

COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA – $\delta^{18}\text{O}$ E δD – DAS ÁGUAS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU NO ESTADO DE SÃO PAULO

Marcia Regina STRADIOTO¹ & Hung Kiang CHANG¹

(1) Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP/Rio Claro. Avenida 24-A, 1515, CEP: 13506-900. Bela Vista, Rio Claro - São Paulo. Endereços eletrônicos: marciastradioto@uol.com.br, chang@rc.unesp.br.

Introdução
Sistema Aquífero Bauru
Isótopos Ambientais
Materiais e Métodos
Resultados e Discussões
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Os isótopos ambientais, principalmente $\delta^{18}\text{O}$ e δD , podem fornecer informações importantes sobre as águas subterrâneas, como origem, mistura de águas de diferentes aquíferos e recarga do reservatório. O presente trabalho apresenta resultados de razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e de δD das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, bem como sua distribuição em suas unidades aquíferas no estado de São Paulo. O estudo foi desenvolvido utilizando-se amostras de águas coletadas em poços previamente selecionados na área de ocorrência de rochas do Grupo Bauru em São Paulo. Análise estatística paramétrica foi utilizada para verificar similaridades entre as razões isotópicas das principais unidades aquíferas, utilizando-se 339 amostras de águas subterrâneas distribuídas por todo o estado. As razões isotópicas determinadas variam de -8,94‰ a -3,55‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e de -62,5‰ a -25,4‰ para δD e se acomodam à Linha de Água Meteorológica Global.

Palavras-chave: Isótopos Estáveis, Águas Subterrâneas, Sistema Aquífero Bauru.

ABSTRACT - Environmental isotopes, particularly $\delta^{18}\text{O}$ e δD , provide important information on groundwater origin, mixture of different groundwater and aquifer recharge. The present study presents the results of isotope ratio of $\delta^{18}\text{O}$ e de δD for groundwater of Bauru Aquifer System (SAB), as well as their distribution over the aquifer units occurring in the state of São Paulo. The study was performed using water samples collected in previously selected wells in the outcrop areas of the Bauru Group in São Paulo. Statistical analysis was useful to test isotope ratios similarities among the major aquifer units, using 339 groundwater samples distributed over the entire area of occurrence of SAB in the state of São Paulo. Isotope ratios vary from -8,94‰ to -3,55‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -62,5‰ to -25,4‰ for δD with the values falling closely along the Global Meteoric Water Line.

Keywords: Stable Isotope, Groundwater, Bauru Aquifer System.

INTRODUÇÃO

Isótopos ambientais vêm sendo cada vez mais utilizados em estudos hidrológicos e hidrogeoquímicos, particularmente $\delta^{18}\text{O}$ e δD . Esse fato se deve à popularização da técnica de espectroscopia de absorção a laser em cavidade ressonante (e.g., Busch e Busch, 1997; Bear *et al.*, 2002) que fornece, além de rapidez, excelente precisão e acuracidade analítica (0,2‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e 1,4 ‰ para δD). Seu uso tem sido frequentemente associado e complementar a estudos hidrogeoquímicos; no Brasil destacam-se os trabalhos de Gallo e Sinelli (1980), Kimmelman *et al.* (1982), Silva (1983), Gastmans (2007) e Gastmans *et al.* (2010).

O presente estudo objetiva avaliar a distribuição regional e o comportamento da composição isotópica das águas subterrâneas nas unidades aquíferas do Sistema Aquífero Bauru (SAB) no estado de São Paulo. Para o estudo foram coletadas amostras de águas desse sistema aquífero, distribuídas por todo o estado.

A área de estudo compreende a porção paulista de ocorrência de rochas do Grupo Bauru (Figura 1), com área de aproximadamente 117 000 km² (47% do território paulista), abrangendo 309 municípios e população estimada em cerca de 5 625 300 habitantes (IBGE, 2010). Esta região é limitada ao norte pelo Rio Grande, a oeste pelo Rio

Paraná, a sul pelo Rio Paranapanema e a leste pelas exposições de rochas basálticas da

Formação Serra Geral.

SISTEMA AQUÍFERO BAURU

O Sistema Aquífero Bauru comporta-se como unidade hidrogeológica de extensão regional, contínua, livre e localmente confinada, com espessura média de 100 m, mas podendo alcançar mais de 300 m na região de Marília (SP). Constituído por rochas cretáceas do Grupo Bauru, assenta-se predominantemente sobre substrato impermeável formado pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral (DAEE, 1974; 1976, 1979).

O Grupo Bauru se estende por área de aproximadamente 370 000 km², distribuídos pelo triângulo mineiro, noroeste do Paraná, sudeste do Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e a maior parte do Planalto Ocidental de São Paulo. Em São Paulo, as rochas do Grupo Bauru repousam sobre os basaltos da Formação Serra Geral, por meio de discordância erosiva (Brandt Neto *et al.*, 1977; Soares *et al.*, 1980; Almeida *et al.*, 1981; Riccomini *et al.*, 1981), e localmente sobre rochas das formações Botucatu e Pirambóia, como na região de Bauru (SP) (Suguió *et al.*, 1977; Paula e Silva e Cavagutti, 1992, 1994).

Estudos de subsuperfície realizados por Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2005) mantiveram a subdivisão estratigráfica estabelecida por Soares *et al.* (1980) – formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília – incluindo a Formação Pirapozinho por eles definida, além da Formação Araçatuba, definida por Barcelos e Suguió (1987). Segundo Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2006), essas unidades estratigráficas correspondem às unidades hidroestratigráficas do SAB, uma vez que as particularidades litológicas de cada formação governam suas propriedades hidráulicas.

Segundo Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2002, 2003), o Aquífero Caiuá e o Aquitardo Pirapozinho são compostos respectivamente por fácies psamíticas e pelíticas, que se interdigitam. As fácies psamíticas são formadas por arenitos depositados em ambiente fluvial, com interações eólicas mais proeminentes em direção ao topo da sucessão, aflorantes em

pequena extensão na região do Pontal do Paranapanema e nas proximidades do Rio Paraná; as fácies pelíticas constituem depósitos argilo-siltosos de ambiente lacustre. O Aquífero Caiuá apresenta extensão regional, é livre a semiconfinado e contínuo. Condições de semiconfinamento são observadas nas porções onde a Formação Pirapozinho intercala-se com a Formação Caiuá, ou onde esta última encontra-se encimada por outras unidades aquíferas do SAB.

O Aquífero Santo Anastácio aflora em estreita faixa paralela ao Rio Paraná (Figura 1), e em subsuperfície avança na direção oriental (Paula e Silva, 2003). Segundo esse autor, é representado por sedimentos preponderantemente arenosos, com raras intercalações pelíticas; apresenta extensão regional, é livre a semiconfinado e contínuo; possui condições de semiconfinamento nas porções onde está recoberto pelo Aquitardo Araçatuba ou por camadas pelíticas atribuídas ao Aquífero Adamantina.

O Aquitardo Araçatuba isola as unidades hidroestratigráficas subjacentes: na porção sudoeste isola os aquíferos Caiuá e Santo Anastácio; nas demais áreas assentam-se sobre o embasamento basáltico ou cobre localmente o Aquífero Santo Anastácio (Paula e Silva, 2003).

Para Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2002, 2003), o Aquífero Adamantina ocorre extensivamente em superfície e apresenta-se coberto apenas localmente pela Formação Marília; está ausente, por erosão, no extremo sudoeste paulista (Figura 2); apresenta-se livre a localmente confinado. O confinamento local é decorrente principalmente das variações de permeabilidade de seus sedimentos, em razão de maior ou menor teor de argila da matriz, ou de camadas pelíticas que se intercalam aos corpos arenosos (Paula e Silva, 2003).

O Aquífero Marília situa-se na porção centro-oriental da área de exposição do Grupo Bauru em São Paulo, entre os rios Tietê e Paranapanema. É representado por sucessão homogênea, predominantemente arenosa, de granulometria fina a grossa, com baixo

conteúdo argiloso, intercalações delgadas de material pelítico e zonas com intensa cimentação carbonática; apresenta extensão regional, é livre e localmente confinado (Paula e Silva, 2003). Segundo esse autor, a unidade

apresenta aquíferos suspensos em zonas de alteração superficial da unidade, e devido à presença de estratos subjacentes relativamente impermeáveis que isolam o corpo aquoso principal.

