

O USO DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS EM ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DE ÁGUAS MINERAIS E TERMAIS (REGIÃO DE LINDÓIA, SP)

* Sueli Yoshinaga

** Annkarin Aurelia Kimmelmann e Silva

*** Eiichi Matsui

* Pesquisadora da Seção de Hidrogeologia do Instituto Geológico-SMA, São Paulo, CxP. 8772, CEP. 04301, Brasil

** Prof^ª Dr^ª do Depto. Geologia Econômica e Geofísica Aplicada, Universidade de São Paulo, São Paulo, CxP. 20899, CEP. 05508, Brasil

*** Prof. Dr. do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz, Piracicaba, CxP. 96, CEP. 13400, Brasil.

RESUMO

Os estudos dos isótopos de hidrogênio e oxigênio-18 nas águas minerais e termais dos municípios de Águas de Lindóia e Lindóia definiram sua origem meteórica, o fenômeno de evaporação e áreas de recarga diferentes.

A média ponderada de oxigênio-18 (-5,27%), obtida por meio de uma monitoração das águas de chuva, é diferente da média dos valores das águas das fontes e poços tubulares (-7,5%), indicando áreas de recarga fora do local estudado.

A maioria das águas das fontes e poços tubulares obedece à reta meteórica mundial, porém as demais, águas de recarga direta, seguem a reta das chuvas locais.

PALAVRAS CHAVES

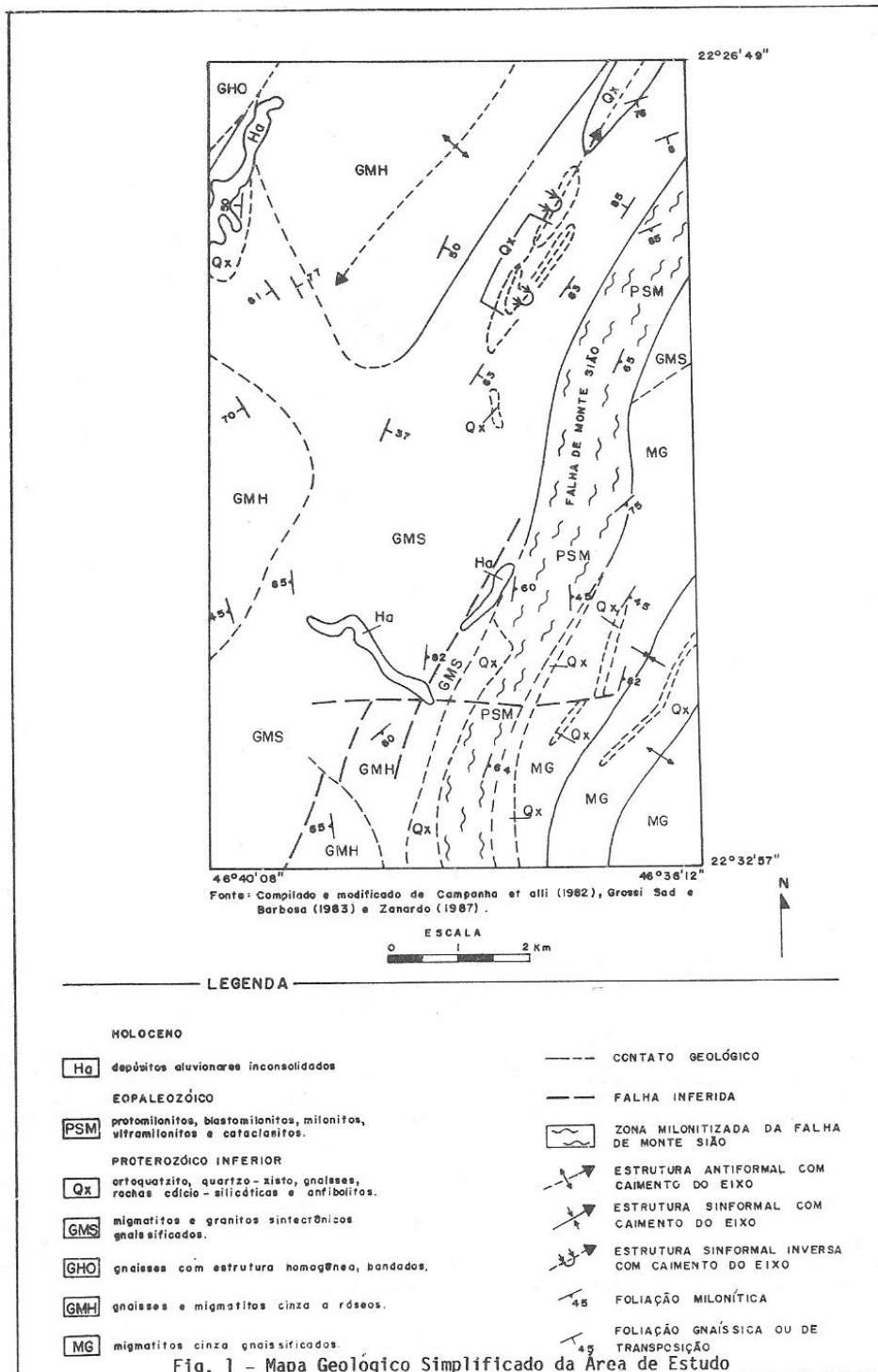
Águas Minerais, Águas de Chuva, Isótopos estáveis, Oxigênio-18, Deutério, Hidrogeoquímica, Aquífero Cristalino, Águas de Lindóia, Lindóia.

