

## UTILIZAÇÃO DE ISÓTOPOS AMBIENTAIS NA PESQUISA DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS NO "KARST" DA REGIÃO DO JAÍBA, NORTE DE MINAS GERAIS\*

Antônio Plata Bedmar\*\*  
Adelbani Braz da Silva\*\*\*

\* Trabalho realizado com auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq  
\*\* Ministério de Obras Públicas — Espanha  
\*\*\* Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais — CETEC

### ABSTRACT

The isotopic study of ground surface water from a karstic zone on the north of Minas Gerais State (Januária - Manga) provided some clues to identify aquifer characters. That local rainfall have originated all the ground water was showed by the analysis of deuterium and oxygen-18. The isotopic concentration was found irregularly distributed, which is an indicative of site recharge, flow, and ill-dispersion of waters. The tritium ratified observations obtained by other isotopes and have provided ground to conclude that ground water was recently accumulated. However, none correlation was determined among the isotopes and other environment data, except for a decreasing in tritium concentration according to the depth of the fractured zones.

### INTRODUÇÃO

Os isótopos ambientais que estão envolvidos no ciclo hidrológico vem sendo utilizados nos últimos anos como traçadores naturais nos estudos dos recursos hídricos subterrâneos. Os principais isótopos utilizados são o deutério, oxigênio-18 e o trítio. Os dois primeiros são estáveis e são encontrados em todas as águas em proporção que varia de acordo com suas origens. O trítio é radioativo e produzido na atmosfera pela radiação cósmica ou, mais recentemente, pelas explosões termo-nucleares (bomba de hidrogênio). A sua concentração nas águas varia com a idade das mesmas ou por contaminação das explosões termo-nucleares.

Na área do projeto "Pesquisa e Avaliação de Recursos Hídricos Subterrâneos em Karst por Sensores Remotos" (Silva, 1978), Figura 1, foi realizada uma amostragem de águas subterrâneas em poços tubulares e águas superficiais em rios e lagoas para análise de isótopos ambientais, com o objetivo de definir as principais características do aquífero cárstico. Os resultados das análises de deutério, oxigênio-18 e trítio também foram comparados com outros parâmetros, tais como salinidade, tipo de fluxo nos poços e profundidade das fendas.

### ISÓTOPOS ESTÁVEIS DA ÁGUA

Para a interpretação das análises isotópicas das águas subterrâneas é necessário o conhecimento da composição isotópica das precipitações locais. No entanto, devido às numerosas variáveis que determinam esta última composição e ao fato das águas subterrâneas serem representativas das precipitações médias no período útil de recarga, teria que se dispor de um número elevado de dados referidos a muitos anos e as composições isotópicas médias mensais ponderadas, isto é, levando-se em conta a precipitação média.

Devido à falta total de dados isotópicos para as precipitações locais na área do projeto, foram utilizados os dados existentes nas estações do Rio de Janeiro e Brasília (aeroporto), incluídos na rede mundial de pontos controlados pela Agência Internacional de Energia Atômica

(AIEA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para análises isotópicas das precipitações. As condições meteorológicas da área de estudo são similares às existentes na zona de Brasília e o grau de continentalidade é semelhante. Uma comparação das composições isotópicas das precipitações nas duas estações indicadas, pode dar uma idéia da ordem de grandeza das variações que se podem esperar a área do estudo e Brasília.

Com os dados das composições isotópicas médias mensais publicadas (valores ponderados), foram calculadas as correspondentes às precipitações médias anuais ponderadas por meio da seguinte expressão:

$$\delta_a = \sum \frac{P_m}{P_a} \cdot \delta_m \quad (1)$$

sendo:  $\delta_a$  e  $\delta_m$  os devios médios anual e mensal, respectivamente.

$P_a$  e  $P_m$  as precipitações anual e mensal, respectivamente.

Como o período útil para a recarga do aquífero compreende os meses de outubro a abril, foram também calculados os valores de  $\delta$  referentes a este período, isto é, considerando-se os valores de  $\delta_m$  e  $P_m$  para tal período. Os resultados obtidos encontram-se na figura 2. Os pontos correspondem ao período de 1962 a 1975, embora faltem alguns anos, já que os dados mensais publicados são incompletos. Pode-se observar que a maior parte dos pontos ajusta-se à reta de equação  $\delta_D = 8 \delta_{18} + 10$ , como era de esperar. Os valores médios para o período de 1962 a 1975 são os seguintes:

#### Rio de Janeiro

Ano Completo: (‰)  $\delta_D = -25,5$  ;  $\delta_{18} = -4,5$

Período outubro-abril: (‰)  $\delta_D = -28,6$  ;  $\delta_{18} = -4,8$

#### Brasília

Ano Completo: (‰)  $\delta_D = -30,7$  ;  $\delta_{18} = -5,1$

$\delta_D = -32,2$  ;  $\delta_{18} = -5,3$

Observa-se que as precipitações de Brasília são isotopicamente mais leves (mais negativos) do que as do Rio de Janeiro, o que era de se esperar devido ao maior grau de continentalidade da primeira estação. As diferenças de composição média para o ano completo e para o período outubro-abril justificam-se pela maior pluviosidade. Pode-se supor que as precipitações da área de estudo devem ter uma composição isotópica média compreendida entre os valores para o Rio de Janeiro e Brasília, se bem que a área se encontra mais próxima desta última estação.

Com os dados publicados pelos organismos AIEA e OMM para Brasília, foram elaboradas as curvas da Figura 3, que representam a distribuição da precipitação média ao longo do ano e da composição isotópica ( $\delta_D$ ) para esta mesma precipitação. O período de tempo incluído compreende de desde 1966 até 1975, isto é, 10 anos. Os valores médios de  $\delta_D$  foram calculados através da equação  $\delta_D = 8 \delta_{18} + 10$  a partir das médias mensais dos valores de  $\delta_{18}$ . Desta forma é possível melhorar a precisão estatística. Os valores correspondentes ao mês de janeiro afastam-se muito das curvas devido à influência negativa de dois dados, muito diferentes dos outros.

Observa-se que a maior parte das precipitações ocorre entre outubro e abril. Por outro lado, observa-se um bom paralelismo entre a curva da precipitação média e a curva correspondente ao valor de  $\delta_D$ . À medida que aumenta a pluviosidade, as precipitações são isotopicamente mais leves. Em zonas de clima temperado, este fenômeno é explicado pelas diferenças de temperatura ambiente entre inverno (época de maior pluviosidade) e verão. Mas, em Brasília, como as diferenças de temperatura são pequenas, o fenômeno tem que ser explicado como consequência da evaporação parcial das gotas de chuva durante a sua queda desde a nuvem até o solo. Esta evaporação parcial leva consigo um fracionamento isotópico e a gota que chega na superfície do solo é tanto mais rica em isótopos estáveis, quanto maior for a evaporação sofrida. A evaporação aumenta quando diminui a intensidade da chuva. Por isto, as precipitações dos meses

mais secos têm valores de  $\delta_D$  mais positivos. Para os meses de junho, julho e agosto não se tem dados, porque a precipitação registrada foi quase sempre zero. Para setembro dispõe-se de 7 dados, 6 dos quais correspondem a valores positivos de  $\delta_D$ .

Com as curvas da Figura 3 é possível calcular o valor médio provável de  $\delta_D$ , nas águas subterrâneas provenientes de infiltração de precipitações em diferentes épocas do ano. Para se obter valores ponderados é preciso levar em conta as diferentes pluviosidades médias de cada mês, utilizando um somatório semelhante ao indicado em (1). Os cálculos realizados dão os seguintes resultados:

<u>Período de Recarga</u>	<u>Valor de <math>\delta_D</math> (‰)</u>
dezembro-janeiro	- 42,2
novembro-fevereiro	- 38,5
outubro-março	- 34,7
outubro-abril	- 32,8
setembro-abril	- 32,5

O valor para o período outubro-abril é muito parecido ao calculado com os dados da Figura 2 (- 32,3‰).

No aquífero cárstico estudado era de se esperar valores de  $\delta_D$  desta mesma ordem de grandeza.

#### RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos nas análises isotópicas das amostras de águas coletadas são indicados no Quadro I. Todas as análises foram efetuadas pelo Centro de Energia Nuclear na Agricultura de Piracicaba (São Paulo). Os erros prováveis das análises são de  $\pm 2$ ‰ para  $\delta_D$  e  $\pm 0,2$ ‰ para  $\delta_{18}$ .

Em linhas gerais, os resultados concordam satisfatoriamente com os valores previstos no item anterior. Dos 65 dados existentes, 46 encontram-se no intervalo compreendido entre  $-32$ ‰ e  $-42$ ‰ para  $\delta_D$ . Os valores médios para os 65 poços são  $\delta_D = -38,7$ ‰ e  $\delta_{18} = -5,84$ ‰ que, segundo os dados do item anterior, corresponderiam a um período médio de recarga compreendido entre novembro e fevereiro. No entanto, este fato não pode ser considerado como resultado definitivo, porque as composições isotópicas das precipitações locais podem ser algo diferentes das de Brasília e também porque, em alguns casos, a água coletada no poço pode não ser representativa das precipitações médias da zona.

Além destas 65 amostras coletadas em poços, foram efetuadas análises isotópicas de outras 11 amostras de águas superficiais que incluem diversas lagoas e os rios Verde Grande e Serraria. Os resultados obtidos mostram-se no Quadro II. Tratam-se de águas que experimentaram evaporação, em maior ou menor extensão, e por esta razão os desvios de Deutério e Oxigênio-18 são mais positivos do que os das águas subterrâneas. A interpretação destes resultados, assim como dos correspondentes aos poços, é feita nos itens seguintes.

#### INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

##### Relação entre Deutério e Oxigênio-18

Na figura 4 encontra-se o gráfico onde são relacionados os valores de  $\delta_D$  e  $\delta_{18}$ . Neste gráfico observa-se que a maior parte dos pontos de águas subterrâneas ajustam-se satisfatoriamente à reta de equação  $\delta_D = 8 \delta_{18} + 10$ , que, como se sabe, corresponde às precipitações da maioria das regiões do globo. Por outro lado, as águas superficiais ajustam-se melhor a uma reta com declive de 5, como consequência da evaporação. A dispersão dos pontos pode ser explicada uma vez que, antes do processo de evaporação, a composição isotópica original das águas não é a mesma. Este declive de 5 é igual ao obtido para a evaporação no Nordeste Brasileiro.

Uma conclusão que se pode tirar destes resultados é que as águas subterrâneas do sistema cárstico procedem de precipitações locais

infiltradas diretamente no aquífero, isto é, com evaporação prévia pequena antes da infiltração. Portanto, o tempo médio de permanência das águas em superfície é pequeno. Se isto não ocorresse, os pontos das águas subterrâneas ficariam à direita e bem afastados da reta da equação  $\delta_D = 8 \delta_{18} + 10$ . Isto acontece só em casos isolados, como são os poços MA-98, MA-625 e MA-43. Além do erro próprio de análise isotópica, a dispersão dos pontos justifica-se, em parte, porque um pouco de evaporação sempre ocorre antes da infiltração da água e, também, porque as amostras coletadas são uma mistura de precipitações diferentes infiltradas durante um número elevado de anos. Tudo parece indicar, que a permeabilidade das camadas superficiais do solo é relativamente elevada e a água não realiza longos percursos pela superfície antes de sua infiltração.

Quando a precipitação é pouco intensa, a água evapora e não chega ao nível piezométrico mas se é intensa, a infiltração ocorre rapidamente. Os termos médios devem ser escassos.

#### Distribuição das Concentrações Isotópicas

Em linhas gerais, observa-se uma distribuição de concentrações isotópicas completamente irregular na área, a qual parece indicar que cada poço é representativo de um pequeno entorno do aquífero, com condições de recarga características e diferentes das correspondentes a outras áreas próximas. Em outras palavras, a mistura da água no aquífero se produz com muita dificuldade, o que por outro lado é normal em aquíferos de rochas fendilhadas.

Dentro da zona estudada, existem duas áreas onde a densidade de poços perfurados é maior do que no resto. Uma destas áreas encontra-se situada no triângulo formado pela Colônia da Jaíba, povoado de Serra e Serra do Sabonetal e a outra na região de Lagedinho e Lagedão. Observa-se que as águas destas duas áreas têm maiores concentrações de isótopos pesados (valores menos negativos). Os valores médios para tais áreas são:  $\delta_D = -36,30\text{‰}$  e  $\delta_{18} = -5,58\text{‰}$  e para as restantes são  $\delta_D = -41,10\text{‰}$  e  $\delta_D = -6,04\text{‰}$ . É difícil explicar esta diferença de composição isotópica média, baseados em razões climatológicas ou nas características de fendilhamento do aquífero. Uma possível explicação desta diferença pode-se encontrar no regime de exploração do aquífero. Nas duas áreas de maior densidade de poços, os níveis piezométricos estão mais baixos em consequência da extração de água. Nestas condições, a recarga do aquífero é mais favorecida nestas áreas, que nas outras onde não existe extração. Por outro lado, a composição isotópica média da água no aquífero depende da amplitude do período de recarga. Quando este período aumenta as águas têm um conteúdo maior de isótopos pesados. Portanto, pode-se pensar que como consequência da extração de água nos poços, o período de recarga é maior e por isto os valores de  $\delta$  são menos negativos. Como foi visto anteriormente, a composição isotópica média das duas áreas com maior exploração do aquífero corresponderia a um período de recarga aproximado de novembro a março e para o resto da área seria de dezembro a fevereiro. Logicamente, estas considerações têm só um valor qualitativo no que se refere à explicação do fenômeno observado.

Além desta informação, as concentrações de isótopos estáveis, juntas com a fornecida pelo trítio, a qual será referida adiante, podem servir para identificar a relação existente entre poços próximos. Por exemplo, os poços MA-151 e MA-400 têm uma recarga diferente, apesar de se encontrarem muito próximos um do outro. Os poços MA-99, MA-427 e possivelmente MA-84 têm a mesma água, etc. Por outro lado, era de se esperar que alguns dos poços próximos às Serras Azul e Sabonetal tivessem águas muito leves isotopicamente, como consequência da recarga em cotas elevadas (efeito de altitude). Isto não se observa de forma clara, o que reforça a afirmação de que as águas coletadas nos poços correspondem à recarga local. Os longos deslocamentos da água devem realizar-se em canais de dissolução bem localizados.

#### Relação com outros Parâmetros

Com os dados disponíveis, tentou-se estabelecer uma correlação entre a concentração isotópica da água e outros parâmetros, tais como

salinidade, tipo de fluxo encontrado no poço e concentração de trítio. Só esta última deu um resultado positivo como será visto adiante.

A não existência de correlação entre a composição isotópica e a salinidade indida que o fenômeno de evaporação em superfície não contribui de forma sensível na salinização da água. Isto concorda com o exposto anteriormente, quando ficou demonstrada a pouca importância da evaporação prévia. A maior parte da salinização da água acontece após a sua infiltração.

#### Composição Isotópica do Rio Verde Grande

As amostras de nº 1, até 4 do Quadro II correspondem a águas coletadas no rio Verde Grande, nos pontos indicados no mapa da Figura 1. As três primeiras amostras têm a mesma composição isotópica, com os valores médios  $\delta_D = -33,3^{0/00}$  e  $\delta_{18} = -4,7^{0/00}$ . Estes valores correspondem a concentrações de isótopos pesados um pouco maiores que as existentes no aquífero. A diferença pode-se justificar pela evaporação da água durante o seu percurso ao longo do rio.

Por outro lado, deve-se ressaltar que a concentração de isótopos estáveis é constante ao longo do trecho compreendido entre colônia da Jaíba e Gado Bravo. Devido à ausência de novos aportes de água, esta seria cada vez mais pesada isotopicamente devido à evaporação. De acordo com as características do rio, com o comprimento do trecho indicado (aproximadamente 120 km) e com a taxa de evaporação local, poderia-se esperar um aumento de concentração de deutério compreendido entre 4 e 8<sup>0/00</sup>. A única explicação para não existência deste incremento é que, no trecho indicado, se produz a descarga no rio de um volume de água do aquífero com valores  $\delta$  mais negativos, o que compensa o mencionado incremento. Se for aceito um valor médio de  $-6^{0/00}$  para este incremento e um valor de  $-41,1^{0/00}$  para o desvio  $\delta_D$  da água do aquífero, obtém-se uma vazão de descarga do aquífero no rio, igual a 77<sup>0/00</sup> da vazão deste em colônia da Jaíba.

No trecho compreendido entre Gado Bravo e a desembocadura do rio, as concentrações isotópicas aumentam até  $\delta_D = 27^{0/00}$  e  $\delta_{18} = -3,4^{0/00}$ . Este resultado poderia indicar que a descarga do aquífero no rio é pequena ou inexistente, porque o aumento de concentração pode ser justificado pela evaporação. No entanto, não é possível obter conclusão alguma sobre este trecho, já que no mesmo, o rio Verde Grande recebe o rio Verde Pequeno e não se dispõem de dados sobre a vazão e composição isotópica deste último. Possivelmente, o rio Verde Pequeno aporta água com elevada concentração de isótopos estáveis, a qual, junto a com evaporação, justificam o aumento de concentração, mesmo existindo uma certa descarga do aquífero. Como será visto adiante, o trítio fornece mais informações sobre a descarga de água do aquífero ao rio.

#### TRÍTIIO

O trítio (T) é um isótopo radioativo de hidrogênio, com número de massa 3 (<sup>3</sup>H). Desintegra-se por emissão de partículas beta, segundo uma vida média de 12,3 anos.

A presença de trítio nas precipitações é decorrente de:

- a) Emissão direta do sol.
- b) Produção na alta atmosfera através de reações nucleares de radiações de elevada energia (radiação cósmica) com os gases existentes.
- c) Explosões termonucleares (bomba de hidrogênio) efetivadas na atmosfera a partir de 1952.

As duas primeiras fontes de produção de trítio (trítio cosmogênico) tem atuado permanentemente, produzindo concentrações nas precipitações compreendidas entre 2 e 10 unidades de trítio (U.T.) A unidade de trítio corresponde a uma relação em número de átomos presentes, T/H = 10<sup>-18</sup>. Assim 1 U.T. equivale a 3,2 x 10<sup>-3</sup> microcuries por metro cúbico de água.

Por outro lado, devido à grande quantidade de trítio liberado na atmosfera pelas explosões termonucleares, a concentração deste isótopo nas precipitações chegou a atingir valores até mil vezes maiores que os existentes anteriormente aos ensaios nucleares. O trítio liberado na atmosfera dá lugar à formação de moléculas de água do tipo THO, sendo en

tão, incorporado ao ciclo hidrológico.

Quando uma massa de água fica isolada no subsolo, após a infiltração, a sua concentração de trítio diminui de acordo com a vida média deste material radioativo. Devido à desintegração natural do trítio, as concentrações de águas infiltradas anteriormente a 1952 não são detectáveis na atualidade. Portanto, o fato de se encontrar trítio numa amostra de água subterrânea indica a existência de água procedente de precipitações posteriores a este ano.

#### CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIO NAS PRECIPITAÇÕES DA ÁREA EM ESTUDO

Não existem dados das concentrações de trítio nas precipitações da área do estudo. Contudo, estas concentrações podem ser avaliadas com suficiente aproximação a partir dos dados conhecidos de áreas próximas e da informação que se tem sobre a distribuição de trítio na escala mundial.

As estações mais próximas incluídas na rede controlada pelos organismos AIEA e OMM encontram-se em Brasília (aeroporto) e Rio de Janeiro, as mesmas que controlam os isótopos estáveis da água. Os dados disponíveis correspondem às concentrações médias ponderadas mensais para o período 1965-1975. Com tais valores foram calculadas as concentrações médias anuais e as concentrações médias do possível período útil de recarga (de outubro até abril). Os resultados encontram-se no Quadro III para o período indicado. Observa-se que não existe uma diferença sistemática entre as concentrações para o ano inteiro e para o período outubro-abril. Comparando as concentrações, de Brasília e do Rio de Janeiro, observa-se que as desta última estação são aproximadamente 20% mais baixas. Isto era de se esperar devido à diferença no grau de continentalidade das duas estações.

Por outro lado, sabe-se que as concentrações relativas de trítio nas precipitações dos diferentes pontos do globo conservam valores razoavelmente constantes. Isto se deve à distribuição das concentrações médias anuais, determinada basicamente pela distribuição no tempo das próprias explosões termonucleares, que é a mesma para todo o globo. Por isto, é possível estimar as concentrações médias anuais para os períodos sem dados. Geralmente, segue-se para esta estimativa o modelo de distribuição obtido para Ottawa (Canadá), porque é, possivelmente, conhecido com maior exatidão. Por este procedimento foram determinadas as concentrações médias anuais para o período de 1953-1964, do qual não existem dados. Os resultados são os indicados no Quadro III. Os valores para os anos de 1976 e 1977 foram determinados por extrapolação gráfica dos correspondentes aos anos anteriores. Sabe-se pela distribuição mundial das concentrações de trítio, que existe um efeito de continentalidade, segundo o qual as concentrações médias aumentam quando se passa do litoral para o interior dos continentes. Este efeito não está bem estabelecido quantitativamente na América do Sul. Por esta razão as concentrações médias de trítio para a área de estudo no período outubro-abril foram calculadas, de forma aproximada, pela expressão  $C = (3C_B + C_R)/4$ , sendo  $C_B$  e  $C_R$  as concentrações correspondentes em Brasília e Rio de Janeiro, respectivamente. Os valores encontram-se na última coluna do Quadro III e serão utilizados para determinar o tempo de renovação da água no aquífero.

#### RESULTADOS OBTIDOS

As concentrações de trítio obtidas nas amostras de águas coletadas nos poços em alguns pontos de fluxos superficiais (rio Verde Grande) figuram no Quadro IV. Todas as análises foram efetuadas pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN-NUCLEBRÁS de Belo Horizonte-MG. Os erros indicados correspondem ao desvio  $2\sigma$ , sendo  $\sigma$  o desvio típico ou "standard".

O valor de trítio obtido para o poço MA-83 (83 U.T.), parece muito elevado, sendo difícil justificá-lo através do mecanismo de recarga do aquífero. Possivelmente, foi cometido erro na análise. Também está elevada a concentração de trítio obtida para o poço MA-420 (20,8 U.T.), mas neste caso não parece claro que houve algum erro na análise. Nos casos das amostras dos poços IT-501 e IT-512, foram fornecidos para cada poço dois resultados muito diferentes, os quais são indicados no Qua

dro IV. Para a interpretação foram utilizados só os dois valores mais elevados, que parecem estar mais de acordo com o conjunto de dados.

Em linhas gerais, os resultados indicam que as águas subterrâneas da área são do período termonuclear, isto é, são águas provenientes da infiltração de precipitações posteriores ao ano de 1952. Este fato, confirma que o sistema tem uma resposta rápida às precipitações e que o tempo de renovação da água não pode ser muito grande.

#### INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A localização dos pontos, cujas concentrações de trítio constam no Quadro IV encontra-se no mapa da Figura 1. Observa-se uma distribuição irregular das concentrações de trítio, confirmando que cada poço é representativo da recarga local em uma área mais ou menos pequena e que a água não se mistura bem dentro do aquífero.

No entanto, mesmo com esta distribuição irregular de concentrações de trítio, é possível diferenciar no aquífero, 4 zonas com diferentes concentrações médias. Os limites destas zonas estão indicados no mapa da Figura 5, assim como os valores da concentração média, número de poços de cada zona, o desvio médio da concentração e o tempo de renovação. Logicamente, os limites destas zonas não podem ter uma definição precisa. Dentro da zona 2, não se tem dados de concentração de trítio e, portanto, deve ser considerada como uma zona desconhecida a este respeito.

Podem-se utilizar os valores da concentração de trítio, junto com os correspondentes aos isótopos estáveis, para identificar a relação existente entre poços próximos. Por exemplo, observa-se que os poços IT-401, IT-511, IT-513, IT-514 e, possivelmente, o IT-512, podem estar alimentados da mesma água. Por outro lado, poços tão próximos como os MA-400 e MA-151 têm água diferente, o que é a mesma conclusão obtida a partir dos isótopos estáveis.

#### Relação com outros Parâmetros

##### a) Profundidade das Fendas

Em 13 poços onde foi analisado o trítio, foi também realizada uma perfilação isotópica com bromo-82 (Nota Técnica TRRS-07/78 - CETEC). Tais perfilações permitem conhecer com boa precisão a profundidade da qual procede a água coletada em cada poço. Desta forma é possível relacionar esta profundidade com a concentração de trítio. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro V. Em linhas gerais, observa-se que a concentração de trítio diminui quando aumenta a profundidade do trecho fendilhado que fornece a água. Como a concentração de trítio está relacionada com a idade média da água e, em muitos aquíferos livres, a idade aumenta logarithmicamente com a profundidade, tentou-se relacionar a concentração com o logaritmo da profundidade. O resultado obtido encontra-se na Figura 6. Dos 13 pontos existentes, 9 ajustam-se à reta que obedece à equação  $C_t = -5,52 \ln.h + 28,1$ . Os 4 pontos restantes desviam-se, mais ou menos, da reta. No entanto, é difícil saber se este resultado é produto da casualidade ou corresponde à realidade. Para esclarecer este ponto é preciso uma informação mais ampla. Se for aceita a equação anterior, podemos calcular, através da mesma, a profundidade de procedência da água para todos os poços incluídos no Quadro IV. Os resultados obtidos foram agrupados em trechos de 10 metros, chegando-se à distribuição mostrada na Figura 7. Observa-se nesta distribuição a presença de dois picos bem definidos, um situado em torno dos 30 metros e outro em torno dos 62 metros. Esta distribuição é semelhante à obtida através das perfilações isotópicas. No entanto, a distribuição está influenciada pelas profundidades da maioria dos poços perfurados, que oscilam entre 20 a 70 metros.

## b) Isótopos Estáveis da Água

Em 37 poços existem dados de concentração de trítio e de isótopos estáveis da água. Os pontos correspondentes foram representados no diagrama da Figura 8. Observa-se que, em linhas gerais, as águas mais antigas, isto é, com menor concentração de trítio, têm uma concentração menor de oxigênio-18. Isto poderia estar relacionado com a interpretação dada anteriormente, para as diferenças de valores de  $\delta D$  e  $\delta^{18}$  no aquífero. Nas zonas de maior densidade de poços, a recarga do aquífero está acentuada devido ao rebaixamento dos níveis piezométricos. Como a maior parte dos poços foram perfurados nos últimos anos, não é de se estranhar que nas zonas de maior densidade de poços existam águas mais modernas.

### Concentração no rio Verde Grande

As amostras M-1 até M-4 do Quadro IV correspondem a águas do rio Verde Grande. A amostra M-1 foi coletada da Colônia da Jaíba, as amostras M-2 e M-3 em Gado Bravo e a M-4 perto da desembocadura do rio São Francisco (Figura 1). As amostras M-2 e M-3 dão um valor médio de 7,35 U.T.

Os resultados indicam que o rio Verde Grande aumenta a quantidade de trítio no seu percurso. No trecho entre Colônia da Jaíba e Gado Bravo não existem fluxos superficiais que desembocam no rio. Portanto, neste trecho o aumento de trítio só pode ser justificado pelos aportes de águas subterrâneas. A existência destes aportes foi também demonstrada através dos isótopos estáveis da água. Sendo  $Q_1$  a vazão do rio na Colônia da Jaíba,  $Q_2$  a vazão em Gado Bravo,  $q$  a vazão total dos aportes subterrâneos e  $C_1$ ,  $C_2$  e  $c$  as concentrações respectivas de trítio, deverá cumprir-se:

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_1 + q \\ C_2 Q_2 &= C_1 Q_1 + cq \end{aligned} \quad (2)$$

substituindo  $Q_2$  na segunda equação, obtêm-se:

$$\frac{q}{Q_1} = \frac{C_2 - C_1}{c - C_2} \quad (3)$$

Os valores de  $C_1$  e  $C_2$  são os indicados no Quadro IV, isto é,  $C_1 = 4,7 \pm 0,8$  U.T. e  $C_2 = 7,35 \pm 0,6$  U.T. Para calcular o valor da relação  $q/Q_1$ , tem-se dificuldade de encontrar um valor adequado para  $c$ , que representa a média ponderada dos aportes de águas subterrâneas. De acordo com a Figura 5, pode-se considerar um valor de  $c$  dado pela expressão:

$$c = \frac{c_1 l_1 + c_3 l_3 + c_5 l_5}{l_1 + l_3 + l_5} \quad (4)$$

onde  $c_1$ ,  $c_3$  e  $c_5$  são as concentrações de trítio nas zonas 1, 3 e 5 e  $l_1$ ,  $l_3$  e  $l_5$  são os comprimentos dos trechos do rio correspondentes a tais zonas. No entanto, este cálculo não é preciso, porque o rio recebe aportes de águas pelas duas margens e não sabemos quais são as concentrações de trítio na margem direita.

