

# TRAÇADORES E TÉCNICAS ISOTÓPICAS EM HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA: A EXPERIÊNCIA DO CDTN/CNEN, BRASIL

Paulo Sérgio Pelógia Minardi<sup>1</sup> & Virgílio Lopardi Bomtempo<sup>1</sup>

**Resumo** - A análise de isótopos de elementos químicos presentes naturalmente na água e a adição de traçadores artificiais ao sistema hídrico proporcionam a obtenção de diversos parâmetros relacionados à dinâmica da água. Os isótopos <sup>2</sup>H(deutério) e <sup>18</sup>O marcam as partes do ciclo hidrológico, possibilitando o conhecimento da história da água (origem e processos de mudança de fase). O <sup>3</sup>H(trítio) e o <sup>14</sup>C são utilizados para datar águas recentes e antigas, respectivamente. Quando injetado para marcar a umidade da zona vadosa, o trítio fornece a taxa de infiltração da água meteórica e, conseqüentemente, a recarga do aquífero. A rodamina, corante fluorescente, é usualmente utilizada para medir vazão de rios e estudar interconexões subterrâneas. O presente trabalho contempla os estudos realizados pelo CDTN/CNEN em dois domínios geológicos distintos: o carste do grupo Bambuí na região de Montes Claros, e o platô alcalino de rochas vulcânicas do Planalto de Poços de Caldas, ambos em Minas Gerais.

**Palavras-chave** - hidrogeologia isotópica, traçador e carste.

## INTRODUÇÃO

Localizado em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, Brasil, o CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear é um dos cinco institutos de pesquisa e de desenvolvimento pertencentes à CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear.

A experiência de um grupo de pesquisadores iniciada no princípio da década de sessenta encontra-se bem consolidada no campo das aplicações de técnicas de

---

<sup>1</sup> Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, Caixa Postal 941 – 30123-970 Belo Horizonte MG – Brasil, fone (31) 4993219 – fax: (31) 4993127, e-mail: [pspm@urano.cdtm.br](mailto:pspm@urano.cdtm.br) e [vlb@urano.cdtm.br](mailto:vlb@urano.cdtm.br)

traçadores radioativos em águas de superfície e em sedimentologia. Como consequência, esse grupo, que iniciou suas atividades medindo vazões em rios e em turbinas, acabou por estudar a deposição e a circulação de sedimentos nas proximidades das mais importantes áreas portuárias do Brasil, bem como em rios e reservatórios. Tais estudos trataram basicamente do transporte de sedimentos de fundo e em suspensão, da disposição de material dragado, de processos de erosão e de sedimentação e de medições *in situ* de densidade de depósitos não consolidados de silte e de argila. Ademais, a disposição de efluentes líquidos e sólidos em corpos d'água (rios, lagos e oceano) por meio de emissários tem sido estudada com técnicas de traçadores que simulam a advecção e a dispersão nas condições de campo próximo e afastado. Alguns membros do grupo têm trabalhado regularmente como consultores da AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica.

Entretanto, pesquisas em hidrologia subterrânea, às quais foi dada atenção considerável no passado, permaneceram estagnadas por um longo período de tempo. Retomar as atividades nessa área é o grande esforço atual empreendido pelo grupo, voltado principalmente para os problemas de escassez e de vulnerabilidade à poluição dos recursos hídricos em diversas regiões do país. O objetivo maior é o de formar um grupo de especialistas de alto nível, capaz de aplicar técnicas isotópicas e nucleares no estudo de processos do ciclo hidrológico, particularmente na compreensão do funcionamento de sistemas hídricos subterrâneos e de suas interações com as águas atmosféricas e de superfície. Especial atenção vem sendo dada aos métodos de traçadores naturais baseados no uso de isótopos ambientais, quer sejam radioativos ou estáveis, já que estas ferramentas desenvolvidas pela ciência nuclear, e em constante processo de aprimoramento, têm se mostrado insubstituíveis no estudo de alguns processos críticos do ciclo hidrológico, pois permitem medições diretas e precisas.