INTRODUÇÃO

A aplicação dos isótopos de hidrogênio e oxigênio-18 tem se mostrado um instrumento valioso para o maior conhecimento da origem, circulação e dinâmica das águas subterrâneas.

Neste trabalho, estes isótopos foram utilizados para o estudo da origem e dos processos de mineralização das famosas águas minerais dos municípios de Águas de Lindóia e Lindóia, situados na região nordeste do Estado de São Paulo. Estas cidades, pertencentes ao Circuito das Águas do Estado, têm no turismo e nas indústrias de engarrafamento de águas minerais suas principais atividades econômicas.

O local de estudo, situado na região pré-cambriana do Estado, possui grande complexidade estrutural, devido à sobreposição de eventos, que são indicadores de uma evolução polifásica e policíclica. Em síntese, a geologia da área é caracterizada litologicamente por gnaisses, migmatitos e lentes de quartzitos do Complexo Amparo, e por grandes estruturas como o Antiformal de Águas de Lindóia e a falha transcorrente de Monte Sião (Fig. 1).



ASPECTOS HIDROGEOLOGICOS

A produtividade dos poços tubulares e das fontes existentes relaciona-se aos fraturamentos das rochas locais, que condicionam as feições de relevo, criando vales e vertentes. A análise do fraturamento indicou altos valores de densidade e frequência de lineamentos de fratura, perto das grandes estruturas, com direções principais aproximadas de N30-50E, N40-70W, N0-20W, N0-20E e E-W. A direção N30-50E pertence aos lineamentos de maior extensão e são atribuídos ao Falhamento de Monte Sião, aos seus reflexos e ao Antiformal de Águas de Lindóia. Os lineamentos de direção N40-70W são de pequena extensão e estão situados perpendicularmente aos lineamentos N30-50E. Os lineamentos N-S são também de maior extensão, onde os de menor porte (E-W) estão situados perpendicularmente a estes primeiros.

Os valores mais frequentes de capacidade específica estão representados no intervalo de $9,0 \times 10^{-6}$ a $2,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s/m}$ (88%), com mediana de $3,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$.

As vazões das fontes apresentam valores mais frequentes situados entre $7,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (71%) e mediana de $1,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Nas fontes foram observadas tendências de maior produtividade na litologia quartzito em relação aos migmatitos, explicadas pela ocorrência de planos de foliação bem desenvolvidos e pela maior competência das rochas, responsável pela produção de alta densidade de fraturamentos extensos e abertos.

MÉTODO DE ESTUDO

O método de estudo englobou diversas atividades que visaram proporcionar um maior conhecimento do comportamento das águas de subsuperfície da área em questão, bem como dos mecanismos de circulação e de seus processos de mineralização.

Estas atividades consistiram em:

Cadastramento e pesquisa bibliográfica: todos os trabalhos referentes às águas minerais com enfoque na área de estudo foram pesquisados, assim como relatórios internos do DNPM-São Paulo, DAEE, CETESB-São Paulo e da extinta FUMEST-Paulistur. Com base nestes dados e nos trabalhos de campo, foi realizado o cadastramento de todas as ocorrências de água minerais e termais da área.

