FM 07	120,00	< 2,00	5,45	0,18	0,06	0,63	0,09	0,09	35,00	10,30	0,42	0,66	<0,01	<0,01
FM 08	66,10	< 2,00	1,57	0,04	0,03	<0,06	<0,04	0,68	8,20	9,87	2,06	3,08	0,08	<0,01
FM 09	150,00	< 2,00	2,44	0,06	0,03	<0,06	<0,04	0,28	38,70	14,50	0,99	0,93	<0,01	<0,01
FM 10	75,10	< 2,00	2,56	1,53	0,05	2,40	0,05	1,53	10,70	13,60	1,94	1,46	<0,01	0,04
FM 11	19,00	< 2,00	1,04	22,70	0,04	67,90	0,13	0,44	23,50	10,00	5,26	3,45	0,03	<0,01
FM 12	63,10	< 2,00	0,50	0,36	0,10	0,85	<0,04	0,09	10,60	9,15	1,44	1,81	<0,01	<0,01
FM 13	80,20	< 2,00	0,45	7,59	0,14	18,00	<0,04	<0,03	12,60	17,50	4,67	2,92	<0,01	<0,01
FM 14	82,20	< 2,00	3,38	3,20	0,15	12,80	<0,04	0,03	21,30	11,90	2,55	0,59	<0,01	<0,01
FM 15	104,00	< 2,00	5,61	0,27	0,14	<0,06	<0,04	0,40	36,80	3,56	0,15	0,49	<0,01	<0,01
FM 16	11,10	< 2,00	0,30	0,05	0,01	0,11	<0,04	0,06	1,84	0,33	0,14	2,20	<0,01	<0,01
FM 17	2,12	< 2,00	0,10	10,90	0,06	38,90	<0,04	0,06	17,60	1,14	0,62	1,75	0,06	0,12
FM 18	4,24	< 2,00	0,08	6,83	<0,01	16,40	<0,04	0,04	9,52	0,76	0,33	1,14	0,01	0,01
FM 19	96,90	< 2,00	3,83	10,70	0,27	<0,06	<0,04	1,64	37,20	1,85	1,55	1,51	0,09	0,02
FM 20	114,00	< 2,00	2,05	0,34	0,07	0,58	<0,04	0,36	15,30	18,80	3,53	2,26	<0,01	<0,01
FM 21	118,00	< 2,00	8,04	0,79	0,07	<0,06	<0,04	0,14	32,90	13,40	0,23	0,52	<0,01	0,25
FM 22	92,20	< 2,00	0,60	1,89	0,08	2,18	0,04	0,09	15,70	11,70	3,44	2,71	<0,01	<0,01

O alto teor de sódio e a presença de cálcio nas águas podem estar relacionados com a dissolução de plagioclásios. A percolação de água meteórica nas áreas de recarga propicia reações de hidrólise envolvendo água e ácido carbônico. A hidrólise promove a desintegração do mineral sob a influência dos íons H^+ e OH^- da água (MATHESS 1982). Este tipo de reação no SAT é caracterizado pela alteração de minerais como albita e anortita, que se transformam em argilominerais como a caulinita, de acordo com as reações abaixo:

$CaAl_2Si_2O_8$ (Anortita) + $3H_2O$ = Ca^{2+} + $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (Caulinita) + $2OH^-$

$2NaAlSi_3O_8$ (Albita) + H_2CO_3 + $9H_2O$ = $2Na^+$ + $4H_4SiO_4$ + $Al_2Si_2O_5$ (Caulinita) + $2HCO_3^-$

O ataque ácido das águas pluviais sobre estes silicatos (hidrólise) é irreversível e ocasiona dissolução incongruente, uma vez que produz novos minerais e substâncias sólidas amorfas (FREEZE & CHERRY 1979).

A velocidade de dissolução da albita indica forte dependência do potencial hidrogeniônico, com menor poder de concentração entre pH 6 e 7. Para soluções ácidas e alcalinas esta taxa de dissolução será maior. Nas soluções alcalinas o Na^+ tem influência sobre a reação quando presente em altas concentrações (CHOU & WOLLAST 1985).