## **METODOLOGIA**

São apresentadas, nesse trabalho, algumas das técnicas desenvolvidas e aprimoradas nas últimas décadas, voltadas para uma melhor compreensão dos sistemas hidrogeológicos, inclusive dos mais complexos como carstes e fraturados. A seguir, são discutidos resultados da aplicação dessas técnicas em dois domínios geológicos distintos no Estado de Minas Gerais, quais sejam o carste da região de Montes Claros, norte do estado, e o sistema fraturado de rochas vulcânicas alcalinas que compõe o planalto de Poços de Caldas, ao sul.

## DATAÇÃO POR TRÍTIU AMBIENTAL

O trítio ( $^3\text{H}$  ou T) é o isótopo mais pesado do hidrogênio e o único radioativo. É um emissor  $\beta$  puro que decai para o hélio com meia-vida de 12,3 anos.

A fonte natural de produção de trítio ocorre através do bombardeio dos gases da atmosfera terrestre por raios cósmicos. Além dessa fonte, o trítio procede também das explosões termonucleares ocorridas no planeta após o ano de 1952.

Devido à sua meia vida relativamente curta, esse isótopo do hidrogênio informa sobre a presença de águas infiltradas recentemente no aquífero. Para datar águas mais antigas utiliza-se o carbono-14.

As concentrações de trítio na água são expressas em Unidade de Trítio (UT), sendo que 1 UT corresponde a 1 átomo de  $^3\text{H}$  para  $10^{18}$  átomos de hidrogênio ( $^1\text{H}$ ), ou 0,11815 Bq/l.

Para interpretar os valores de concentração de trítio é necessário conhecer as concentrações desse isótopo nas precipitações ocorridas na área do estudo após o início dos testes nucleares na atmosfera. Caso sejam inexistentes, essas concentrações podem ser deduzidas, de forma bastante aproximada, a partir de correlações com concentrações da rede mundial de controle estabelecida pela AIEA, utilizando-se estações próximas (Brasília, Ceará Mirim, Cuiabá, Fortaleza, Manaus, Porto Alegre, Porto Velho, Rio de Janeiro), e a estação modelo para o Hemisfério Sul, localizada em Kaitoke, Nova Zelândia.

O cálculo da "idade" da água, ou seja, do tempo de renovação da água no aquífero, é realizado considerando-se, com resultados bastante satisfatórios, o modelo de renovação exponencial ou de mistura total (Zuber, 1986), onde o aquífero é subdividido em diversas células com composição isotópica e química aproximadamente homogênea. Cada célula se caracteriza por conter um volume constante de água (recarga = descarga) e uma concentração de trítio representativa de um ou mais valores correspondentes a poços ou a mananciais contidos na mesma. Supõe-se que qualquer fração de recarga que penetra a célula mistura-se uniformemente com toda a água nela contida em um tempo muito curto quando comparado com o tempo de renovação da água dessa célula, o qual vem definido pela relação volume/recarga.

O balanço de trítio no interior da célula é regido pela seguinte equação:

$$Q C_0(t) - Q C(t) - I V C(t) = V \frac{dC(t)}{dt} \quad (1)$$

onde o primeiro termo é a parcela que entra, o segundo, a parcela que sai, o terceiro, a parcela referente à desintegração do trítio e o quarto, a variação da concentração de trítio.

Como o tempo de renovação é dado por  $t = V/Q$ , tem-se a seguinte solução para a equação (1) :

$$C_t = \frac{1}{t} \int_{-\infty}^t C_0(t') \exp\left[-\frac{1+I t}{t} (t-t')\right] dt' \quad (2)$$

onde o termo  $C_0(t')$  corresponde à função de entrada do trítio no sistema e o termo  $(t-t')$  representa o tempo transcorrido desde o ano correspondente a cada valor de  $C_0(t)$  e o momento  $(t')$  em que foram coletadas as amostras. A equação final do modelo se resolve como um somatório de todas as contribuições parciais ao valor de  $C_t$ , procedentes do trítio que entrou no sistema nos sucessivos anos até o momento da coleta das amostras. Assume-se que o trítio que entrou no sistema antes de 1953 não é significativo perante as concentrações atuais.

## ESTUDO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS

Coexistem na água pequenas quantidades de moléculas dos tipos  $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  e  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$  junto com moléculas mais abundantes do tipo  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ . Como esses três tipos de moléculas têm pressão de vapor diferente, em toda troca de estado da água (evaporação, condensação) ocorre um fracionamento isotópico, fazendo com que as composições isotópicas das diversas fases sejam diferentes entre si. Isso possibilita identificar a origem e os processos de mudança de fase ocorridos em amostras de água ao longo do ciclo hidrológico.