O valor de  $c$  obtido pela equação (4) é igual a 8,2 U.T. Com este valor, a relação  $q/Q_1$  seria igual a 3,1 que parece muito elevado. Resultado mais provável é que o rio Verde Grande receba águas procedentes só de fendas superficiais com elevado conteúdo de trítio. Considerando para  $c$  um valor de 11 U.T., representativo deste tipo de fendas (Figura 6) obtêm-se para  $q/Q_1$  um valor igual a 0,72 que deve estar mais próximo da realidade. Este valor é semelhante ao valor estimado com o método.

O valor de  $Q_1$  para a época da coleta das amostras foi de aproximadamente  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , portanto o valor do aporte subterrâneo no trecho entre a Colônia da Jaíba e Gado Bravo ( $q$ ) seria  $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

No trecho compreendido entre Gado Bravo e a desembocadura do rio Verde Grande, a interpretação dos resultados é mais difícil devido à presença do rio Verde Pequeno do qual não se dispõe de dados sobre a concentração de trítio e nem sobre a vazão. No entanto, observa-se que a concentração de trítio experimenta um novo aumento, pelo qual pode-se supor que o rio receba mais descarga do aquífero.

#### Tempo de Renovação da Água

##### a) Modelo de Recarga

Para a interpretação das concentrações de trítio em aquíferos cársticos é muito utilizado um modelo de renovação da água de tipo exponencial, também chamado de boa mistura. Trata-se de um modelo interpretativo que supõe o aquífero em equilíbrio, isto é, com recarga igual à descarga. A recarga anual média mantém-se constante e o tempo de mistura de cada fração de recarga é pequeno, comparado com o tempo de renovação da água. Para que este modelo possa ser utilizado, não é preciso que cada fração de recarga deva misturar-se com toda a água existente no aquífero. É suficiente que exista uma boa mistura só numa pequena zona do aquífero. Neste caso, cada poço é representativo de uma pequena zona do aquífero e o tempo de renovação obtido será válido só para esta zona. Entretanto, tendo-se muitos dados, pode-se chegar a um valor médio representativo da totalidade do sistema.

Supondo-se que o aquífero receba todo ano uma recarga constante  $R$ , e chamando-a de  $V$  o volume de água armazenada no aquífero, o tempo de renovação é, por definição,  $t_R = V/R$ . A concentração de trítio na recarga é variável com o tempo, sendo indicada pela função  $C_0(t)$ . Esta é chamada função de entrada e corresponde aos valores da última coluna do Quadro III. Sendo  $C(t)$ , a função que determina as variações de concentrações de trítio no aquífero, o balanço deste isótopo pode ser expresso da seguinte forma:

$$RC_0(t) - R C(t) - \lambda V C(t) = V \frac{dc}{dt} \quad (5)$$

Entradas - Saídas - Perdas = Acumulação

O termo  $\lambda VC(t)$  corresponde às perdas por desintegração radioativa do trítio. Como o tempo de renovação  $t_R$  é definido pela relação  $V/R$ , a equação do balanço anterior toma a forma:

$$\frac{1}{t_R} [C_0(t) - C(t)] - \lambda C(t) = \frac{dc}{dt} \quad (6)$$

cuja solução é:

$$C(t) = \frac{1}{t_R} \int_0^t C_0(t') \exp. \left[ \left( \lambda + \frac{1}{t_R} \right) (t - t') \right] dt \quad (7)$$

na qual  $t$  é o tempo atual e o termo  $(t-t')$ , de sinal negativo, representa a idade da cada uma das frações de água que compõem a mistura atual do aquífero.

A forma de utilizar a equação (7) é transformá-la num somatório de  $n$  termos, sendo  $n$  igual ao número de anos transcorridos desde o início das explosões termonucleares (1952) até o momento atual. Considera-se que a contribuição ao valor atual de  $C(t)$  das águas de recarga anteriores a 1952 a 1955 é desprezível comparada com a contribuição da recarga dos anos seguintes. Primeiramente, na equação (7) prefixa-se um valor determinado de  $t_R$ . Depois calcula-se o valor de  $C(t)$  a partir do somatório obtido com todos os valores de  $C_0(t')$  da última coluna do Quadro III correspondentes a incrementos negativos do tempo  $(t-t')$ . O valor de  $\lambda$  é constante e equi

vale a  $0,0565 \text{ anos}^{-1}$ . Da mesma forma, calculam-se novos valores de  $C(t)$  para tempos de renovação diferentes e constrói-se um diagrama. O tempo de renovação para qualquer concentração de trítio obtém-se por leitura direta neste diagrama.

A relação entre a concentração de trítio  $C(t)$  e o tempo de renovação obtida como foi indicado anteriormente, encontra-se na Figura 9. Esta curva mostra que o modelo exponencial exige que todas as concentrações de trítio no aquífero estejam compreendidas entre 0 e 14,2 U.T. Esta condição é satisfeita de forma aceitável. Só duas amostras tiveram uma concentração maior que 14,2 U.T. Uma destas amostras (poço MA-83) tem muita possibilidade de ter sido contaminada durante sua análise. A outra é do poço MA-420 com 20,8 U.T.

A forma de curva da Figura 9 proporciona dois valores do tempo de renovação para uma mesma concentração de trítio, no caso de estar compreendida entre 6,6 e 14,2 U.T. No entanto, os valores do tempo de renovação menores que 5 ou 10 anos não parecem possíveis, desde o ponto de vista hidrológico, porque exigiriam uma recarga anual muito elevada (80 até 200 mm/ano). Por esta razão, será considerada só a parte descendente da curva. A comprovação de que este procedimento é correto pode-se realizar repetindo as análises de trítio depois de vários anos. Os novos resultados deverão ser coerentes com os mesmos tempos de renovação.

A reta da Figura 6 é a relação entre a concentração de trítio e a profundidade da água. Utilizando-se a Figura 9, as concentrações de trítio podem ser transformadas em tempo de renovação, obtendo-se assim a reta da Figura 10 que relaciona este tempo com a profundidade. Excetuando-se três pontos que ficaram muito afastados, os outros 10 pontos ajustam-se à reta de equação  $t_R = 1,43 h - 17$  ( $t_R$  em anos e  $h$  em metros).

Para cada valor de concentração de trítio em amostras de água dos poços incluídos no Quadro IV, corresponde um tempo de renovação, segunda a curva da Figura 9. Obtém-se assim uma série de valores de  $t_R$  com um valor médio igual a 101 anos. No entanto, este valor não pode ser considerado representativo do aquífero, pelas duas razões seguintes:

- A distribuição dos pontos de amostragens é irregular e, portanto algumas zonas estão melhor representadas do que as outras.
- A relação entre  $C(t)$  e  $t_R$  é do tipo mais ou menos exponencial e basta ter umas poucas amostras com concentrações de trítio muito baixas para aumentar o valor médio de  $t_R$  de forma considerável. Por exemplo, o caso presente, se eliminarmos no cálculo só 5 amostras que dão um tempo de renovação maior que 200 anos, as amostras restantes darão um valor médio de  $t_R$  igual a 56,3 anos.

Por estas razões, considera-se mais representativo dividir a região ocupada pelo aquífero em diferentes zonas, nas quais a concentração de trítio e, portanto, o tempo de renovação sejam, mais ou menos, semelhantes. Uma divisão deste tipo é a indicada na Figura 5, no qual foram delimitadas 4 zonas diferentes. O tempo de renovação médio e a superfície aproximada de tais zonas são:

#### Zona 1

Tempo de Renovação: 37 anos<sup>2</sup>  
Superfície : 1.550 km<sup>2</sup>

### Zona 3

Tempo de Renovação: 158 anos  
Superfície : 360 km<sup>2</sup>

### Zona 4

Tempo de Renovação: 62 anos  
Superfície : 620 km<sup>2</sup>

### Zona 5

Tempo de Renovação: 35 anos  
Superfície : 450 km<sup>2</sup>

De acordo com tais valores, o tempo de renovação médio ponderado para todo o aquífero seria dado por:

$$t_{Rm} = \frac{37 \times 1550 + 158 \times 360 + 62 \times 620 + 35 \times 450}{1550 + 360 + 620 + 450} = 56,5 \text{ anos}$$

Por outro lado, no relatório sobre as perfilagens isotópicas (Nota Técnica TRRS-07/78, CETEC), a espessura média da lâmina de água no aquífero foi estimada em 2 metros. Com este dado e com o tempo de renovação médio anterior, obtém-se uma recarga anual média  $R = 2000/56,5 = 35,4$  mm/ano. O cálculo pode também ser feito de modo inverso, isto é, a partir da recarga anual média obtida por outro método (por exemplo, balanço de ion cloreto), pode-se determinar a espessura média da lâmina de água.

Convém salientar o elevado tempo de renovação encontrado para a zona 3. Este resultado pode ser interpretado de diferentes maneiras:

- Pode ser uma zona de fendilhamento mais profundo do que as outras. De acordo com a Figura 10, a profundidade média das fendas deveria estar em torno de 120 metros.
- Outra hipótese é a de que esta possui maior densidade de fendilhamento, isto é, maior espessura de lâmina de água. Por exemplo, no caso de ser válida a recarga anual média de 35 mm/ano, a espessura da lâmina de água no modelo exponencial deveria ser  $h = 35 \times 158 = 5.530$  mm ou 5,5 metros.