ISÓTOPOS AMBIENTAIS

Os isótopos ambientais constituem importante ferramenta de investigação em estudos hidrogeológicos. A composição dos isótopos estáveis na água de chuva é modificada por processos meteóricos, de maneira que as águas de recarga têm assinatura isotópica característica, que pode ser utilizada como traçador natural da origem das águas subterrâneas. Ainda, o teor de radioisótopos fornece uma medida do tempo de residência das águas subterrâneas no aquífero, em função do decaimento radioativo (Clark e Fritz, 1997).

Além de servirem como indicativos de proveniência e idade das águas subterrâneas, os isótopos ambientais são importantes em estudos sobre qualidade das águas, evolução geoquímica, processos de recarga, interação rocha-água, origem da salinidade e processos de contaminação (Clark e Fritz, 1997).

O hidrogênio e o oxigênio da água ocorrem com diferentes combinações isotópicas em suas moléculas. De maior interesse para hidroquímica são as moléculas $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ (comum), $^1\text{HD}^{16}\text{O}$ (raro) e $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ (raro), que podem ser divididas entre moléculas leves ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$) e moléculas pesadas ($^1\text{HD}^{16}\text{O}$ e $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$). A composição isotópica da água é expressa em comparação com a composição isotópica média da água do oceano, um padrão internacional denominado Standard Mean Ocean Water (SMOW) e, atualmente, Viena Standard Mean Ocean Water (VSMOW) (Craig, 1961). A diferença entre a razão isotópica da água e este padrão é expressa em partes por mil (‰). A razão de ^{18}O em relação ao ^{16}O é representada por $\delta^{18}\text{O}$ e a de deutério em relação ao H é representada por δD .

$$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰} = x \ 1000 \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{amostra}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}}$$

$$\delta\text{D} \text{ ‰} = x \ 1000 \frac{(\text{D}/\text{H})_{\text{amostra}} - (\text{D}/\text{H})_{\text{VSMOW}}}{(\text{D}/\text{H})_{\text{VSMOW}}}$$

Água com menos deutério que VSMOW tem δD negativo; água com mais deutério que VSMOW tem δD positivo. O mesmo ocorre com o $\delta^{18}\text{O}$.

Águas meteóricas produzidas pela condensação de vapor de água da atmosfera, que por sua vez resulta de evaporação de águas superficiais, apresentam correlação linear entre

δD e $\delta^{18}\text{O}$. Esta relação empírica, inicialmente proposta por Craig (1961), resulta primordialmente do fracionamento em equilíbrio durante a condensação, conhecido também como destilação tipo Rayleigh (Clark e Fritz, 1997). A equação que descreve essa relação é conhecida como Linha Meteórica Global (LMG):

$$\delta D (\text{‰}) = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

individualmente apresentam variações na declividade.

A LMG incorpora uma combinação de linhas meteóricas locais e/ou regionais que

MATERIAIS E MÉTODOS

Para análise dos isótopos ^{18}O e deutério foram coletadas 339 amostras de águas de poços que explotam o SAB no estado de São Paulo. Dentre essas amostras, 40 são de águas do Aquífero Marília, 212 do Aquífero Adamantina, 63 do Aquífero Santo Anastácio e 24 do Aquífero Caiuá (Figura 1). No momento da coleta foram quantificados os parâmetros temperatura, condutividade elétrica e pH, e também determinado o posicionamento geográfico dos poços, com o auxílio de GPS. Os frascos foram fechados e conservados sob refrigeração até serem descarregados no laboratório para análises isotópicas.

As análises dos isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio foram realizadas por espectroscopia isotópica de absorção laser em cavidade ressonante. Essa técnica, tipo *ring-down* (CRDS, *cavity ring-down spectroscopy*), se baseia na absorção de radiação laser na faixa do infravermelho próximo (0,7 microns a 2,5 microns) por substâncias no estado gasoso, como água, gás carbônico e metano. O instrumento utilizado para análise isotópica foi Liquid Water Isotope Analyzer da Los Gatos Research Inc (LWIA-24d). As análises isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e de δD) foram efetuadas no laboratório de Hidroquímica do IGCE, UNESP, Rio Claro.

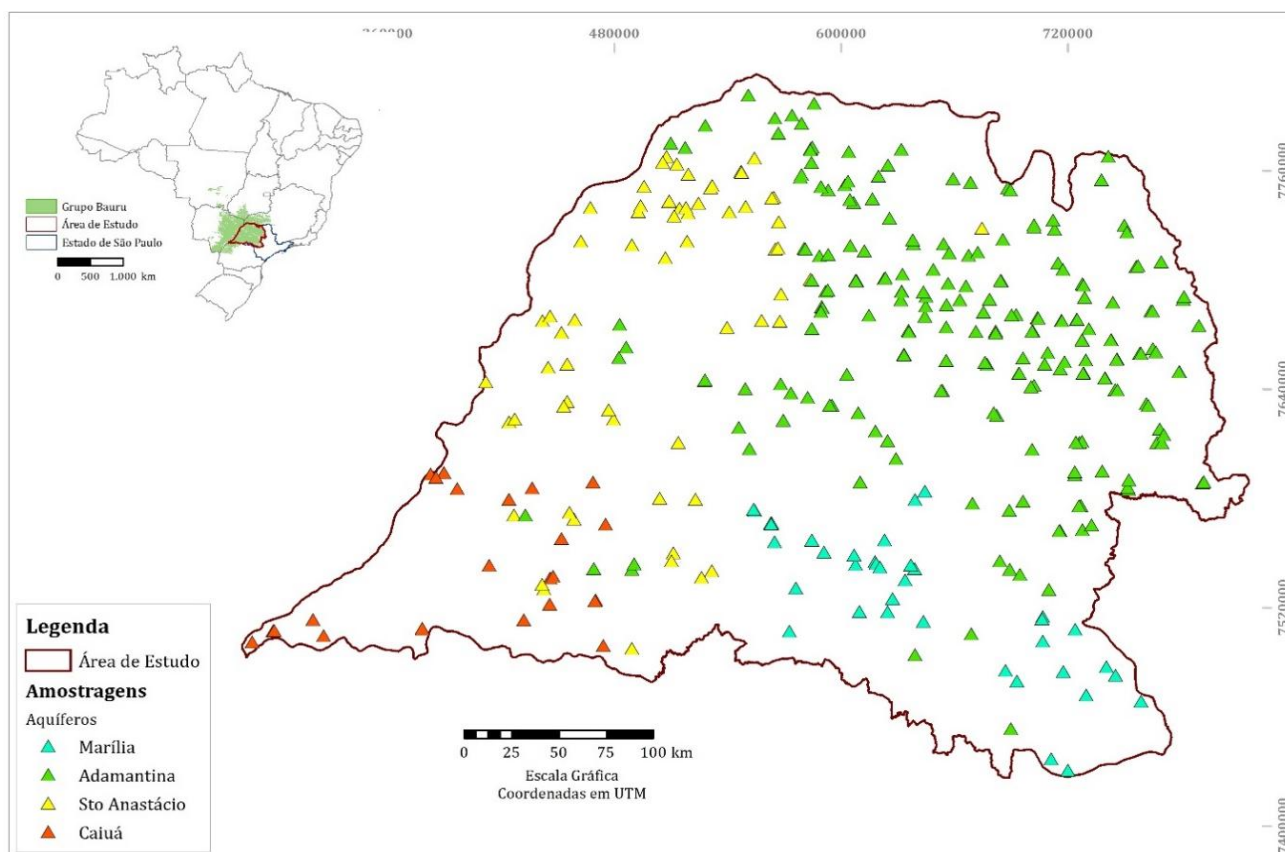


Figura 1. Localização da área de estudo e dos poços amostrados para análise de $\delta^{18}\text{O}$ e δD .