Com o objetivo de unificar a forma de expressão e possibilitar a comparação de resultados, estabeleceu-se o padrão internacional Vienna - SMOW ("Standard Mean Ocean Water"), preparado pela AIEA com uma série de amostras de águas provenientes dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico.

As concentrações passaram então a ser expressas como desvios  $d$ , positivos ou negativos, em partes por mil (‰), segundo a expressão:

$$d_{amostra} = \frac{R_{amostra} - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} \times 10^3 \quad (‰) \quad (3)$$

onde R define a relação isotópica entre as moléculas pesadas ( $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  ou  $^1\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$ ) e as leves ( $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ).

Devido aos fracionamentos isotópicos mencionados anteriormente, a maioria das precipitações do globo terrestre obedece à equação geral  $d_D = 8d_{18O} + 10$ , a qual se denomina linha meteórica mundial. O fator 10 se chama excesso de deutério e é usado freqüentemente como parâmetro interpretativo para detectar águas que tenham sofrido uma evaporação prévia. O levantamento dessa curva para a zona de estudo permite, por exemplo, o estabelecimento de relações entre as águas dos aquíferos e dos corpos superficiais sujeitos a um regime intenso de evaporação.

De modo geral, a composição isotópica das precipitações depende da distância aos oceanos, da temperatura, da latitude, da altitude, da evaporação e do intercâmbio isotópico com o vapor atmosférico previamente existente.

## **DETERMINAÇÃO DE RECARGA COM TRÍTIIO ARTIFICIAL**

Datam da década de sessenta os primeiros estudos de marcação da água na zona não saturada, onde se comprovou a existência de um movimento por camadas (Zimmermann et alii, 1967). Posteriormente, o desenvolvimento da técnica (Munnich, 1983) permitiu a determinação, com sucesso, da taxa de infiltração e, conseqüentemente, da recarga de aquíferos, em diferentes condições climáticas, a exemplo dos trabalhos de (Athavale et alii, 1980) e (Araguás et alii, 1995).

As experiências realizadas pelo CDTN/CNEN consistem na aspersão de água marcada com trítio, antes do período chuvoso, na superfície de pequenas parcelas de terreno de 15 a 20m<sup>2</sup>. Utiliza-se uma atividade entre 500 µCi e 1 mCi diluída em 50 litros de água isenta de trítio. A seguir, acrescenta-se um volume de até 400 litros de água, também isenta de traçador, para forçar a penetração inicial do trítio no solo e diminuir sua evaporação direta para a atmosfera.

Posteriormente, durante e após o período chuvoso, são coletadas amostras de solo nessas parcelas, segundo um perfil vertical, para se determinar a posição da nuvem de traçador ( $h$ ) e o perfil de densidade úmida e de umidade do solo. Essas determinações são feitas em laboratório, utilizando-se uma linha de extração de umidade a vácuo.

A recarga vem dada pela expressão:

$$R = r_u U \Delta_h \quad (4)$$

onde  $R$  (g/cm<sup>2</sup>) é a massa de água contida na camada  $\Delta_h$

$r_u$  (g/cm<sup>3</sup>) é a densidade úmida média da camada  $\Delta_h$

$U$  (%) é a umidade média da camada  $\Delta_h$

e  $\Delta_h$  (cm) é o incremento de profundidade alcançado pela nuvem de traçador durante um determinado período de tempo  $\Delta_t$ .

## MEDIDA DE VAZÃO COM TRAÇADOR ARTIFICIAL

A determinação de vazões líquidas pode ser feita utilizando-se o método de integração baseado na injeção instantânea de um traçador (Zuber, 1986). No caso do presente trabalho, o traçador empregado foi o corante fluorescente Rodamina WT.