Para comprovar se o modelo exponencial funciona de forma correta no caso presente, seria preciso repetir as medições de trítio depois de um período de 4 ou 5 anos. As novas concentrações de trítio deverão ser mais baixas, mas o tempo de renovação calculado deveria ser da mesma ordem de grandeza. Neste momento, é possível realizar uma certa comprovação deste modelo a partir de 3 dados correspondentes a 3 amostras coletadas em abril de 1977, nos poços MA-04, MA-06 e MA-98, analisadas pelo CDTN de Belo Horizonte (MG); (Campos, M. et alii, 1977). As concentrações de trítio obtidas naquela época durante trabalho realizado pelo CETEC para a RURALMINAS foram:

#### Poço MA-04

abril de 1977 : 7,7 U.T.  
agosto de 1978 : 7,1 ± U.T.

#### Poço MA-06

abril de 1977 : 13,7 U.T.  
agosto de 1978 : 11,6 ± 0,8 U.T.

#### Poço MA-98

abril de 1977 : 8,6 U.T.  
agosto de 1978 : 6,6 ± 0,8 U.T.

Com os valores de 1978 e a curva da Figura 9, obtêm-se os tempos de renovação de 46, 21 e 50 anos, respectivamente, para os poços MA-04, MA-06 e MA-98. Por outro lado, foi construído um gráfico semelhante ao da Figura 9 para o ano de 1977. Neste gráfico foram determinadas quais deveriam ter sido as concentrações de trítio nas três amostras coletadas nos poços em 1977, obtendo-se os valores 7,9; 13,4 e 7,5 U.T., respectivamente, para os poços MA-04, MA-06 e MA-98. Nos dois primeiros casos os valores são quase idênticos e no terceiro a diferença encontra-se dentro dos erros estatísticos das suas análises de trítio. Parece, portanto, que o modelo exponencial pode funcionar corretamente no caso presente.

#### BIBLIOGRAFIA

- CAMPOS, M.M., SALATTI, E., e MATSUI, E., 1977 - Utilização dos teores de Oxigênio-18, D e T como traçadores em estudos hidrogeológicos, RURALMINAS, CETEC, Projeto PLANOROESTE II, Relatório III-4-A, Belo Horizonte.
- CETEC, 1978 - Nota Técnica TRRS-07/78. Projeto "Karst", Belo Horizonte.
- CUSTÓDIO, E., e LLAMAS, M.R., 1975 - Hidrologia subterrânea. Tomo II. Ediciones Omega S/A, Barcelona, p. 1278-80.
- ENVIRONMENTAL ISOTOPE DATA Nº 1, 1969 - World survey of isotope concentration in precipitation (1953-1963), Technical Reports Series nº 96, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ENVIRONMENTAL ISOTOPE DATA Nº 2, 1970 - World survey of isotope concentration in precipitation (1964-1965), Technical Reports Series nº 117, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ENVIRONMENTAL ISOTOPE DATA Nº 3, 1971 - World survey of isotope concentration in precipitation (1966-1967), Technical Reports Series nº 129, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ENVIRONMENTAL ISOTOPE DATA Nº 4, 1973 - World survey of isotope concentration in precipitation (1968-1969), Technical Reports Series nº 147, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ENVIRONMENTAL ISOTOPE DATA Nº 5, 1975 - World survey of isotope concentration in precipitation (1970-1971), Technical Reports Series nº 165, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- ENVIRONMENTAL ISOTOPE DATA Nº 6, 1979 - World survey of isotope concentration in precipitation (1972-1975), Technical Reports Series nº 192, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- SIEGENTHALER, U. et al., 1970 - Tritium and oxygen-18 in natural water samples from Switzerland; Isotope Hydrology, International Atomic Energy Agency, Proc. Symp. Vienna, p. 373-385.
- YURTSERVAR, Y., e PAYNE, B.R., 1978 - Application of environmental isotope to groundwater investigations in Qatar, International Symposium on Isotope Hydrology, Neuherberg. Germany Fed. Rep., Paper IAEA-SM-228/24, June.

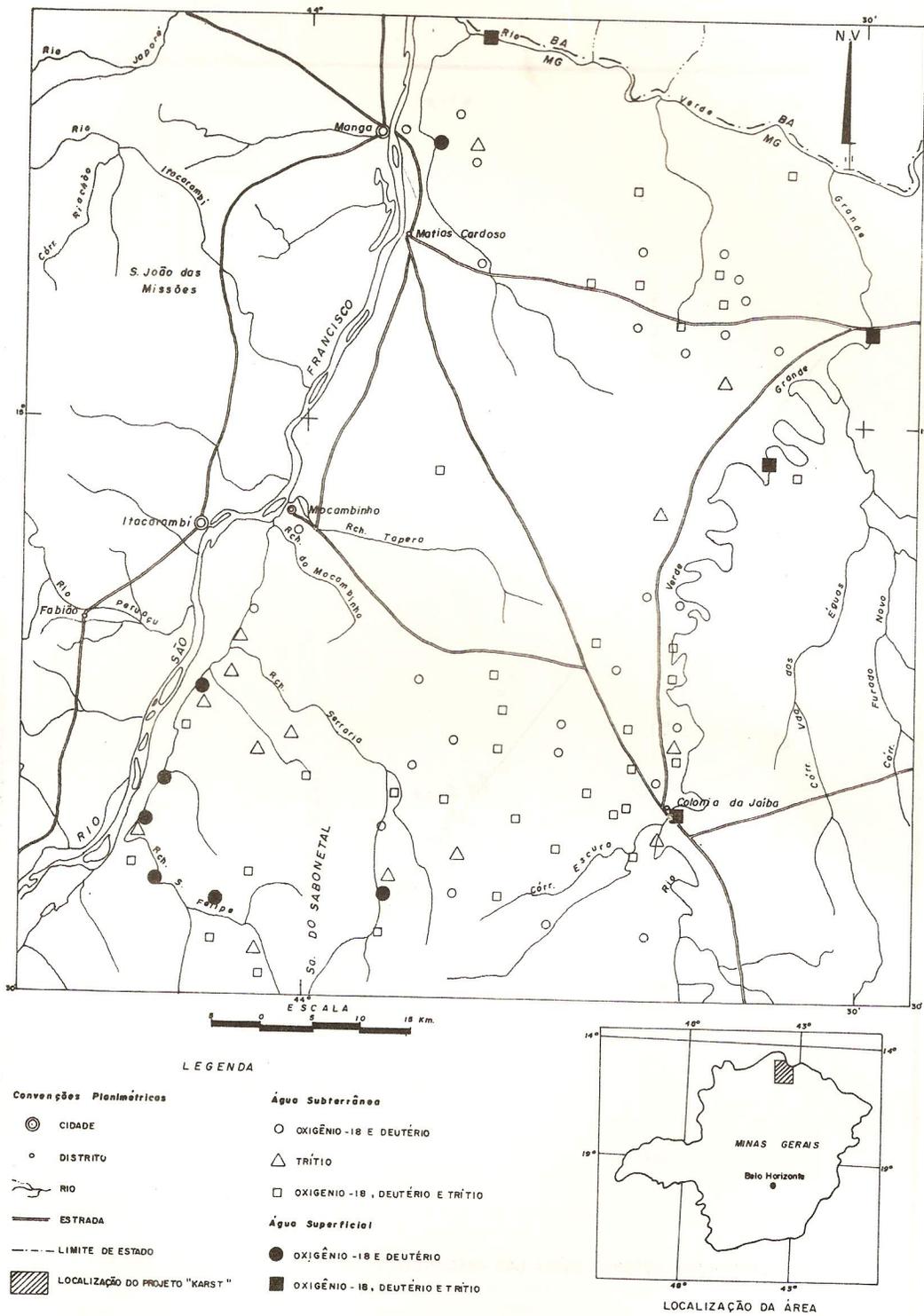
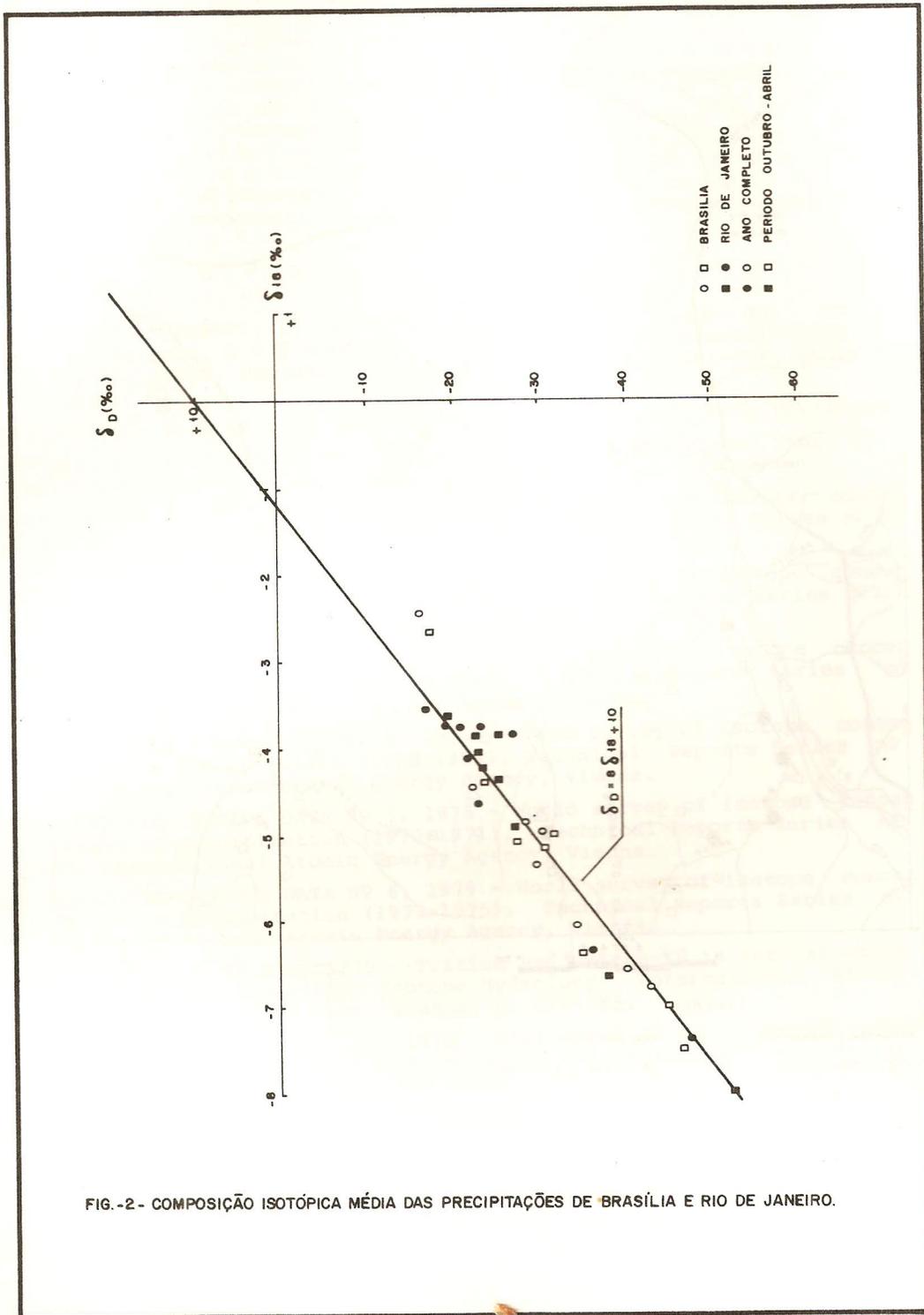