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As razões isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ variam no intervalo de -8,94‰ a -3,55‰ (VSMOW),

enquanto as razões δD situam-se entre -62,5‰ e -25,4‰ (VSMOW; Tabela 1). A maioria das

amostras tem composição isotópica próxima à da LMG (Figura 2), sancionando sua origem meteórica. Uma análise visual da Figura 2 mostra que as águas do Aquífero Caiuá são geralmente mais enriquecidas em isótopos de ^{18}O e deutério que as dos demais aquíferos estudados; as águas dos aquíferos Adamantina e

Santo Anastácio são similares em conteúdo isotópico de ^{18}O e deutério, contudo, algumas amostras deste último são mais enriquecidas nesses isótopos que as do Aquífero Adamantina; as águas do Aquífero Marília possuem composição isotópica similar às do Aquífero Adamantina.

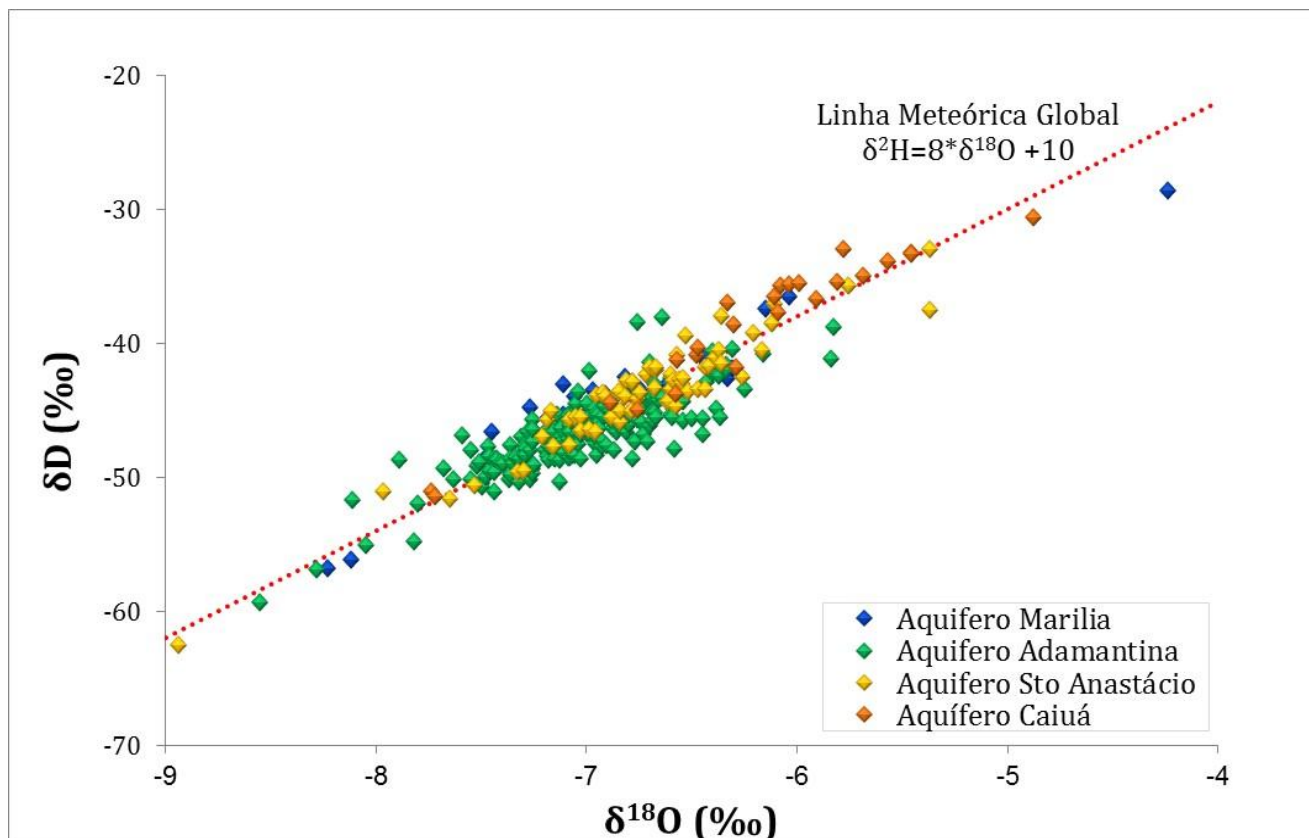


Figura 2. Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e δD para águas dos aquíferos Marília, Adamantina, Santo Anastácio e Caiuá no estado de São Paulo. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD são reportados em relação ao padrão de referência VSMOW.

Os dados isotópicos de chuvas no estado de São Paulo (estações de Campinas e Piracicaba), extraídos do GNIP/IAEA (Global Network of Isotopes in Precipitation/ International Atomic Energy Agency), mostram variação de δD entre -60‰ a -20‰ e de $\delta^{18}\text{O}$ entre -9‰ a -4‰ para amostras coletadas na estação úmida (outubro a março), e valores entre -10‰ a 10‰ para δD e -3‰ a -1‰ para $\delta^{18}\text{O}$ na estação seca (abril a setembro) (Figura 3). Comparando-se esses dados aos obtidos para as águas das diferentes unidades aquíferas do SAB, verifica-se que suas águas têm predominantemente razões isotópicas similares às das chuvas da estação úmida, o que demonstra que a recarga ocorre primordialmente no verão.

As composições isotópicas do Aquífero Marília variam entre -7,5‰ e -6,0‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e entre -48,0‰ e -40,0‰ para δD , sendo -6,8‰ o valor médio para $\delta^{18}\text{O}$ e -44,0‰ para δD . No Aquífero Adamantina, a maioria dos valores situa-se entre -8,0‰ e -6,0‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e entre -52,0‰ e -40,0‰ para δD , sendo -7,0‰ e -46,5‰ suas respectivas médias. A maioria das amostras do Aquífero Santo Anastácio tem valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -7,5‰ e -6,0‰ e entre -48,0‰ e -40,0‰ para δD ; suas médias são respectivamente -6,7‰ e -43,8‰. No Aquífero Caiuá os valores para $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -7,0‰ e -5,5‰, e os de δD variam entre -42,0‰ e -32,0‰, sendo as médias de -6,2‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -38,6‰ para δD (Tabela 2 e Figura 4).

Tabela 1. Dados de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) e δD (‰ VSMOW) de amostras de águas do SAB.