Em um determinado ponto do rio injeta-se uma massa conhecida de traçador que chamaremos de  $M$ . A jusante do ponto de injeção, em local situado a uma distância suficientemente grande do anterior para que se cumpra a condição de boa mistura, levanta-se a curva de passagem do traçador, dada pela variação da concentração em função do tempo. O conhecimento da área sob essa curva, isto é, do valor da expressão  $\int C(t) dt$ , proporciona a vazão ( $Q$ ) do rio, segundo a equação:

$$Q = \frac{M}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \left[ \frac{g}{l} = \frac{l}{s} \right] \quad (5)$$

## **EXPERIÊNCIA DE INTERCONEXÃO SUBTERRÂNEA**

As experiências de interconexão subterrânea aqui tratadas referem-se a estudos de comunicação subterrânea entre sumidouros e surgências em áreas cársticas.

O traçador (Rodamina WT) é injetado em um ponto do rio próximo ao local de infiltração (sumidouro) e detectado em possíveis locais de aparecimento (surgências).

A detecção do traçador é feita através de coletas de amostras a intervalos de tempo variáveis, segundo a duração da experiência e as facilidades logísticas. Obtém-se, como resultado, a curva de passagem do traçador pelo local de detecção, expressa em concentração versus tempo.

A partir dessa curva obtém-se o tempo de trânsito da água entre o ponto de injeção e o de detecção. Conhecendo-se a vazão no ponto de detecção, a qual pode ser medida por métodos convencionais (molinete) ou também por traçadores, determina-se a porcentagem de recuperação da massa do traçador injetado, utilizando-se a equação (5). Como resultado, torna-se conhecida a proporção de águas infiltradas no sumidouro e que efetivamente afloram na surgência ou nas surgências.

Calculando-se a área molhada média, pode-se inferir também a existência ou não de grandes cavernas no trajeto subterrâneo.

Uma variante qualitativa desse método consiste na detecção do traçador através de carvão ativado. A rodamina tem a propriedade de se adsorver ao carvão e não ser lavada pela água durante semanas. Sua extração é feita a posteriori, no laboratório, utilizando-se uma solução alcoólica. Saquinhos de gaze contendo alguns gramas de carvão ativado são dispostos nos possíveis locais de aparecimento do traçador na tentativa de se estabelecer o percurso subterrâneo antes da realização da experiência que fornece resultados quantitativos.

## **CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DE SUB-BACIAS CÁRSTICAS DO RIO VERDE GRANDE.**

A partir de 1995, o CDTN/CNEN começou a aplicar essas ferramentas na região de Montes Claros - MG, através de um projeto de cooperação técnica com a AIEA- Agência Internacional de Energia Atômica e em parceria com a COPASA- Companhia de Saneamento de Minas Gerais, CODEVASF- Companhia de Desenvolvimento do Vale do

São Francisco, IGAM- Instituto Mineiro de Gestão das Águas e UNIMONTES- Universidade Estadual de Montes Claros.

Duas regiões separadas geograficamente e com características hidrogeológicas distintas foram contempladas.

**Trítio Ambiental** - Apresentando manifestações cársticas bem desenvolvidas, tais como sumidouros e surgências, a primeira região abrange as bacias hidrográficas dos Rios Pai João, Cedro e Pacuí, localizadas adjacentes à cidade de Montes Claros e onde a COPASA possui captações de água. Nesse caso, os trabalhos desenvolvidos visaram complementar o abastecimento de água da cidade de Montes Claros.

A segunda região, localizada no município de Francisco Sá, compreende a bacia do Rio Caititu, o qual tem as suas cabeceiras correndo sobre os diamictitos e quartzitos do Grupo Macaúbas, penetrando posteriormente nos siltitos e ardósias do Grupo Bambuí, intensamente fraturados, que recobrem os calcários encontrados no seu médio e baixo cursos. Nesse caso, os trabalhos visaram subsidiar tecnicamente o fornecimento de outorgas.

As concentrações de trítio nas águas subterrâneas das regiões estudadas são mostradas nas figuras 1 e 2.



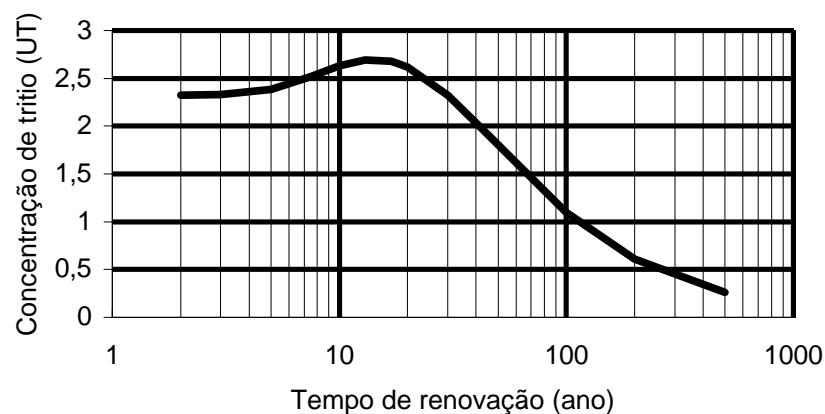
**Figura 1.** Concentração de trítio ambiental nas bacias do Rio Pai João e Cedro.