A origem do ânion bicarbonato e do cátion cálcio nas águas bicarbonatadas cálcio-sódicas e bicarbonatadas sódicas podem estar relacionadas, em grande parte, ao processo de dissolução do mineral calcita.

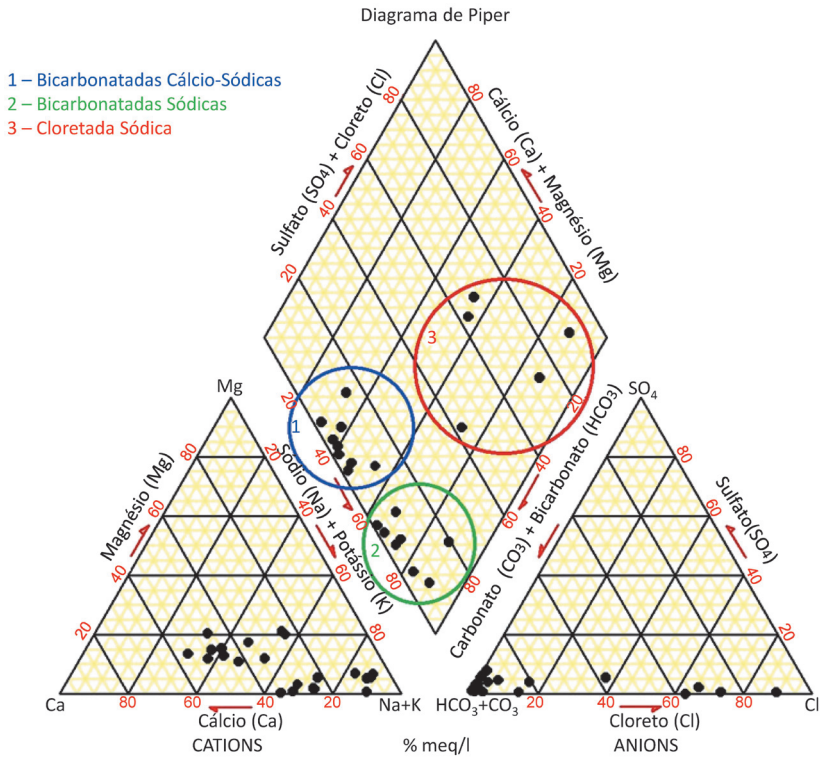

FIGURA 3 – Classificação das amostras de água subterrânea do Sistema Aquífero Tubarão no Município de Americana/SP.