Amostra	δD	$\delta^{18}\text{O}$	Amostra	δD	$\delta^{18}\text{O}$	Amostra	δD	$\delta^{18}\text{O}$	Amostra	δD	$\delta^{18}\text{O}$	Amostra	δD	$\delta^{18}\text{O}$
SAB-1	-44,0	-6,7	SAB-71	-45,8	-6,7	SAB-139	-43,0	-6,6	SAB-211	-40,8	-6,2	SAB-279	-35,7	-5,8
SAB-2	-44,2	-6,7	SAB-72	-48,3	-7,1	SAB-140	-42,9	-6,8	SAB-212	-47,3	-7,1	SAB-280	-41,6	-6,3
SAB-3	-45,2	-6,7	SAB-73	-46,7	-7,1	SAB-141	-44,0	-6,9	SAB-213	-45,3	-6,8	SAB-281	-38,5	-6,1
SAB-4	-45,1	-6,7	SAB-74	-46,4	-7,1	SAB-142	-43,3	-6,7	SAB-214	-45,7	-6,9	SAB-282	-40,5	-6,4
SAB-5	-46,1	-6,9	SAB-75	-46,6	-7,2	SAB-143	-41,1	-6,4	SAB-215	-45,6	-7,0	SAB-283	-41,8	-6,7
SAB-6	-45,1	-6,8	SAB-76	-45,7	-7,1	SAB-144	-44,0	-6,8	SAB-216	-43,1	-6,6	SAB-284	-42,3	-6,6
SAB-7	-46,1	-7,0	SAB-77	-46,8	-6,5	SAB-145	-47,7	-7,2	SAB-217	-45,2	-7,0	SAB-285	-50,7	-7,5
SAB-8	-44,4	-6,9	SAB-78	-45,6	-6,5	SAB-146	-45,5	-6,9	SAB-218	-41,9	-6,3	SAB-286	-47,6	-7,1
SAB-9	-45,3	-6,9	SAB-79	-45,5	-6,7	SAB-148	-45,7	-7,1	SAB-219	-56,8	-8,2	SAB-287	-44,1	-6,7
SAB-10	-45,6	-7,0	SAB-80	-45,7	-7,1	SAB-149	-47,0	-7,2	SAB-220	-56,2	-8,1	SAB-288	-43,5	-6,7
SAB-11	-45,7	-6,8	SAB-81	-46,7	-7,0	SAB-150	-46,4	-7,0	SAB-221	-45,7	-7,0	SAB-289	-42,2	-6,4
SAB-12	-42,0	-6,3	SAB-82	-46,1	-6,8	SAB-151	-62,5	-8,9	SAB-222	-47,2	-7,1	SAB-290	-41,8	-6,4
SAB-13	-43,4	-6,5	SAB-83	-44,2	-6,7	SAB-152	-51,6	-7,7	SAB-223	-43,8	-6,8	SAB-291	-43,4	-6,3
SAB-14	-44,2	-6,7	SAB-84	-44,6	-6,8	SAB-153	-46,5	-7,0	SAB-224	-43,4	-6,8	SAB-292	-42,5	-6,3
SAB-15	-44,9	-7,0	SAB-85	-42,9	-6,4	SAB-154	-43,6	-6,5	SAB-225	-46,5	-7,3	SAB-293	-43,4	-6,5
SAB-16	-45,5	-6,9	SAB-86	-46,6	-6,9	SAB-155	-44,7	-6,6	SAB-226	-43,8	-6,9	SAB-294	-44,3	-6,6
SAB-17	-45,6	-6,8	SAB-87	-45,9	-6,7	SAB-156	-46,6	-7,0	SAB-227	-43,4	-6,7	SAB-295	-42,7	-6,6
SAB-18	-46,7	-7,2	SAB-88	-45,3	-6,6	SAB-157	-48,0	-7,2	SAB-228	-44,8	-6,8	SAB-296	-42,3	-6,7
SAB-19	-47,2	-6,9	SAB-89	-47,5	-7,0	SAB-158	-45,2	-7,0	SAB-229	-45,5	-7,0	SAB-297	-40,9	-6,6
SAB-20	-47,6	-6,9	SAB-90	-45,8	-6,8	SAB-159	-48,6	-7,4	SAB-230	-28,6	-4,2	SAB-298	-41,8	-6,7
SAB-21	-46,6	-6,8	SAB-91	-48,5	-7,1	SAB-160	-50,4	-7,5	SAB-231	-25,4	-3,6	SAB-299	-45,7	-7,2
SAB-22	-47,4	-7,1	SAB-92	-48,0	-6,9	SAB-161	-48,4	-7,5	SAB-232	-41,4	-6,4	SAB-300	-41,7	-6,4
SAB-23	-47,1	-7,1	SAB-93	-43,7	-6,8	SAB-162	-49,0	-7,4	SAB-233	-43,1	-7,1	SAB-301	-41,8	-6,4
SAB-24	-47,6	-7,3	SAB-94	-46,8	-7,0	SAB-163	-45,9	-6,8	SAB-234	-46,6	-7,5	SAB-302	-45,1	-6,8
SAB-25	-47,7	-7,1	SAB-95	-47,5	-7,0	SAB-164	-44,4	-6,9	SAB-235	-44,0	-7,1	SAB-303	-50,6	-7,5
SAB-26	-49,0	-7,4	SAB-96	-50,0	-7,5	SAB-165	-45,0	-6,8	SAB-236	-44,5	-7,0	SAB-304	-51,7	-8,1
SAB-27	-46,1	-6,9	SAB-97	-45,4	-7,1	SAB-166	-51,4	-7,7	SAB-237	-45,2	-6,9	SAB-305	-46,9	-7,6
SAB-28	-46,8	-7,0	SAB-98	-44,9	-6,9	SAB-167	-37,1	-6,1	SAB-238	-41,1	-6,5	SAB-306	-47,7	-7,5
SAB-29	-46,6	-7,1	SAB-99	-44,3	-6,5	SAB-168	-40,5	-6,2	SAB-239	-45,3	-7,1	SAB-307	-45,9	-6,9
SAB-30	-47,6	-7,1	SAB-100	-47,1	-7,1	SAB-169	-43,8	-6,6	SAB-240	-42,5	-6,8	SAB-308	-46,3	-7,2
SAB-31	-49,6	-7,3	SAB-101	-46,2	-6,9	SAB-170	-51,1	-7,7	SAB-241	-44,8	-7,3	SAB-309	-46,1	-6,8
SAB-32	-48,9	-7,4	SAB-102	-46,8	-7,0	SAB-171	-39,4	-6,5	SAB-242	-45,6	-7,2	SAB-310	-50,2	-7,3
SAB-33	-49,6	-7,4	SAB-103	-46,0	-7,2	SAB-172	-38,0	-6,4	SAB-243	-45,2	-7,1	SAB-311	-49,1	-7,3
SAB-36	-46,9	-7,1	SAB-104	-45,5	-7,0	SAB-173	-36,5	-6,1	SAB-244	-46,9	-7,2	SAB-312	-47,8	-7,1
SAB-37	-48,7	-7,9	SAB-105	-55,1	-8,1	SAB-174	-37,0	-6,3	SAB-245	-48,6	-7,0	SAB-313	-48,4	-7,2
SAB-38	-45,7	-7,3	SAB-106	-46,6	-7,2	SAB-175	-33,0	-5,8	SAB-246	-48,7	-7,1	SAB-314	-46,5	-7,0
SAB-39	-43,6	-7,0	SAB-107	-45,4	-7,1	SAB-176	-35,6	-6,0	SAB-247	-48,6	-7,2	SAB-315	-40,4	-6,3
SAB-40	-45,3	-7,1	SAB-108	-45,7	-6,9	SAB-177	-35,7	-6,1	SAB-248	-45,3	-7,1	SAB-316	-47,0	-7,3
SAB-41	-48,6	-7,4	SAB-109	-46,1	-6,8	SAB-178	-30,6	-4,9	SAB-249	-48,7	-7,4	SAB-317	-45,1	-6,9
SAB-42	-49,2	-7,5	SAB-110	-46,1	-6,9	SAB-179	-33,2	-5,5	SAB-250	-52,0	-7,8	SAB-318	-43,1	-6,7
SAB-43	-49,8	-7,4	SAB-111	-46,4	-7,3	SAB-180	-33,9	-5,6	SAB-251	-49,7	-7,3	SAB-319	-44,9	-6,8
SAB-44	-49,0	-7,4	SAB-112	-49,3	-7,7	SAB-181	-33,3	-5,5	SAB-252	-50,2	-7,4	SAB-320	-42,6	-6,3
SAB-45	-46,6	-7,3	SAB-113	-44,5	-7,0	SAB-182	-40,9	-6,5	SAB-253	-50,2	-7,6	SAB-321	-44,9	-6,6
SAB-46	-45,9	-7,1	SAB-114	-44,1	-6,9	SAB-183	-41,8	-6,3	SAB-254	-46,2	-7,1	SAB-322	-46,7	-7,0
SAB-47	-46,7	-7,0	SAB-115	-46,2	-7,0	SAB-184	-40,3	-6,5	SAB-255	-48,3	-7,0	SAB-323	-43,5	-7,0
SAB-48	-47,2	-7,1	SAB-116	-45,4	-7,0	SAB-185	-36,7	-5,9	SAB-256	-48,0	-7,6	SAB-324	-36,5	-6,0
SAB-49	-47,9	-7,2	SAB-117	-47,0	-7,1	SAB-186	-35,4	-5,8	SAB-257	-42,9	-6,8	SAB-325	-37,4	-6,2
SAB-50	-49,5	-7,5	SAB-118	-45,8	-6,8	SAB-187	-38,6	-6,3	SAB-258	-44,7	-6,9	SAB-326	-43,1	-6,8
SAB-51	-48,7	-7,2	SAB-119	-47,0	-7,0	SAB-188	-37,7	-6,1	SAB-259	-47,7	-6,9	SAB-327	-47,3	-7,2
SAB-52	-49,3	-7,3	SAB-120	-49,6	-7,3	SAB-191	-39,2	-6,2	SAB-260	-51,1	-7,4	SAB-328	-46,1	-7,2
SAB-53	-46,8	-7,1	SAB-121	-50,3	-7,1	SAB-192	-42,0	-6,7	SAB-261	-42,4	-6,4	SAB-329	-48,3	-7,5
SAB-54	-47,6	-7,4	SAB-122	-48,4	-7,3	SAB-194	-33,0	-5,4	SAB-262	-42,6	-6,6	SAB-330	-59,3	-8,6
SAB-55	-47,3	-7,3	SAB-123	-50,3	-7,3	SAB-195	-40,6	-6,4	SAB-263	-47,7	-7,2	SAB-331	-47,2	-7,2
SAB-56	-47,9	-7,3	SAB-124	-48,3	-7,3	SAB-196	-43,7	-6,9	SAB-264	-45,9	-6,9	SAB-332	-45,4	-7,1
SAB-57	-48,9	-7,5	SAB-125	-43,9	-7,0	SAB-197	-45,1	-7,2	SAB-265	-48,5	-7,1	SAB-333	-56,9	-8,3
SAB-58	-48,5	-7,3	SAB-126	-42,8	-6,8	SAB-198	-51,1	-8,0	SAB-266	-48,3	-7,1	SAB-334	-45,3	-6,8
SAB-59	-48,6	-7,4	SAB-127	-43,6	-6,9	SAB-199	-43,5	-6,6	SAB-267	-44,1	-6,6	SAB-335	-42,1	-7,0
SAB-60	-48,6	-7,3	SAB-128	-42,6	-6,5	SAB-200	-44,9	-6,4	SAB-268	-50,2	-7,6	SAB-336	-41,4	-6,7
SAB-61	-48,2	-7,1	SAB-129	-44,3	-6,6	SAB-201	-45,6	-6,4	SAB-269	-44,5	-7,1	SAB-337	-44,1	-6,9
SAB-62	-46,8	-6,7	SAB-130	-45,9	-6,8	SAB-202	-41,1	-5,8	SAB-270	-48,0	-7,3	SAB-338	-46,3	-7,1
SAB-63	-44,7	-6,7	SAB-131	-43,4	-6,4	SAB-203	-48,6	-6,8	SAB-271	-47,3	-7,2	SAB-339	-46,3	-6,9
SAB-64	-47,4	-7,1	SAB-132	-37,5	-5,4	SAB-204	-46,4	-6,9	SAB-272	-41,5	-6,4	SAB-340	-38,8	-5,8
SAB-65	-46,2	-7,0	SAB-133	-44,2	-6,8	SAB-205	-54,8	-7,8	SAB-273	-43,7	-6,8	SAB-341	-46,0	-6,9
SAB-66	-46,7	-7,0	SAB-134	-45,1	-6,8	SAB-206	-45,5	-6,6	SAB-274	-38,4	-6,8	SAB-342	-41,9	-6,4
SAB-67	-46,5	-7,0	SAB-135	-49,5	-7,3	SAB-207	-45,6	-6,4	SAB-275	-38,1	-6,6	SAB-343	-46,5	-7,1
SAB-68	-47,3	-6,8	SAB-136	-42,8	-6,6	SAB-208	-47,8	-6,6	SAB-276	-35,5	-6,0	SAB-344	-45,4	-7,0
SAB-69	-47,3	-6,7	SAB-137	-45,5	-7,1	SAB-209	-46,1	-6,7	SAB-277	-35,0	-5,7	SAB-345	-46,2	-7,0
SAB-70	-45,8	-6,5	SAB-138	-45,5	-7,0	SAB-210	-44,7	-6,7	SAB-278	-41,2	-6,6			