Amostragem e análise: as ocorrências de água mineral em atual regime de exploração, bem como os produtos resultantes da monitoração de 1 ano das águas de chuva, foram amostradas para análise. Os procedimentos de amostragem variaram de acordo com o tipo de análise de água a ser realizada e das exigências de cada laboratório, entretanto, todas as amostras coletadas foram preservadas na temperatura de 4°C . Para a análise de ânions e cátions, foram coletadas cerca de 50 ml e 100 ml de amostras. No caso dos isótopos de hidrogênio e oxigênio-18, coletaram-se cerca de 50 ml de água em frasco de polietileno descartável.

No momento da coleta das amostras de água, analisaram-se os parâmetros de temperatura (do ar e da água), pH e Eh, condutividade elétrica, com aparelhos portáteis de campo, e bicarbonato, carbonato e gás carbônico livre, por titulação colorimétrica e potenciométrica.

As análises químicas dos elementos maiores foram executadas no Laboratório de Geoquímica Ambiental do INPE-São José dos Campos, através da absorção atômica, e no Laboratório de Hidroquímica do CEPAS-USP, por cromatografia líquida. Os elementos analisados foram: cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, nitrato, sulfato, fluoreto, brometo e nitrito.

A determinação dos valores de oxigênio-18 e deutério das águas de chuvas e das águas minerais foi realizada no Laboratório do CENA-Piracicaba.

Monitoração: a monitoração consistiu na amostragem semanal, por um ano, das águas de chuva por um coletor instalado no Balneário FUMEST-Paulistur de Águas de Lindóia e de dois pontos selecionados: a fonte Filomena, situada no município de Águas de Lindóia e, do poço tubular profundo do Balneário FUMEST-Paulistur de Lindóia.

RESULTADOS

Caracterização Química das Águas

Águas de chuva: as águas de chuva do período de junho de 1987 a julho de 1988 apresentaram as seguintes características físico-químicas:

- condutividade elétrica (25^o) entre 3 e 51 uS/cm,
- cálcio entre 0,04 e 3,53 mg/l,
- magnésio entre 0,10 e 0,56 mg/l,
- sódio entre 0,20 e 0,48 mg/l,
- potássio entre 0,04 e 0,44 mg/l,
- cloreto entre 0,07 e 2,84 mg/l,
- nitrato entre 0,01 e 3,31 mg/l,
- sulfato entre 0,02 e 7,05 mg/l.

A grande variação das concentrações de íons é atribuída a fatores como: intensidade e duração das precipitações, época do ano, condições climáticas e topografia. A salinidade máxima das águas de chuva é observada na estação de inverno de 1987, decaindo até atingir concentrações mínimas no verão. No entanto, a variação sazonal da carga total de íons, em uma área de 1 km, indica maior aporte de sais na primavera de 87/88 que nas demais estações.

Águas das fontes e poços tubulares profundos: as águas de subsuperfície, representadas pelas águas de fontes e poços tubulares, caracterizam-se por possuir baixa condutividade elétrica (entre 9 uS/cm a 165 uS/cm), pH entre 5,00 e 7,70 e Eh, entre -13mV e 125 mV. Apresentam, ainda, valores de temperatura variando de 18^oC a 28^oC e CO₂ livre entre zero (não detectado) e 68,2 mg/l.

No geral, as águas das fontes e poços tubulares são pouco mineralizadas, apresentando STD entre 11 mg/l e 155 mg/l. As concentrações mais constantes giram em torno de 70 mg/l nas fontes e 100 mg/l na águas de poços, onde estas últimas, mais mineralizadas, são produtos de misturas de águas de infiltração mais recente e de um aquífero mais profundo.

A composição química das águas expressa as seguintes sequências de concentrações de íons principais (em meq/l): rCa > rMg ≅ rNa > rK e HCO₃ > rCl ≅ rNO₃ > rSO₄.

Por meio do Diagrama de Piper (Fig. 2), as águas se classificam como bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcio-magnesianas, características de terrenos ígneos. No entanto, as águas pouco mineralizadas das fontes Santa Clara, Levíssima I e Levíssima II qualificam-se como bicarbonatadas sódicas, devido ao domínio do potássio sobre os demais cátions. As águas da fonte Nossa Senhora das Brotas também são classificadas como bicarbonatadas sódicas, neste caso devido ao domínio do sódio sobre os demais cátions.