FIG.-1- LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS.



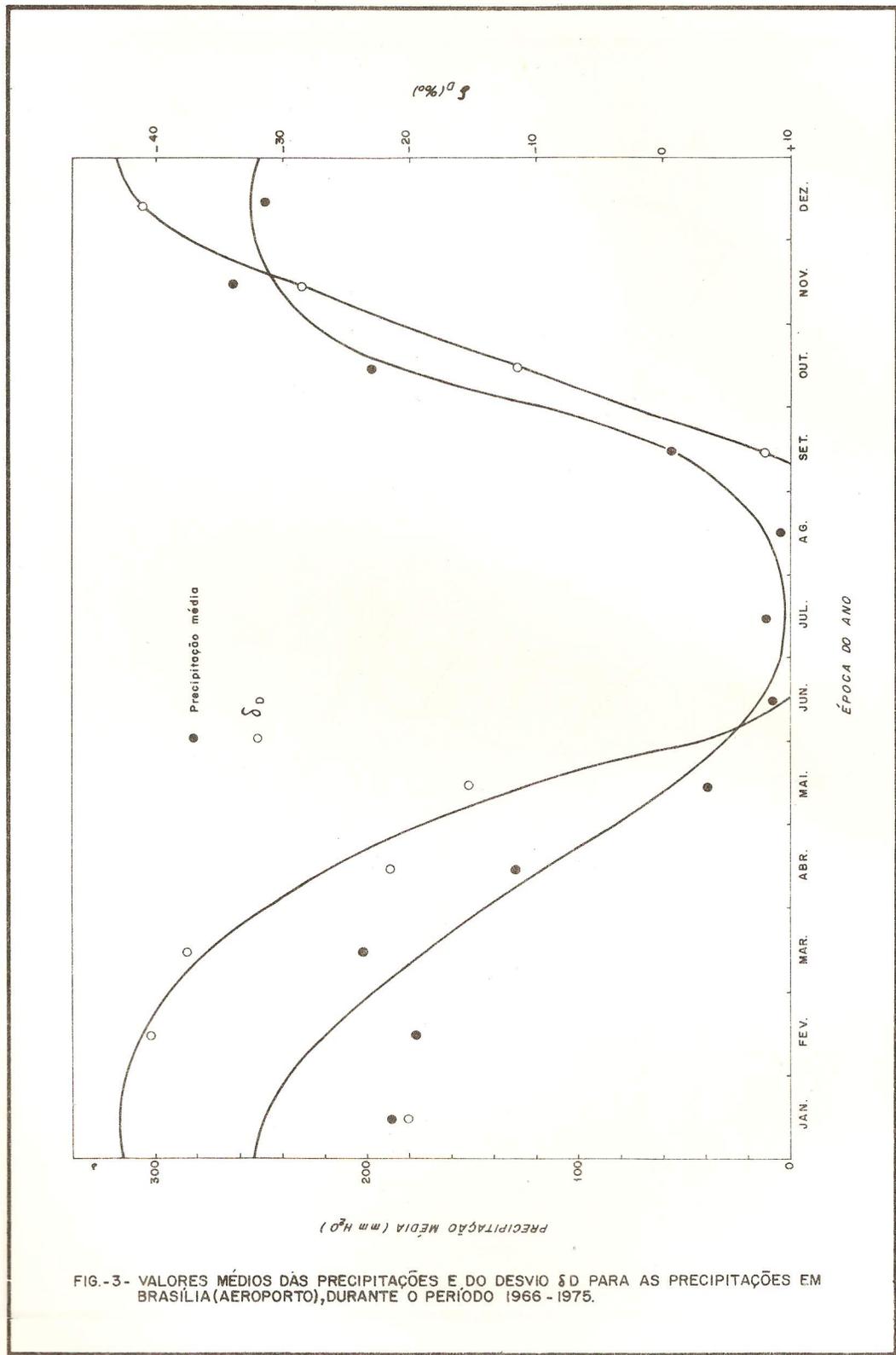
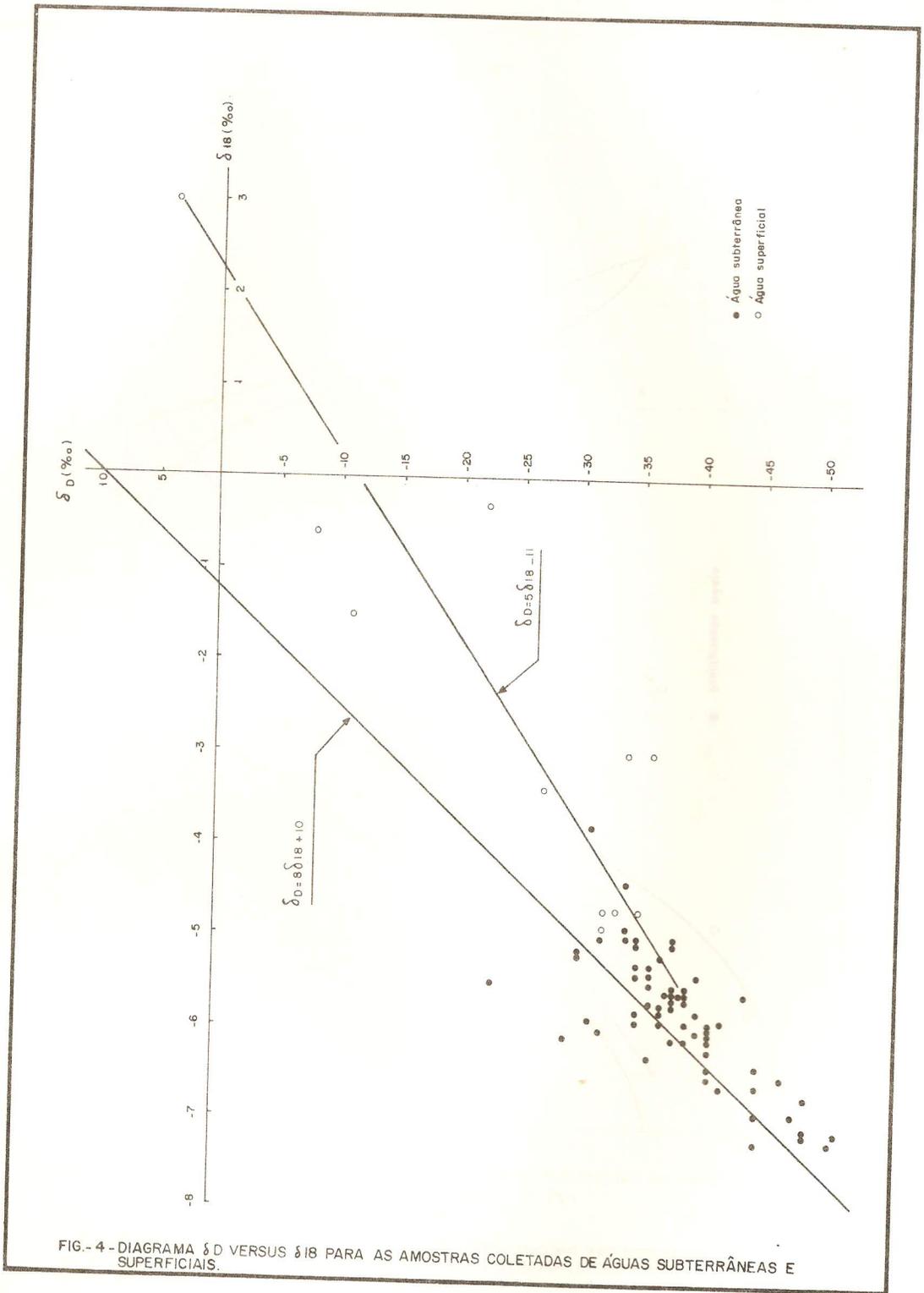
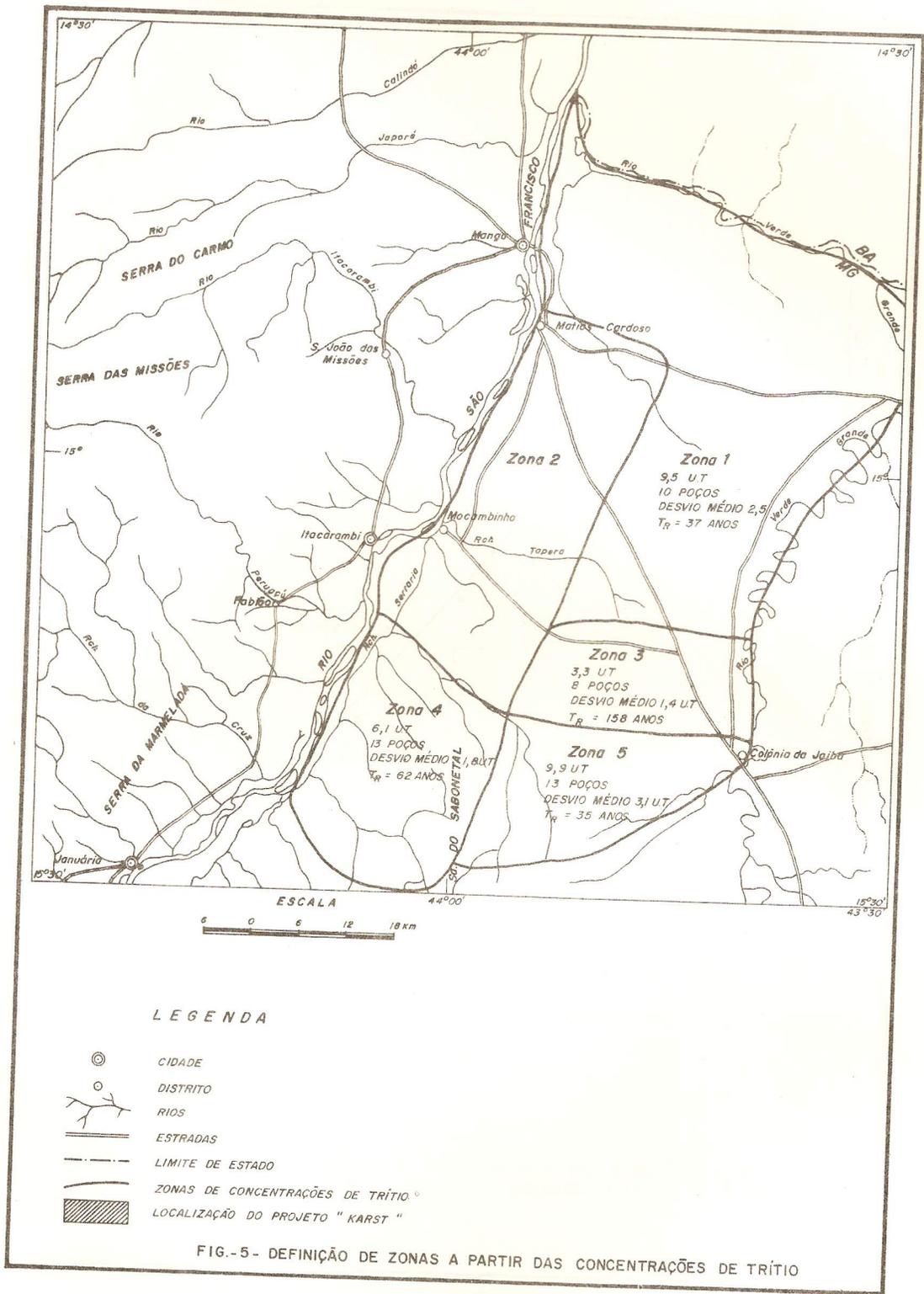