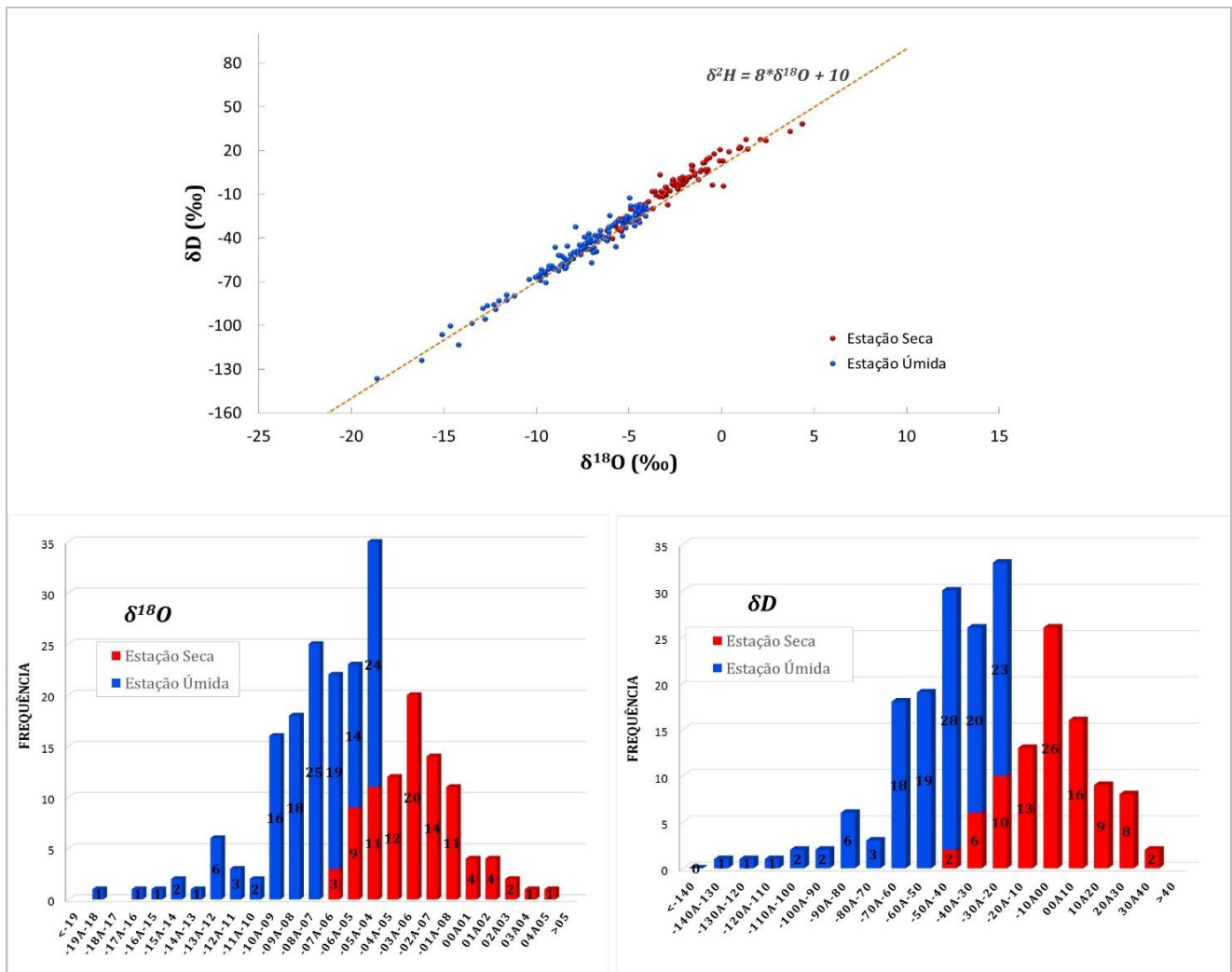


Figura 3. Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ versus δD e histogramas de frequência de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) e δD (‰ VSMOW) de águas pluviais do estado de São Paulo (banco de dados GNIP/IAEA). Estação seca corresponde aos meses de abril a setembro, e estação úmida, de outubro a março.

Tabela 2. Valores máximos, mínimos e tendência central dos valores isotópicos $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) e δD (‰ VSMOW) nos aquíferos estudados.