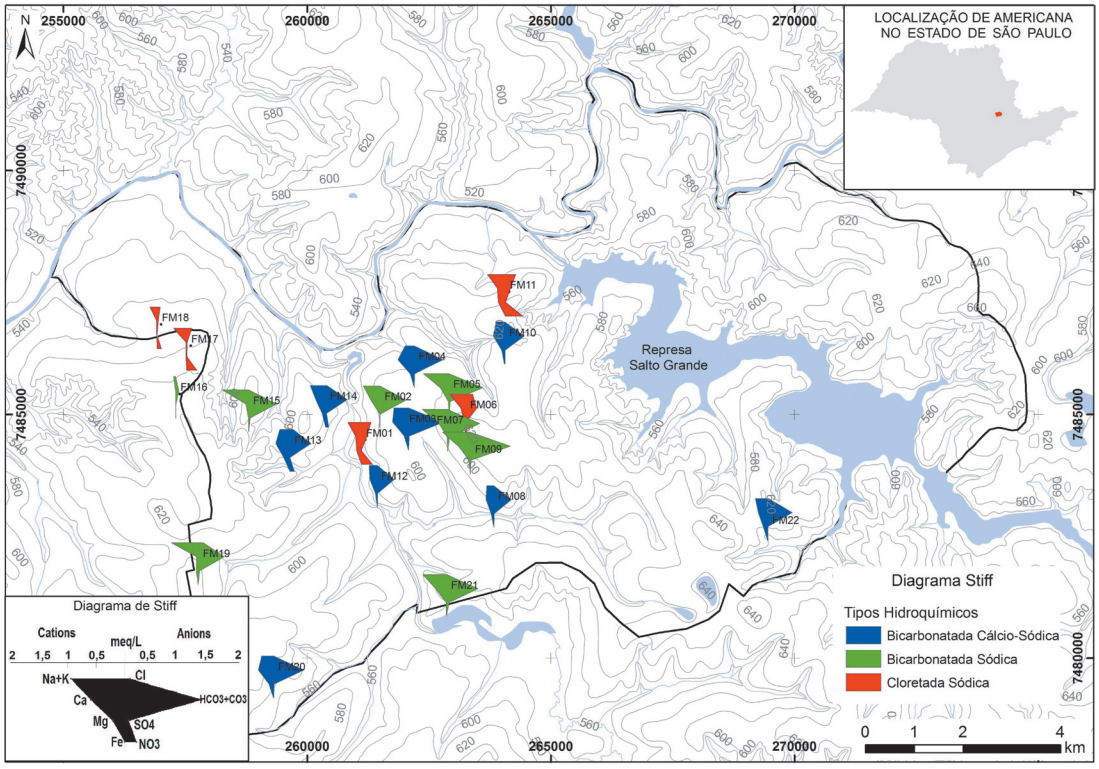

FIGURA 4 – Tipos hidroquímicos do Sistema Aquífero Tubarão na área de estudo por meio do Diagrama Stiff.

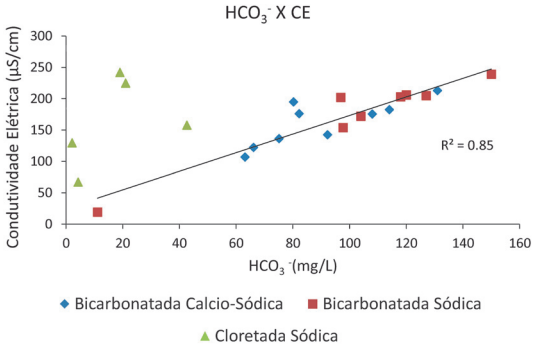

FIGURA 5 – Alcalinidade (HCO_3) *versus* condutividade elétrica nas águas do SAT.

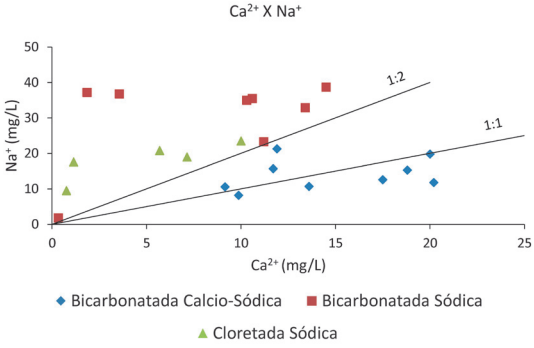

FIGURA 6 – Correlação entre cálcio e sódio em águas do SAT em Americana.

Assim, a dissolução da calcita consome íons H^+ e causa aumento do pH da água para valor médio de 7,01. Segundo PLUMMER *et al*. (1978), a taxa de dissolução do mineral calcita decresce com o aumento do pH e passa a diminuir drasticamente quando o pH for maior que 6. Nesta situação, os íons HCO_3^- e Ca^{2+} liberados durante a dissolução passam a representar concentrações significativas, fazendo com que ocorra o equilíbrio entre a solução alcalina, rica em bicarbonato e cálcio, e a fase carbonática presente na rocha.

Os resultados apresentados na figura 7 mostram claramente que as amostras bicarbonatadas possuem composição química associada a processos naturais, enquanto as amostras cloretadas sódicas não demonstram essa correlação, o que nos leva à suposição de uma influência da ação antrópica sobre a composição destas águas, como será descrito adiante.