FIG.-3- VALORES MÉDIOS DAS PRECIPITAÇÕES E DO DESVIO  $\delta_D$  PARA AS PRECIPITAÇÕES EM BRASÍLIA(AEROPORTO), DURANTE O PERÍODO 1966 - 1975.





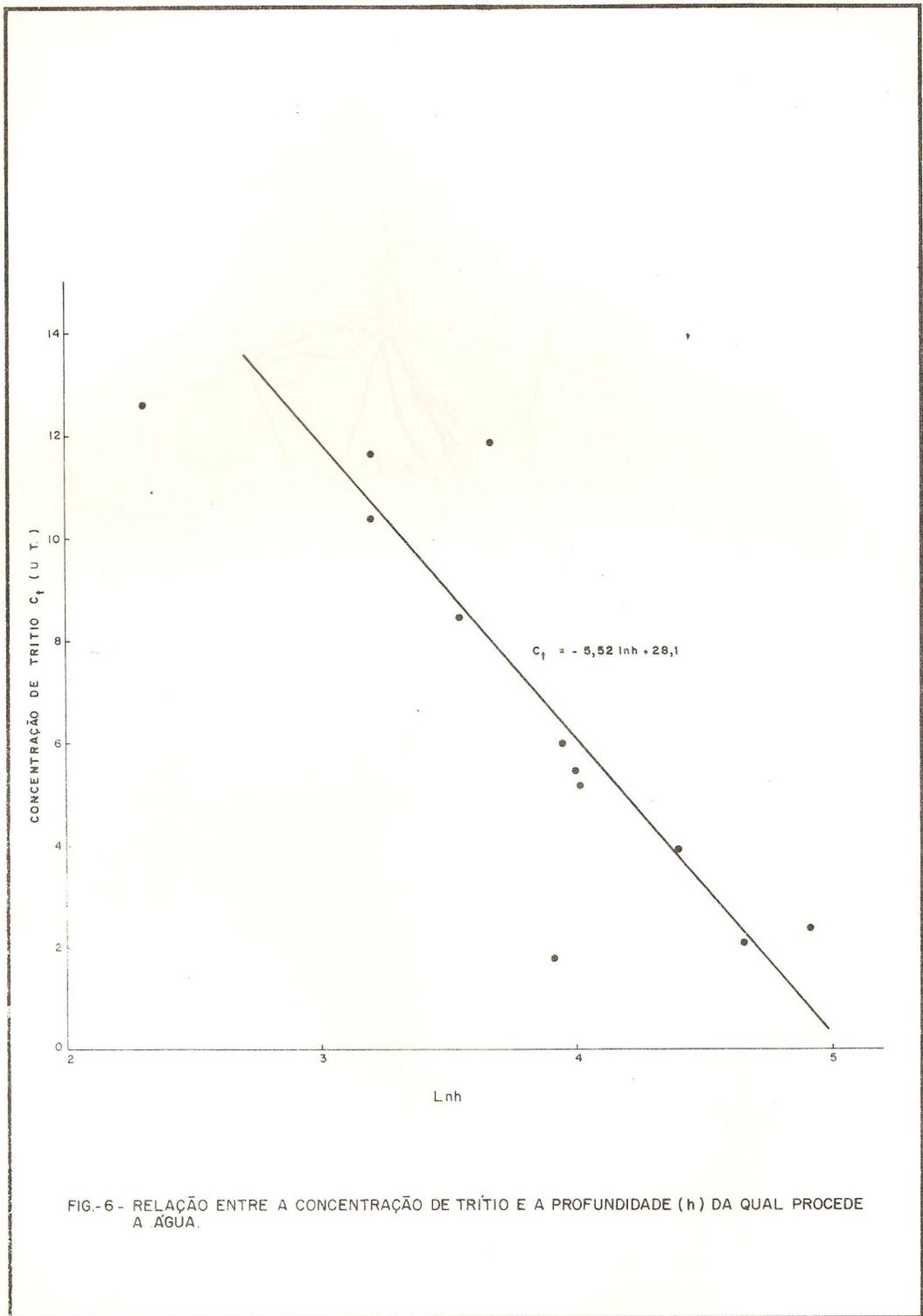
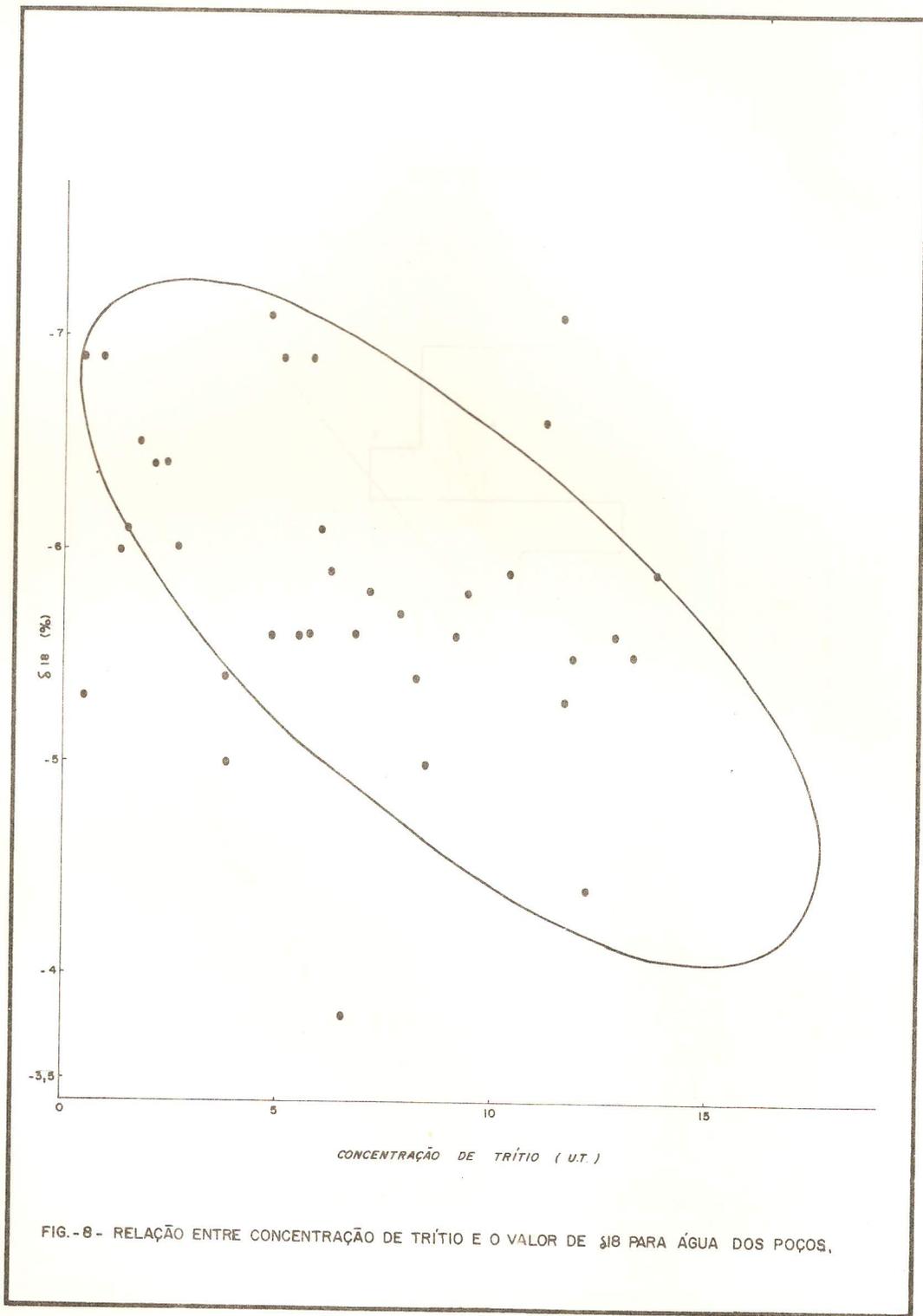