Aquíferos	$\delta^{18}\text{O}$			δD		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
Marília	-8,2	-3,6	-6,8	-56,8	-25,4	-44,0
Adamantina	-8,6	-5,8	-7,0	-59,3	-38,1	-46,5
Santo Anastácio	-8,9	-5,4	-6,7	-62,5	-33,0	-43,8
Caiuá	-7,7	-4,9	-6,2	-51,4	-30,6	-38,7

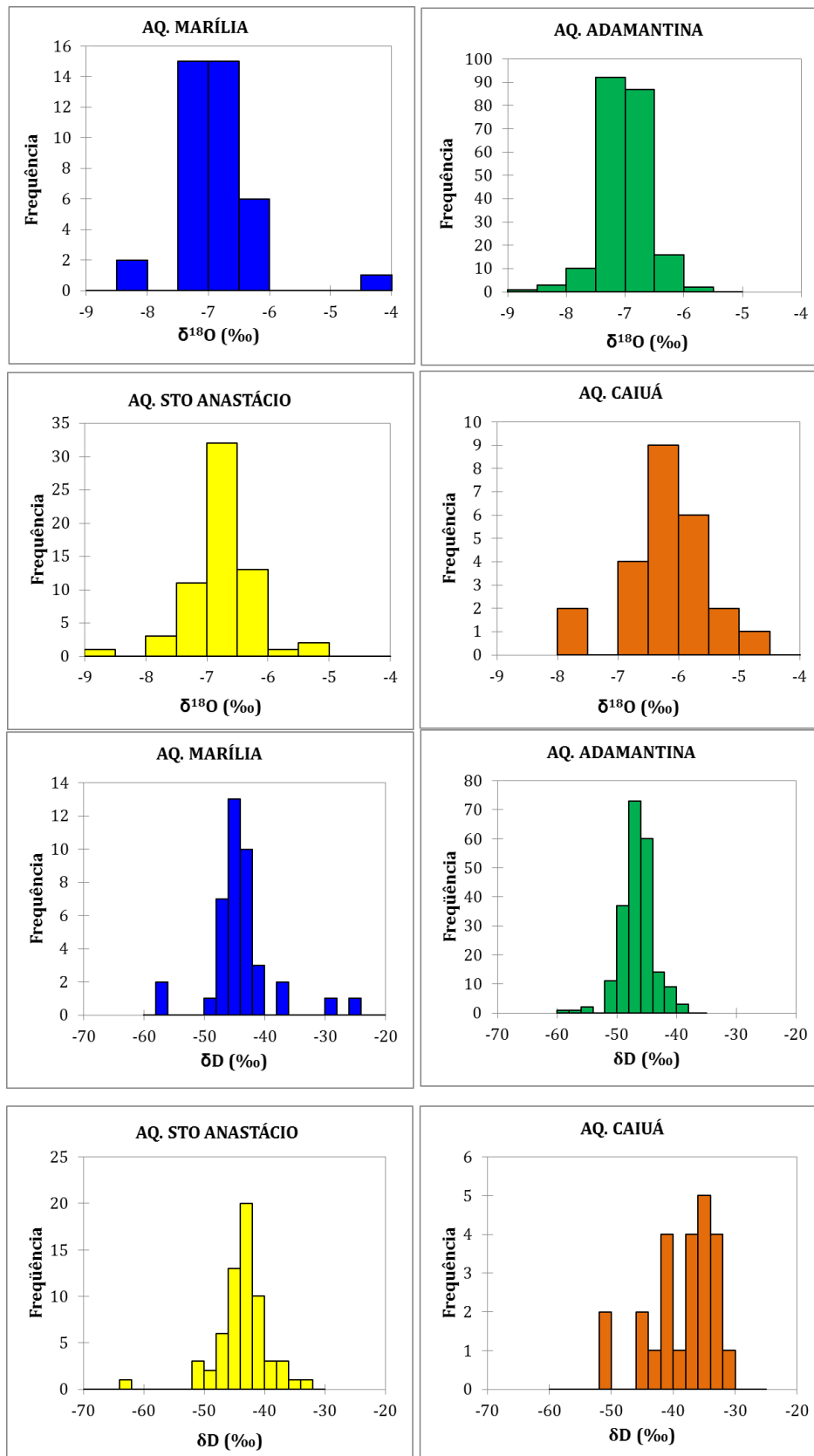


Figura 4. Frequências dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD para águas dos aquíferos Marília, Adamantina, Santo Anastácio e Caiuá.

Para verificar as possíveis associações entre as diferentes unidades aquíferas do SAB foram utilizadas análises estatísticas comparativas. O tipo de análise empregada foi definido pelo

teste de Kolmogorov-Smirnov, utilizado para verificar a aderência dos dados experimentais ao modelo teórico, mediante o teste de hipótese nula, H_0 , que afirma que a distribuição é

normal para um determinado nível de significância.

A tabela 3 apresenta os resultados do teste Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade da distribuição das razões $\delta^{18}\text{O}$ e δD provenientes de águas dos aquíferos

Marília, Adamantina, Santo Anastácio e Caiuá. Os resultados de *p-valores* obtidos para as unidades aquíferas indicam que, exceto para δD no Aquífero Marília, todos os demais dados isotópicos, considerado o nível de significância de 5%, seguem a distribuição normal.

Tabela 3. *p-valores* para teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov aplicados aos dados isotópicos dos aquíferos estudados. Hipótese nula (H_0) para $\alpha=5\%$.

Aquífero	$\delta^{18}\text{O}$		δD	
	<i>p-valor</i>	<i>H0</i>	<i>p-valor</i>	<i>H0</i>
Marília	0,065	Aceita	0,047	Não Aceita
Adamantina	0,185	Aceita	0,065	Aceita
Santo Anastácio	0,386	Aceita	0,305	Aceita
Caiuá	0,862	Aceita	0,528	Aceita

Dessa forma, utilizou-se o teste paramétrico *t de Student* para comparação do conteúdo isotópico entre os aquíferos do SAB. A comparação foi realizada entre médias das populações (aquíferos) com variáveis independentes, tamanhos amostrais diferentes e considerando igualdade ou desigualdade de variâncias, a depender dos resultados de um teste estatístico prévio. Também neste caso o teste de hipótese nula (H_0) foi aceito quando o *p-valor* encontrado foi maior que o nível de significância de 5%.

Os *p-valores* do teste *t Student* (Tabela 4) indicam que os valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e δD , provenientes da comparação entre os aquíferos, são estatisticamente iguais para um nível de significância de 5%, somente para os aquíferos Marília e Santo Anastácio; para o isótopo $\delta^{18}\text{O}$ verificou-se equivalência, para esse mesmo nível de significância, apenas entre os aquíferos Marília e Adamantina. As médias de $\delta^{18}\text{O}$ são -6,8‰ e -6,7‰ e de δD são -44‰ e -43,8‰, respectivamente para os aquíferos Marília e Santo Anastácio (Tabela 2).

Tabela 4. *P-valores* para o teste *t de Student* aplicado às médias dos valores isotópicos detectados nos aquíferos estudados. Hipótese nula (H_0) para $\alpha=5\%$.

Aquíferos	$\delta^{18}\text{O}$		δD	
	<i>p-valor</i>	<i>H0</i>	<i>p-valor</i>	<i>H0</i>
Marília vs Adamantina	0,108	Aceita	0,006	Não Aceita
Marília vs Sto Anastácio	0,690	Aceita	0,804	Aceita
Marília vs Caiuá	0,004	Não Aceita	0,000	Não Aceita
Adamantina vs Sto Anastácio	0,000	Não Aceita	<0,0001	Não Aceita
Adamantina vs Caiuá	<0,0001	Não Aceita	<0,0001	Não Aceita
Sto Anastácio vs Caiuá	0,000	Não Aceita	<0,0001	Não Aceita

As águas mais enriquecidas em ^{18}O e D estão situados na borda sudoeste da área de estudo, onde predominam poços que produzem água do Aquífero Caiuá. Ocorre empobrecimento isotópico em direção às bordas norte e leste/sudeste, onde foram

amostrados os aquíferos Santo Anastácio e Marília (Figuras 5 e 6). Também verifica-se empobrecimento nas porções central e nordeste, cujos poços amostrados são, em sua maioria, do Aquífero Adamantina.