Nas amostras classificadas como cloretadas sódicas (Grupo 3) observa-se boa correlação (R^2 = 0,7183) entre as concentrações de nitrato (NO_3^-) e cloreto (Cl^-), o que não ocorre nos outros grupos (Figura 8). Normalmente, as altas concentrações de nitrato associadas a cloreto em água subterrânea em zona urbana são indicativas de um aquífero contaminado por ação antrópica de origem sanitária (efluentes). Nesse grupo reúnem-se as amostras FM-01, FM-06, FM-11, FM-17 e FM-18. A concentração média de nitrato encontrado é de 34,71 mg/L, mas com valores que oscilam entre 6,98 até 67,9 mg/L.

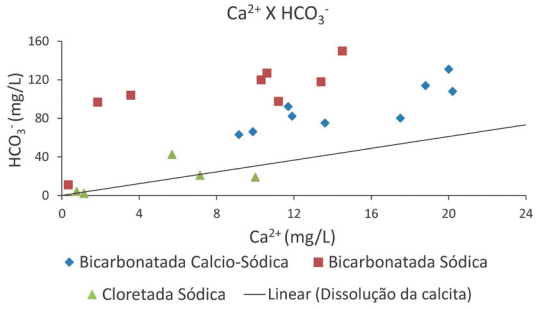

FIGURA 7 – Correlação "alcalinidade (HCO_3^-) *versus* cálcio (Ca^{2+})" para as amostras de água do SAT no município de Americana.

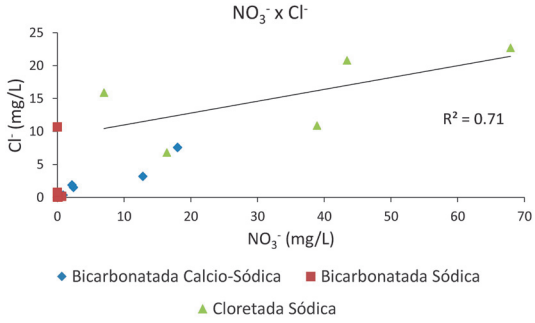

FIGURA 8 – Correlação "nitrato (NO_3^-) *versus* cloreto (Cl^-)" para as amostras de água do SAT no Município de Americana.

Algumas amostras têm concentrações acima ou muito próximas do padrão de potabilidade (45 mg/L) estabelecido pela Portaria Nº 2914/11 do Ministério da Saúde (BRASIL 2011), como é o caso das amostras FM-01, FM-11 e FM-17 as quais, respectivamente, possuem concentrações de nitrato de 43,4, 67,9 e 38,9 mg/L.

Reforçando a hipótese da contaminação do aquífero observa-se, conforme apresentado na figura 9, que existe uma correlação positiva (R^2 = 0,94) entre as concentrações de nitrato+cloreto e condutividade elétrica apenas para as águas cloretadas sódicas. Para essas águas a correlação indica que a salinidade é proveniente principalmente desses ânions, enquanto nos outros tipos hidroquímicos ela não é observada.

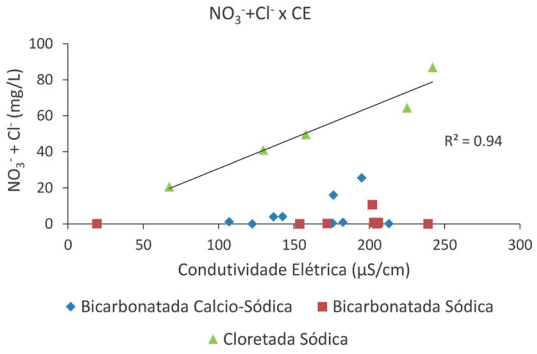

FIGURA 9 – Correlação "nitrato+cloreto *versus* condutividade elétrica" para as amostras de água do SAT no Município de Americana.

4.3 Análise de agrupamento dos dados hidroquímicos

Com base nos resultados hidroquímicos, foi realizada uma análise estatística por agrupamento (Figura 10), onde se puderam diferenciar três tipos hidroquímicos similares àqueles encontrados a partir dos diagramas *Piper* e *Stiff*.