FIG.-6 - RELAÇÃO ENTRE A CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIU E A PROFUNDIDADE (h) DA QUAL PROCEDE A ÁGUA.



FIG. -7- DISTRIBUIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE ORIGEM D'ÁGUA BASEADA NA CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIU.



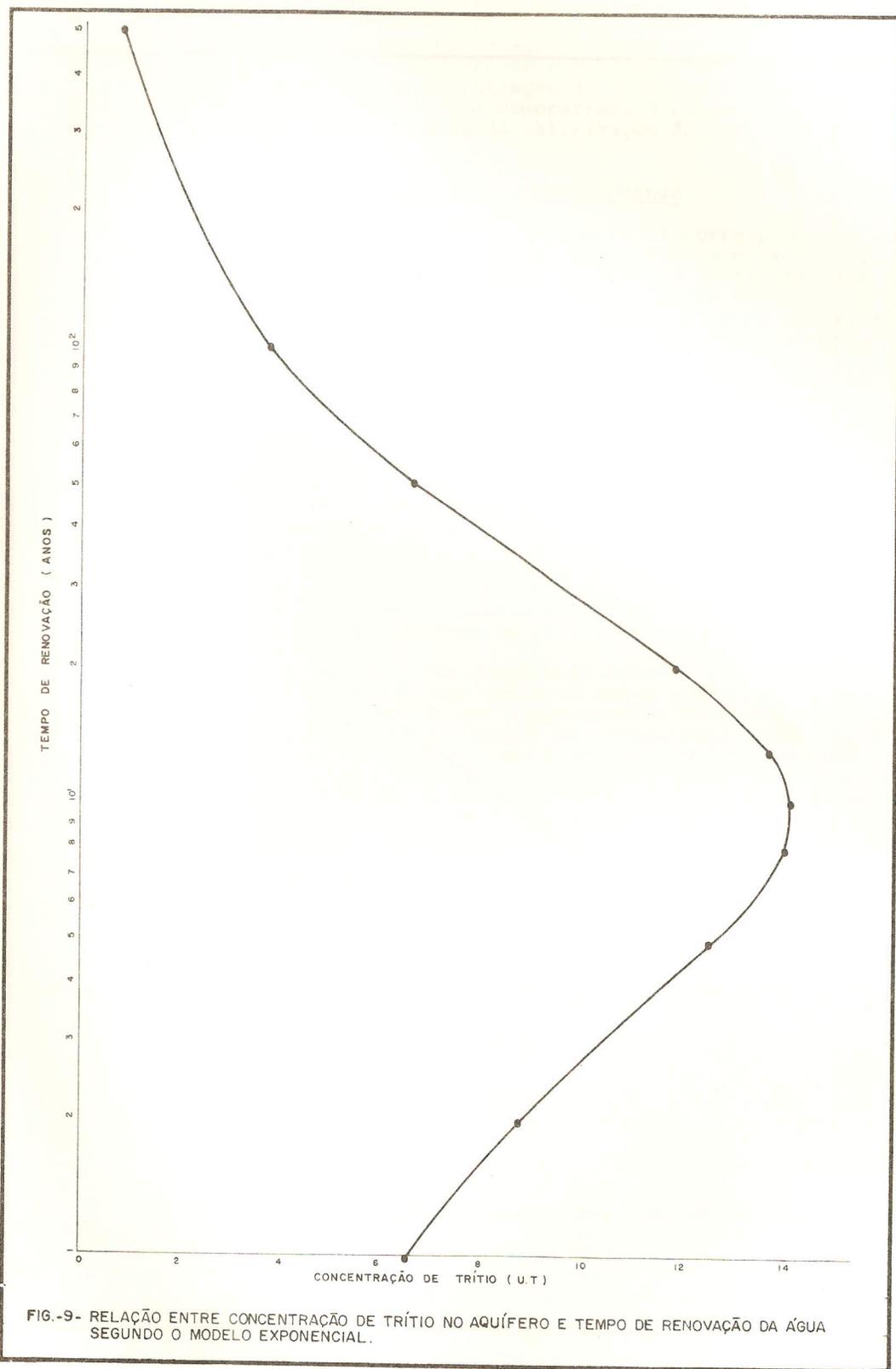


FIG.-9- RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIUM NO AQUÍFERO E TEMPO DE RENOVAÇÃO DA ÁGUA SEGUNDO O MODELO EXPONENCIAL.

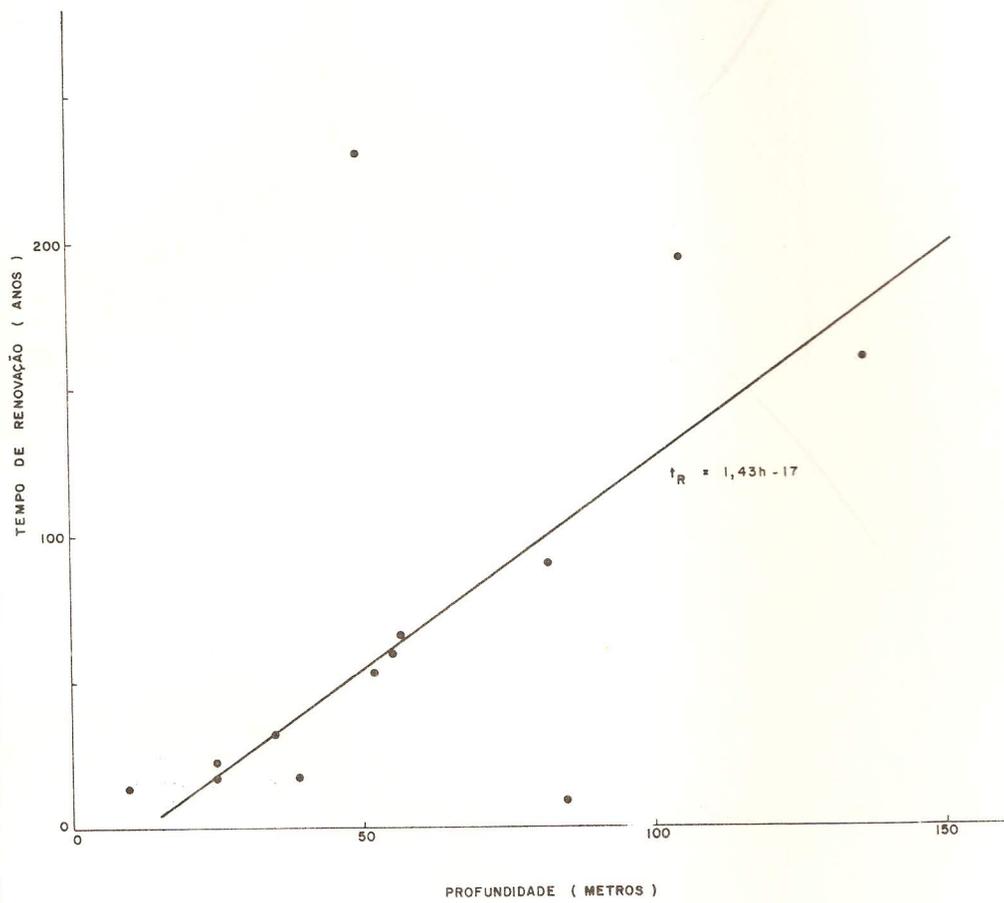


FIG.-10 - RELAÇÃO ENTRE TEMPO DE RENOVAÇÃO E PROFUNDIDADE DA ÁGUA.