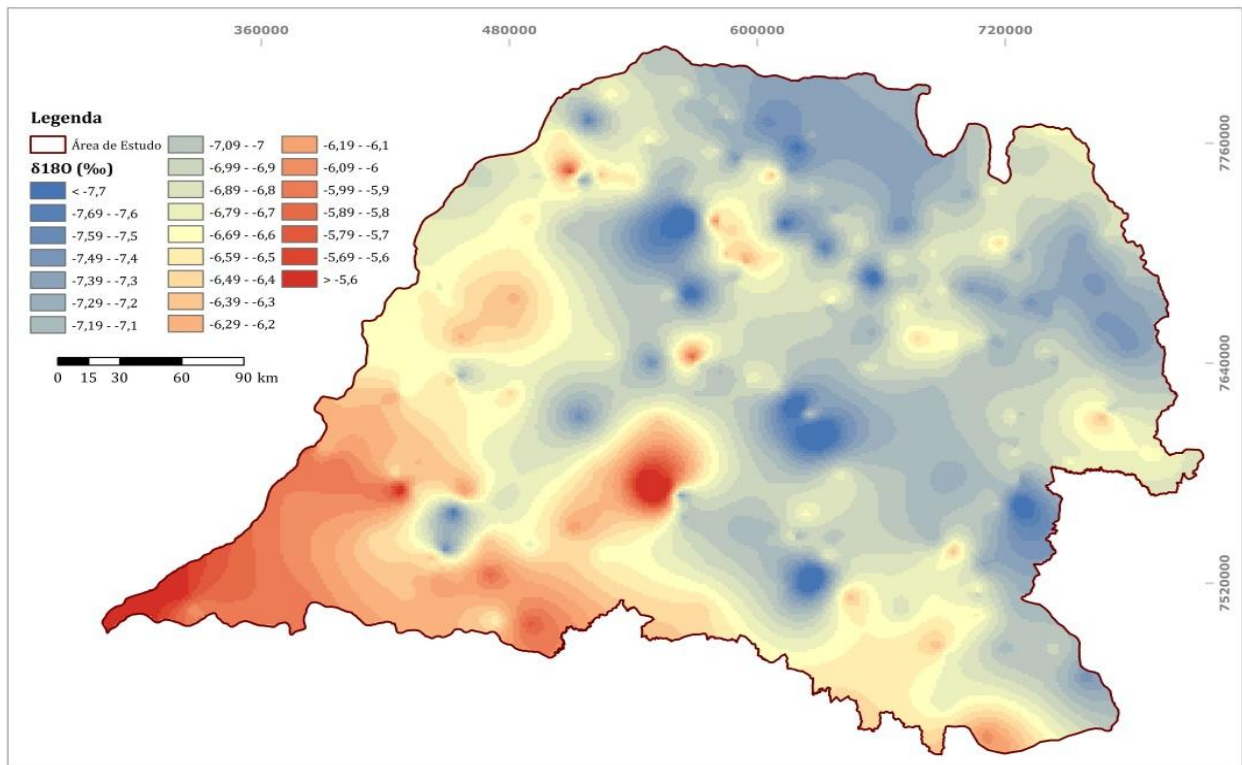


Figura 5. Mapa de distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ das águas do SAB.

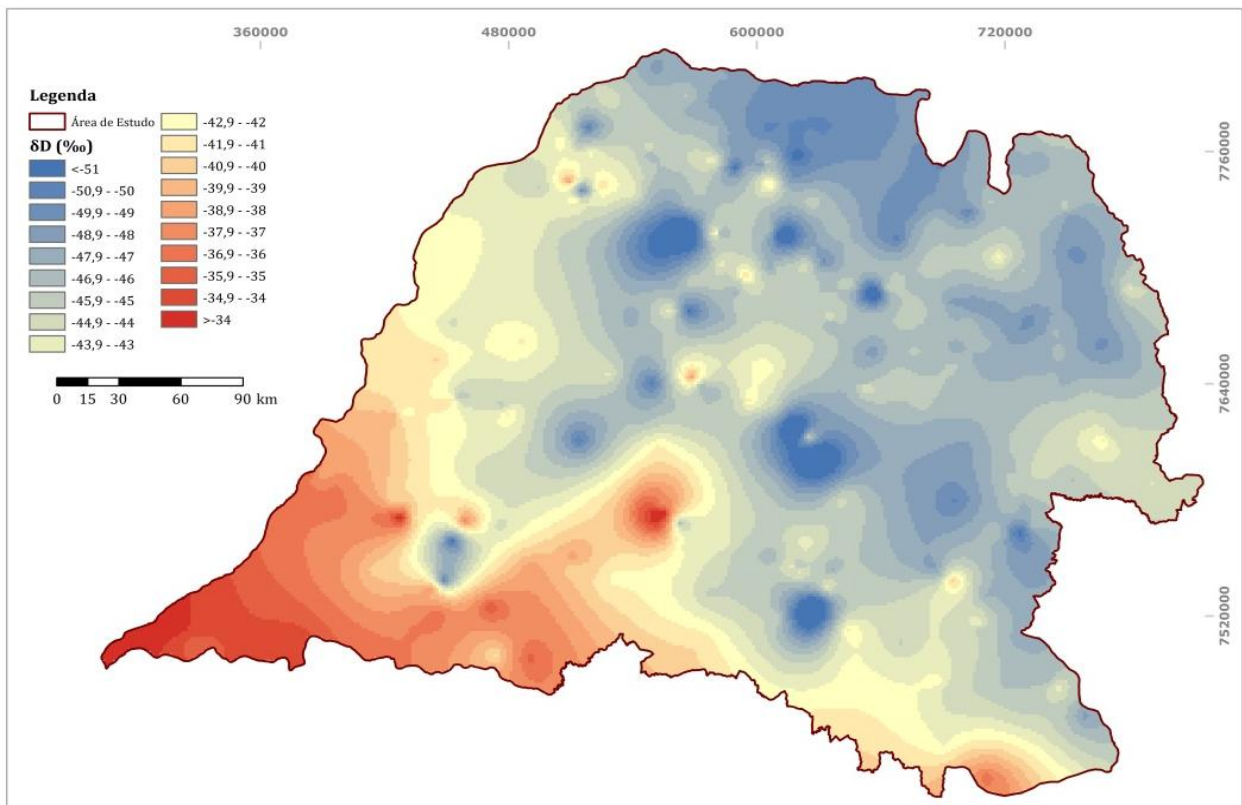


Figura 6. Mapa de distribuição de δD das águas do SAB.

Os resultados da análise estatística mostram que há uma clara diferença entre as águas do Aquífero Caiuá e as das demais unidades aquíferas do SAB. Verifica-se um

enriquecimento em ^{18}O de 0,3‰, 0,6‰ e 0,8‰ e em D de 5,1‰, 7,8‰ e 5,3‰, em relação aos aquíferos Santo Anastácio, Adamantina e Marília, respectivamente (Tabela 2).

Apesar de os valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ nesses três aquíferos serem muito próximos, -6,7‰, -7,0‰ e -6,8‰ respectivamente, o teste estatístico comparativo mostra que as águas do Aquífero Santo Anastácio são diferentes das do Aquífero Adamantina, apesar de serem esses aquíferos estrutural e estratigraficamente mais próximos que os aquíferos Santo Anastácio e Marília, que mostram semelhanças isotópicas (Tabela 4). Nessa mesma análise estatística, ainda que a razão $\delta^{18}\text{O}$ do Aquífero Santo Anastácio seja similar à dos aquíferos Marília e Adamantina (Tabela 2), a hipótese nula não foi aceita para a razão δD entre os aquíferos Adamantina e Marília.