No primeiro grupo estão as amostras FM-21, FM-07, FM-05, FM-09, FM-20, FM-04 e FM03, que englobam, predominantemente, as amostras de água com condutividade elétrica alta, ou seja, valor médio de 203,4 µS/cm, sendo correlacionadas ao grupo das águas bicarbonatadas sódicas.

O segundo grupo reúne amostras (FM-14, FM-13, FM-22, FM-02, FM-19, FM-15, FM-12, FM-08, FM-10 e FM-06) com condutividade elétrica média de 156,46 µS/cm, que podem estar correlacionadas com o grupo das águas bicarbonatadas calcio-sódicas.

O terceiro grupo, representado pelas amostras FM-01, FM-11, FM-16, FM-17 e FM-18, correlaciona-se com as amostras de águas cloretadas sódicas. Este grupo se distingue pelas elevadas concentrações de nitrato e cloreto. A média da condutividade elétrica das amostras é de 164,32 µS/cm.

Os estudos realizados com os componentes químicos para classificar as amostras de água com as diferentes técnicas analíticas (Diagramas *Piper*, *Stiff* e *cluster analyses*) mostram similaridades entre os grupos hidroquímicos.

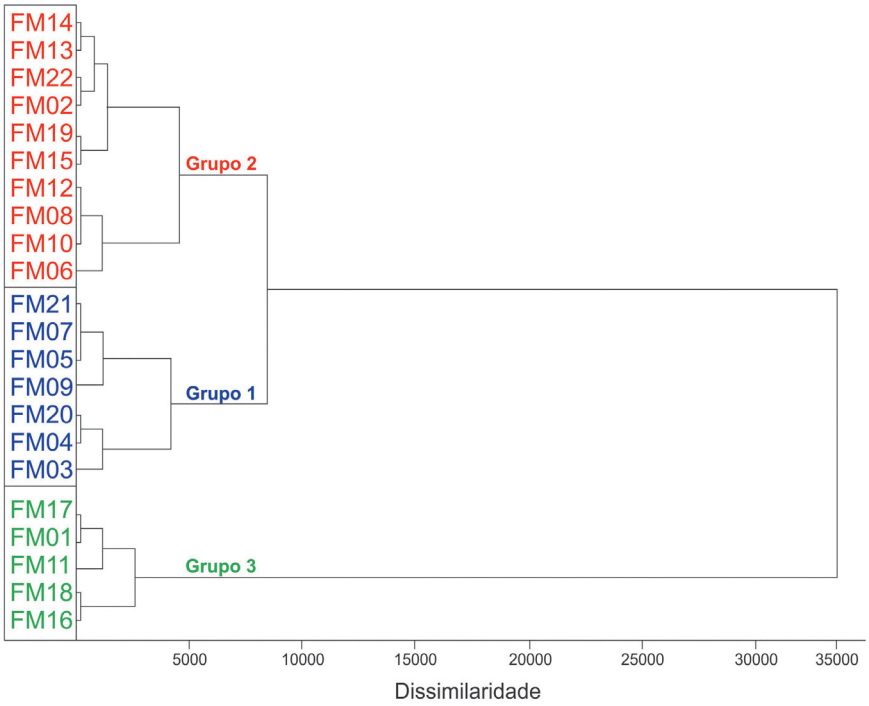

FIGURA 10 – Dendrogramas da análise por agrupamento (*cluster analyses*) dos componentes químicos das amostras de água do SAT no Município de Americana/SP.

5 CONCLUSÕES

As informações coletadas nos "logs" dos poços cadastrados possibilita projetar em subsuperfície a geologia do Subgrupo Itararé, representada por arenitos, siltitos e argilitos. Na porção central, de leste para oeste, predominam os sedimentos grossos, enquanto uma tendência de aumento dos sedimentos finos mostra-se para norte e sul, seguindo os padrões de condutividade elétrica das águas, que apresentam altos valores na porção central e decrescem em direção ao norte e para o sul.