As águas das fontes Sertãozinho e da Pracinha qualificam-se como cloretadas sódicas, indicando contaminação das águas nestes pontos.

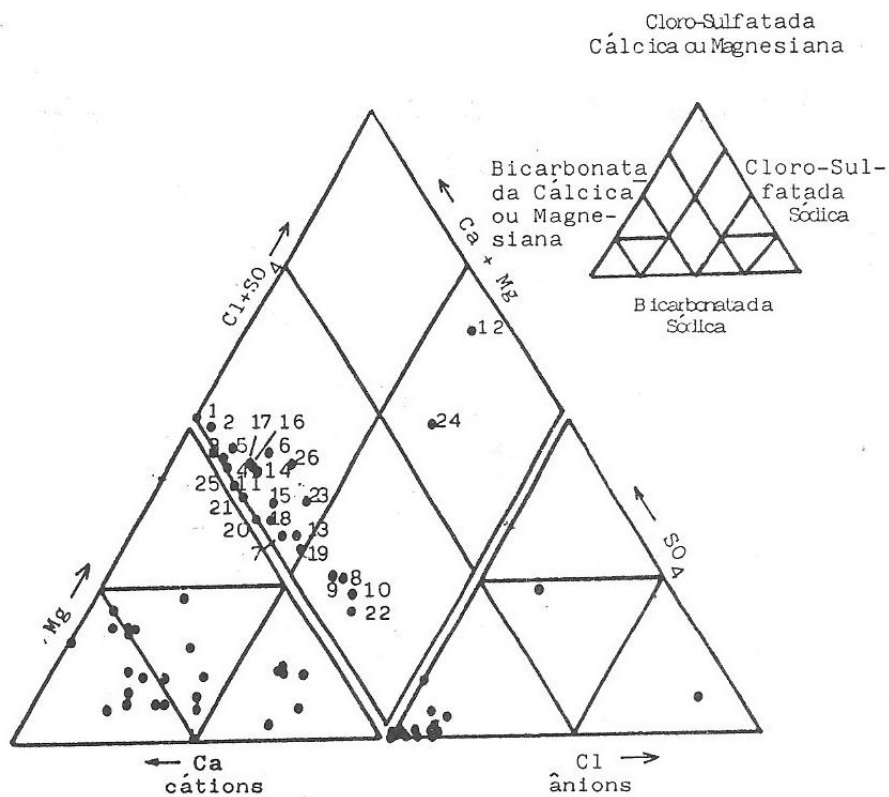
A composição química das águas das fontes e poços tubulares profundos é oriunda da hidrólise dos minerais das rochas (plagioclásios, ortoclásios, biotita, hornblenda e muscovita), e secundariamente, da troca de bases e oxidação. O fenômeno da hidrólise e da oxidação ocorreria no manto de alteração, onde a água que se infiltra ataca os minerais e se enriquece de íons. Nas fraturas, devido à grande dinâmica de circulação, o processo mais significativo é a troca de bases.

APLICAÇÃO DOS ISÓTOPOS DE HIDROGÊNIO E OXIGÊNIO-18 NAS ÁGUAS

Águas de chuva: os valores de oxigênio-18 e deutério das águas de chuva da área de estudo, apresentaram a seguinte equação de reta meteórica, no período de junho de 1987 a julho de 1988:

$$\delta^2\text{H} = 7,6 \delta^{18}\text{O} + 12,5 \text{ (Fig. 3)}$$

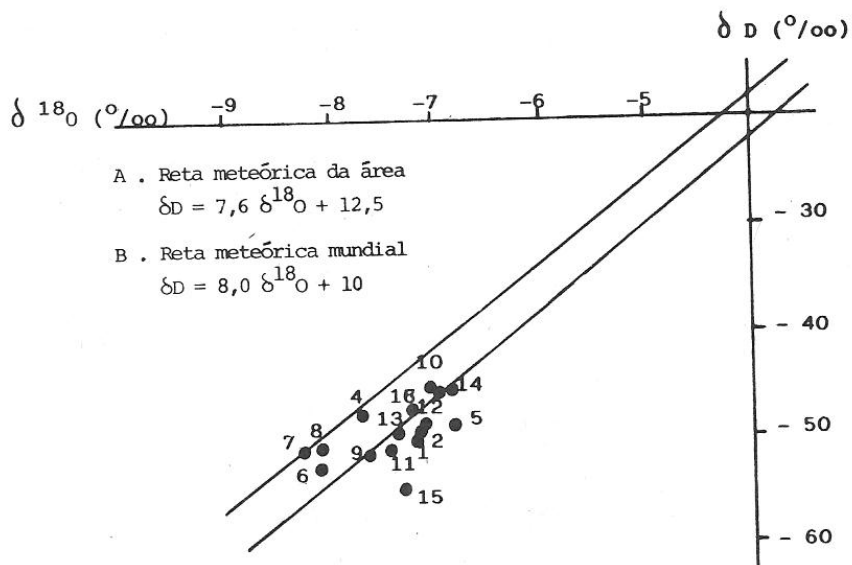
Esta reta meteórica comporta-se de modo similar à reta meteórica mundial, $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$, e é muito próxima à reta meteórica obtida para a América do Sul, cuja equação é expressa por $\delta^2\text{H} = 7,9 \delta^{18}\text{O} + 10,7$.



FONTES E POÇOS

- | | | |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| 1- São Roque | 10- Levíssima II | 19- São Francisco |
| 2- Beleza | 11- Brejal | 20- Estrada |
| 3- Madame Curie | 12- Sertãozinho | 21- BR-360 |
| 4- Glória | 13- S.A.E.E. | 22- N ^a .Sra.Brotas |
| 5- Santa Isabel | 14- São Jorge | 23- São Luiz |
| 6- Lindália | 15- Santa Bernadete | 24- Pracinha |
| 7- Prefeitura | 16- Vida I | 25- Filomena |
| 8- Santa Clara | 17- Vida II | 26- Balneário FUMEST- |
| 9- Levíssima I | 18- São Bernardo | - Lindóia |

Fig. 2 - Diagrama de Piper



FONTES e POÇOS :

- | | |
|------------------------------|--|
| 11 - São Jorge (12/87) - f | 9 - BR-360 (07/88) - f |
| 2 - Vida I (12/87) - p | 10 - Estrada (10/88) - f |
| 3 - Vida II (12/87) - p | 11 - Filomena (12/87) - f |
| 4 - Lindália (08/88) - p | 12 - Sertãozinho (10/88) - f |
| 5 - Prefeitura (08/88) - f | 13 - Hospital (10/88) - f |
| 6 - Levíssima I (08/88) - f | 14 - Pracinha (10/88) - f |
| 7 - Santa Clara (08/88) - f | 15 - São Luiz (10/88) - f |
| 8 - Levíssima II (08/88) - f | 16 - Balneário FUMEST - Lindóia
(10/88) - p |

Fig. 3 - Relação dos valores de $\delta^{18}O$ e δ^2H das águas subterrâneas e o traçado da reta meteórica da área de estudo e da reta meteórica mundial

A média ponderada dos valores de $\delta^{18}O$ das precipitações, determinada neste período, foi de -5,27% para um índice pluviométrico de 1810,7 mm.

Yurtsever & Gat (1981) obtiveram, para a rede mundial de estações de observações do IAEA, valores mais positivos de $\delta^{18}O$: -4,52% para Porto Alegre, com índice pluviométrico de 1200 mm, e -4,79% para o Rio de Janeiro, com índice pluviométrico de 1241 mm.

A maior negatividade da média ponderada da área em questão pode ser explicada pelo efeito de altitude e a grande distância do oceano.

Águas das fontes e poços tubulares: as concentrações de oxigênio-18 destas águas, com média de -7,5%, não refletem o valor médio ponderado das chuvas no período (-5,27%), indicando áreas de recarga fora do local estudado.

A distribuição dos valores dos isótopos de hidrogênio e oxigênio-18, no gráfico da Fig. 3, demonstra que a maioria das águas obedece à reta meteórica mundial. No entanto, os valores isotópicos das águas das fontes Santa Clara, Levíssima I e Levíssima II e do poço Lindália comportam-se de acordo com a reta meteórica da área de estudo, indicando águas provenientes de recarga direta. As demais podem sofrer evaporação antes de atingir a água subterrânea, tornando-se mais negativos e seguindo a reta meteórica mundial.