Apesar de as médias das razões isotópicas das unidades aquíferas Santo Anastácio, Adamantina e Marília serem muito próximas, o exame dos mapas de distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ e δD (Figuras 5 e 6) indica que mesmo nas porções com prevalência de águas isotopicamente mais empobrecidas ocorrem variações de mais de 1,3‰ (-7,7‰ a -6,4‰) e 11‰ (-51‰ a -40‰), respectivamente. Essas diferenças devem estar diretamente relacionadas à composição isotópica das águas de chuva, responsáveis pela recarga nos aquíferos. Contudo, não é possível verificar se as águas subterrâneas amostradas são compatíveis com as de chuva, uma vez que

para essas últimas não existem dados isotópicos em número suficiente e que cubram todo o estado de São Paulo.

No entanto, tudo indica que as diferenças na composição isotópica estejam relacionadas às das águas de chuva, visto que, como se pode verificar no gráfico da figura 3, a faixa de variação das razões isotópicas dessas águas acomoda a faixa encontrada para as águas subterrâneas do SAB.

As diferenças na composição isotópica das águas de chuva podem estar relacionadas ao fenômeno conhecido como efeito volume (*amount effect*) (Dansgaard, 1964), que preconiza que eventos de precipitação que envolvem maiores volumes de água produzem chuvas mais empobrecidas em $\delta^{18}\text{O}$ e δD . Dessa forma, as diferenças encontradas podem refletir diferenças nos regimes de chuvas locais. Pode-se assim inferir que a região do Pontal do Paranapanema (sudoeste) experimentou eventos de chuvas menos volumosas que as áreas de recarga das demais unidades aquíferas do SAB. Como as águas possuem algumas centenas a milhares de anos, essa interpretação deve levar em conta também variações climáticas que ocorreram no período.

CONCLUSÕES

As águas do SAB têm composição isotópica condizente com as de chuva, ajustando-se bem à linha meteórica global. Os resultados mostram clara diferença entre as águas do Aquífero Caiuá e as das demais unidades aquíferas do SAB, com enriquecimento em ^{18}O de 0,3‰, 0,6‰ e 0,8‰ e em D de 5,1‰, 7,8‰ e 5,3‰, em relação aos aquíferos Santo Anastácio, Adamantina e Marília, respectivamente.

A composição isotópica das águas do Aquífero Santo Anastácio é diferente das do

Aquífero Adamantina, apesar de serem esses aquíferos estrutural e estratigraficamente mais próximos que os aquíferos Santo Anastácio e Marília, cujas médias de razão isotópica são similares.

Apesar de as médias das razões isotópicas das unidades aquíferas Santo Anastácio, Adamantina e Marília serem muito próximas, a distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ e δD mostra uma grande variação que reflete a composição isotópica das águas de chuva, responsáveis pela recarga nos aquíferos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo auxílio concedido (Projeto FAPESP nº 2011/23785-8) para realização deste estudo e ao CNPq pela bolsa PQ.

REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, M. A.; FERNANDES, L. A.; DANTAS, A. S. L.; SAKATE, M. T.; GIMENEZ, A. F.; TEIXEIRA, A. L.; BISTRICHI, C. A. E ALMEIDA, F. F. M. Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Bauru na região do Pontal do Paranapanema no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, 1981, Curitiba. **Atas...** SBG. v.1, p. 77-89.
2. BARCELOS J. H. & SUGUIO K. Correlação e extensão das unidades estratigráficas do Grupo Bauru definidas em território paulista, nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná. In: SBG, Simpósio Regional de Geologia, 6, Rio Claro, **Atas**, 1987, p. 313-321.
3. BEAR, D., PAUL, J., GUPTA, M., E O'KEEFE, A. Sensitive absorption measurements in the near- infrared region using off-axis integrated-cavity-output-spectroscopy, **Appl. Phys. B-Lasers O.**, 75, 261-265, 2002.
4. BRANDT NETO, M., YAMAMOTO, J.K., TACHIBANA, J. E MATO, L.F. Sedimentos quaternários associados ao baixo vale do Rio Tietê. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1., São Paulo. **Atas...** São Paulo: SBG/SP, 1977. p.248-266.
5. BUSCH K.W. E BUSCH M.A. "Cavity ring-down spectroscopy: An ultratrace absorption measurement technique. **ACS Symposium Series 720**, Oxford, 1997.
6. CLARK, I.D. & FRITZ, P. Environmental Isotopes in Hydrogeology, **Springer Verlag**, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
7. CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. **Science**, 1961. 133: 1702-1703.
8. DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation, **Tellus**, 16, 436-468, (1964).
9. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 6, Ribeirão Preto - SP, São Paulo:** Geoprocessadora - Tahal, 2v., 1974.
10. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 7, 8 e 9: Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba.** São Paulo: v.1 e v.2, 1976.
11. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 10 e 11: Presidente Prudente e Marília.** São Paulo: v.1 e v.2, 1979.
12. GALLO, G. E SINELLI, O. Estudo Isotópico das Águas Subterrâneas na Região de Ribeirão Preto. **Revista Brasileira de Geociências**, 10, p. 130-139, 1980.
13. GASTMANS D. **Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na Porção Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná.** 2007. Rio Claro, 2007. 193p. Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Brasil.
14. GASTMANS, D., CHANG, H.K., HUTCHEON, I. Stable isotopes (^2H , ^{18}O and ^{13}C) in groundwaters from the northwestern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil). **Hydrogeology Journal**, 18(3), 1497-1513, 2010.
15. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicao_vida/pnsb/abastecimento_de_agua/abagua43.shtm. Acessado em 10/01/2013.
16. KIMMELMANN E SILVA, A. A.; REBOUÇAS, A. C.; SANTIAGO, M. M. F.; SILVA, R. B. G. Isotopic study of the Botucatu Aquifer System in the Brazilian portion of the Parana Basin. In: Isotope hydrology investigations in Latin America, **IAEE TECDOC-502**, IAEE, Dallas, TX, p. 51-71, 1982.
17. PAULA E SILVA, F. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo.** 2003. 166p. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro.
18. PAULA E SILVA, F. E CAVAGUTI, N. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP. In: SIMPÓSIO SOBRE BACIAS CRETÁCIAS BRASILEIRAS, 2, 1992. **Atas...** p.141-144.
19. PAULA E SILVA, F. E CAVAGUTI, N. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP. **Geociências**. UNESP. p.83-99, 1994.
20. PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K. E CAETANO-CHANG, M. R. Caracterização das unidades neocretáceas da Bacia do Paraná na região de São José do Rio Preto (SP) com base na análise de perfis geofísicos e suas implicações estratigráficas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 6; SIMPÓSIO SOBRE EL CRETÁCEO DE AMERICA DEL SUR, 2, 2002, São Pedro. **Boletim...** 2002, p.345-349.
21. PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K. E CAETANO-CHANG, M.R. Perfis de referência do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. **Geociências**. Rio Claro. v.22 (n.1), p.127-139, 2003.
22. PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 1, p. 77-88, 2005.
23. PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M. R. E STRADIOTO, M. R. Sucessão Sedimentar do Grupo Bauru na Região de Pirapozinho (SP). **Geociências**. Rio Claro. v.25 (n.1), p.17-26, 2006.
24. RICOMINI, C., GIMENEZ FILHO, A., STEIN, D.P., ALMEIDA, F.F.M., PIRES NETO, A.G., DEHIRA, L.K., MELO, M.S. de, BRAGA, T.de O. E PONÇANO, W.L. Características da porção basal da Formação Caiuá no Noroeste do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3. 1981, Curitiba. **Atas...** Curitiba: SBG/SP, v. 2, 1981. p. 34-48.
25. SILVA, R.B.G. da. **Estudo Hidroquímico e isotópico do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**, 1983. 133p. Tese Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo.
26. SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J. E SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo. v.10 (n. 3): p.177-185, 1980.
27. SUGUIO, K.; FULFARO, V. J.; AMARAL, G. E GUIDORZI, L. A. Comportamentos estratigráfico e estrutural da Formação Bauru nas regiões administrativas 7 (Bauru), 8 (São José do Rio Preto) e 9 (Araçatuba) no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1, 1977, São Paulo. **Atas...** p. 231-247.

Manuscrito recebido em: 26 de Novembro de 2014

Revisado e Aceito em: 11 de Maio de 2015