As águas subterrâneas do SAT na área de estudo podem ser classificadas em três grupos: bicarbonatadas cálcio-sódicas, bicarbonatadas sódicas e cloretadas sódicas.

As águas bicarbonatadas cálcio-sódicas constituem 41% das amostras e apresentam pH oscilando de 6,83 a 7,27, com valor médio de 7,01. Elas possuem condutividade elétrica em torno de 161 µS/cm e podem ser consideradas fracamente salinizadas. O enriquecimento em cálcio desse tipo hidroquímico pode estar relacionado, em grande parte, à dissolução de minerais de calcita e de feldspatos cálcicos (anortita) e/ou, eventualmente, por troca iônica.

As amostras classificadas como bicarbonatadas sódicas representam 36% do total amostrado, com valores de pH que variam de 6,74 a 7,99 e média de 7,52. A salinidade apresenta valor médio de 174,99 µS/cm com alto desvio padrão, causado por uma amostra anômala que apresentou condutividade elétrica de 19,18 µS/cm.

O grupo das cloretadas sódicas, que representa 23% do total, tem valores de pH entre 5,08 a 7,13 e condutividade média de 164,32 µS/cm. Essas amostras apresentam alta concentração de nitrato associada a cloreto, o que indica uma contaminação do aquífero por ação antrópica.

O nitrato tem sido utilizado como indicador de contaminação das águas subterrâneas por atividades antrópicas, uma vez que ainda não foi apontada a ocorrência de rochas fornecedoras de nitrato no Estado de São Paulo. A origem da contaminação pode ser diversificada, destacando-se a aplicação de fertilizantes e insumos nitrogenados, utilização de fossas negras, vazamentos das redes coletoras de esgoto e influência de rios contaminados na zona de captação de poços.

Os casos de altas concentrações de nitrato são mais comuns em poços perfurados nos Sistemas Aquíferos Bauru e Guarani; no Aquífero Tubarão não há ainda a preocupação dos órgãos gestores, uma vez que as presenças de camadas argilosas acabam protegendo o aquífero. Contudo, em áreas onde as atividades antrópicas geram cargas elevadas de efluentes, como na Região Metropolitana de Campinas, faz-se necessário acompanhar a potencial interferência na qualidade das águas subterrâneas pelo monitoramento das concentrações de nitrato, cloreto e outros indicadores.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Estudos de Bacias – LEBAC por toda estrutura fornecida para a realização desse estudo, ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa, à Prefeitura Municipal de Americana pela cessão dos dados de poços e aos revisores do artigo e corpo editorial desta revista, que contribuíram com a evolução do texto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIAZZI, E. 2007. Estudo temporal do nível potenciométrico no Aquífero Tubarão, no município de Americana – SP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Geologia, 56 p.

BRASIL. Portaria Nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos permitidos para dezenas de parâmetros que precisam ser respeitados em toda água para consumo humano distribuída no território nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF.

CAETANO-CHANG, M.R. 1984. Análise Ambiental e Estratigrafia do Subgrupo Itararé (PC) no Sudoeste do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 309 p.

CAMPOS, H.C.N.S. 1993. Caracterização e Cartografia das Províncias Hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 177 p.

CHOU, L; WOLLEST, R. 1985. Steady-State Kinetics and Dissolution Mechanisms of Albite. *American Journal of Science*, 285: 963-993.

COELHO, M.P. 1993 Análise do processo de assoreamento do reservatório de Americana – SP. Instituto de Geociências e Ciências

Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 69 p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. Disponível em http://siagasweb.cprm.gov.br/layout. Acessado em jul. 2011.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1981. Estudo de Águas Subterrâneas, Região Administrativa 5 (Campinas), SP. DAEE, São Paulo, 2 v.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1984. Caracterização dos recursos hídricos no Estado de São Paulo. DAEE, São Paulo, 175 p.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/ UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. 1980. Mapeamento faciológico do Subgrupo Tubarão. Convênio DAEE-UNESP, Escala 1:50.000.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/ IG – INSTITUTO GEOLÓGICO/ IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/ CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2005. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. G. Rocha (coord.). São Paulo, 119 p., mapa.