O alto coeficiente de correlação (0,52) entre as concentrações de sódio e oxigênio-18 nestas águas corrobora tal tendência. Os valores deste isótopo tornam-se menos negativos a medida que o teor de sódio aumenta. Em períodos de seca, a solução percolante se enriquece de sais, provenientes dos processos de alteração, e de isótopos de oxigênio-18. Na estação chuvosa, as novas águas de infiltração se concentram de sais que foram precipitados anteriormente e de elementos oriundos dos processos de alteração que se iniciaram. Na estação seca seguinte, o fenômeno de evaporação se repete. O sódio, proveniente da alteração de minerais como os feldspatos sódicos, é um bom indicador do fenômeno da evaporação, devido à maior solubilidade em relação aos demais elementos catiônicos. Assim, à medida que a solução aquosa se concentra, elementos como cálcio, magnésio e potássio se precipitam, enquanto que o sódio permanece solubilizado, acompanhando a trajetória descendente da água até atingir o aquífero.

A representação dos valores de oxigênio-18 no mapa topográfico (Fig. 4) demonstra tendências que podem significar áreas de recarga diferentes. A superfície piezométrica, coerente com a topografia e a geologia do terreno, e o valor de oxigênio-18 das águas, supondo a ação do efeito de altitude nestes locais, foram os critérios de diferenciação de áreas de recarga dos pontos estudados. Assim, na região nordeste, as águas das fontes Santa Clara (A), Levíssima I (A), Levíssima II (A), São Roque (B), Filomena (B), Beleza (B), Madame Curie (B) e Glória (B) originam-se de uma mesma área de recarga. Os valores muito negativos destas águas (em torno de -8,0%) indicam que o local de recarga se encontra distante das fontes, podendo se localizar na Serra dos Coutos, de elevadas altitudes, situada ao norte da área de estudo. A área de recarga das águas das fontes Brejal (C), Prefeitura (C) e do poço Lindália (C) (em torno de -7,3%) pode estar mais próxima, talvez nas regiões mais altas, ao norte de suas localizações, o mesmo ocorrendo com o poço Santa Isabel (C).

Os valores mais positivos de oxigênio-18, na parte sul do local de estudo, indicam áreas de recarga mais próximas. As águas das fontes da Pracinha (D), Santa Bernadete (D) e do poço Vida II (D) (média de -6,9%) provêm das áreas mais elevadas a oeste, enquanto que as águas das fontes da Estrada (E) e São Luís (E) e dos poços tubulares do Balneário FUMEST-Lindóia (E) e Vida I (E) (média de -7,2%) originam-se de regiões mais elevadas situadas a leste.

Estas últimas podem sofrer influência das águas subterrâneas que circulariam no Falhamento de Monte Sião. A área de recarga das fontes São Jorge (F), São Francisco (F), São Bernardo (F) e Nossa Senhora das Brotas (F) (média de -7,3%) situam-se na Serra dos Mosquitos, a sudoeste da área. A fonte BR-360 (G) tem sua área de recarga situada ao sul.

A distribuição em mapas e a similaridade dos valores de oxigênio-18 em diferentes datas de coleta de amostra (Fig. 4), não indicam influência direta da sazonalidade, sugerindo que estas águas pertençam a um aquífero de grande volume.

A monitoração dos valores de oxigênio-18 das águas da fonte Filomena e do poço

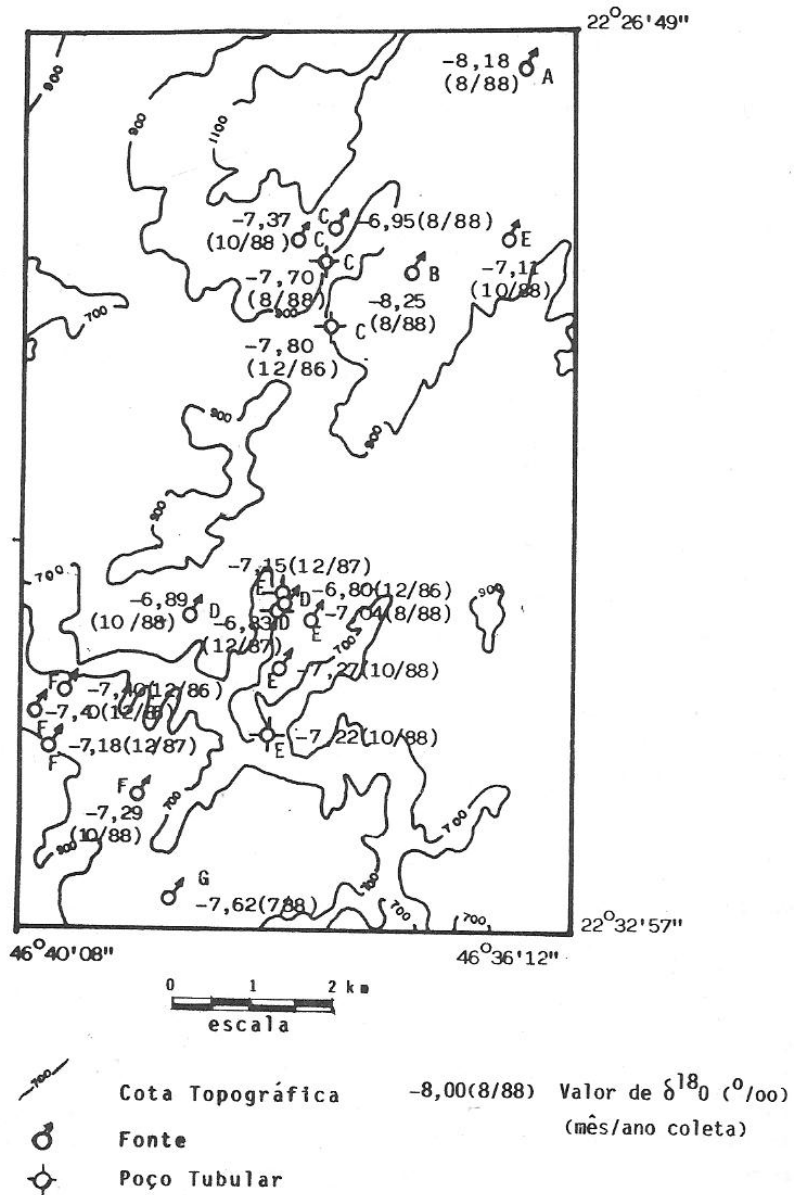


Fig. 4 - Distribuição das concentrações de oxigênio-18 na área de estudo.

do Balneário FUMEST-Paulistur-Lindóia, apresentou o mesmo comportamento no decorrer do período. Os valores são mais positivos no início da monitoração, tornando-se mais negativos no final. A variação deste isótopo nos pontos monitorados, parece estar relacionado com os períodos de pluviosidade, apresentando valores mais negativos nos intervalos de maior índice pluviométrico.

CONCLUSÕES

A aplicação dos isótopos de hidrogênio e oxigênio-18 nas águas das fontes e poços tubulares definiu sua origem meteórica, assim como reforçou a hipótese da evaporação na maioria dos pontos amostrados.

A média das concentrações de oxigênio-18 (-7,5 ‰) das águas estudadas não reflete o valor médio ponderado das chuvas, indicando áreas de recarga fora do local de estudo. As variações dos valores deste isótopo em área restrita indicaram regiões de recarga diferentes, situadas geralmente nos divisores de água das bacias formadas pelos rios, ribeirões e córregos locais.

As águas das fontes e poços tubulares profundos são pouco mineralizadas e classificam-se como bicarbonatadas mistas ou cálcicas, características de rochas de terrenos ígneos.

Em geral, as águas oriundas das nascentes são misturas de águas mais superficiais do aquífero de águas mais profundas que ali emergem. No entanto, foram identificadas algumas provenientes das águas de recarga direta. Os poços, por sua vez, apresentam águas de circulação mais profunda.

A monitoração dos valores de oxigênio-18 na fonte Filomena e Balneário FUMEST-Paulistur-Lindóia indicam influência sazonal nestes pontos, através de pequenas variações, nos teores destes isótopos.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

YOSHINAGA, S. 1990. Estudos Hidrogeológicos, Hidrogeoquímicos e Isotópicos das Águas Minerais e Termas de Águas de Lindóia e Lindóia. SP, São Paulo. (Dissertação de Mestrado). USP. 124p.

YURTSEVER, Y. & GAT, J.R. 1981. Atmospheric waters. In: GAT, J.R. & GONFIANTINI, R. 1 ed. Stable isotope hydrology - deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Technical reports series n. 210, Viena, IAEA.