EVERITT, B.S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. 2011. Cluster Analysis. John Wiley & Sons, Ltd, London, 5th ed., 848 p.

EZAKI, S. 2011. Hidrogeoquímica dos Aquíferos Tubarão e Cristalino na Região de Salto (SP). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 180 p.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, New Jersey, 604 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO GEOGRÁFICO DE ESTATÍSTICA. 2010. Tabela de População Residente, por sexo e situação de domicílio, população residente de 10 anos ou mais de idade, total, alfabetizada e taxa de alfabetização, segundo os municípios. Disponível em http://www.ibge.gov.br. Acessado em jul. 2011.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. 2009. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2 ed., São Paulo, 104 p.

LANDIM, P.M.B.; SOARES, P.C. 1979. Mapeamento Faciológico do Grupo Tubarão. Convênio DAEE-UNESP, São Paulo (Relatório Final).

MASSOLI, M.; AZEVEDO, A.A.B.; ODA, G. H.; SANTORO, J.; TOMINAGA, L.K.; PETRI, S. 1986. Contribuição à geologia do município de Cerquilho, SP. *Revista do Instituto Geológico*, 7: 31-34.

MATHESS, G. 1982. The properties of groundwater. Wiley, New York, 406 p.

ODA, G.H.; TAKEUCHI, D.M.; EZAKI, S.; IRITANI, M.A.; VARNIER, C.; ROSSINI-PENTEADO, D.; LIMA, C.V.F.; SILVA, A.H.; ZUCA, N.L.; PACHECO, R.P. 2012. Geometria do Aquífero Tubarão entre os municípios de Indaiatuba e Capivari (SP). *Revista do Instituto Geológico,* 33(1): 23-40.

PETRI, S. 1964. Grupo Tubarão. *Boletim do Instituto Geográfico e Geológico*, 41: 56-63.

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

PLUMMER, L.N.; WIGLEY, T.M.L.; PARKHURST, D.L. 1978. The kinetics of calcite dissolution in CO_2 – water systems at 5-60°C and 0.0-1.0 atm CO_2. *American Journal of Science*, 278: 179-216.

SÃO PAULO. 2006. Plano Estadual de Recursos Hídricos: 2004 / 2007 Resumo. DAEE, São Paulo, 92 p.

SÃO PAULO. 2007. Situação dos recursos hídricos no Estado de São Paulo. Ano base 2007. Secretaria do Meio Ambiente, Coordenadoria de Recursos Hídricos, São Paulo, 139 p.

SEPE, P.M. 1990. Comportamento do Aquífero Itararé no Município de Piracicaba e Áreas Vizinhas. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 181 p.

STEVAUX, J.C.; SOUZA FILHO, E.E.; TEIXEIRA, J.A.; LANDIM, P.M.B. 1987. Sistemas deposicionais do Subgrupo Itararé (P-C) na bacia hidrográfica do baixo Rio Capivari (SP): um modelo para prospecção de água subterrânea. *In*: SBG, SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6, Rio Claro, *Atas*, 1: 355-374.

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

TRYON, R.C. 1939. Cluster Analysis. Ann Arbor. Edwards Brothers.

VIDAL, A.C. 2002. Estudo Hidrogeológico do Aquífero Tubarão na área de afloramento da porção central do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 122 p.

Endereço dos autores:

Filipe Montanheiro e Hung Kiang Chang – Universidade Estadual Paulista, Laboratório de Estudos de Bacias – LEBAC, Avenida 24-A, 1515, Bela Vista, CEP: 13.506-900, Rio Claro, SP. *E-mails*: flpmontanheiro@gmail.com; chang@rc.unesp.br.

Didier Gastmans – Universidade Estadual Paulista, Centro de Estudos Ambientais – CEA, Avenida 24-A, 1515, Bela Vista, CEP: 13.506-900, Rio Claro, SP. *E-mail*: gastmans@rc.unesp.br.

Artigo submetido em 3 de novembro de 2014, aceito em 10 de dezembro de 2014.