**Figura 2.** Concentração de trítio ambiental na bacia do Rio Caititu.

Interpretando-se esses dados, com base no modelo exponencial descrito anteriormente, pode-se dizer que todas as águas com concentrações de trítio próximas ou maiores do que 2,3 UT procedem de precipitações recentes e possuem tempos de renovação inferiores a 30 anos, conforme pode ser observado no gráfico 1. Por outro lado, todas as águas com concentrações inferiores a 1,5 UT contêm importantes frações procedentes de precipitações anteriores ao ano de 1953.



**Gráfico 1.** Tempo de renovação obtido pelo modelo de mistura total.

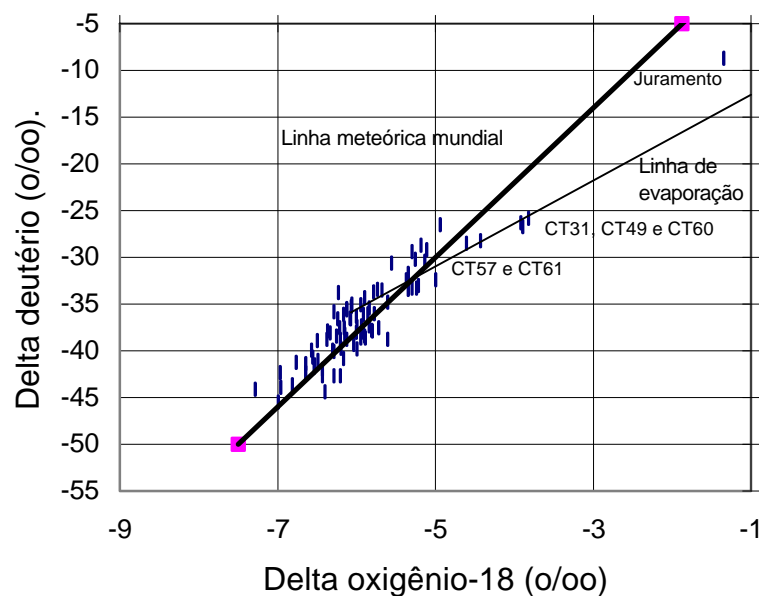
No caso do Rio Caititu, uma ampla zona de seus médio e baixo cursos apresenta uma concentração média de trítio de 0,66 UT, indicando um tempo de renovação de cerca de 150 anos, o que significa uma recarga muito baixa.

Para as águas subterrâneas das bacias do Rio Cedro, tem-se um valor médio aproximado de 1,8 UT para a concentração de trítio, o que proporciona um tempo de renovação compreendido entre 30 e 40 anos.

As amostras correspondentes aos mananciais que alimentam o Rio Pai João em períodos de estiagem apresentam uma concentração média de 1,4 UT, proporcionando um valor do tempo de renovação compreendido entre 50 e 60 anos.

Os poços situados nas proximidades de Montes Claros contém águas procedentes das precipitações dos últimos anos, com um tempo de renovação inferior a 20 anos.

**Isótopos Estáveis** - O diagrama  $\delta D - \delta^{18}O$  para todas as amostras de água analisadas é apresentado no gráfico 2. O conjunto de pontos que se acham alinhados ao longo de uma linha reta de evaporação corresponde a águas de rios, represa ou de poços localizados próximos a uma lagoa no baixo curso do rio Caititu. Logicamente esses poços estão sendo alimentados em grande parte por água dessa lagoa. Eliminando-se esses pontos, os demais se ajustam à equação  $d D = (6,97 \pm 0,48) d^{18}O + (4,66 \pm 1,99)$ . O coeficiente angular menor do que 8 indica a existência de águas que também experimentaram evaporação.



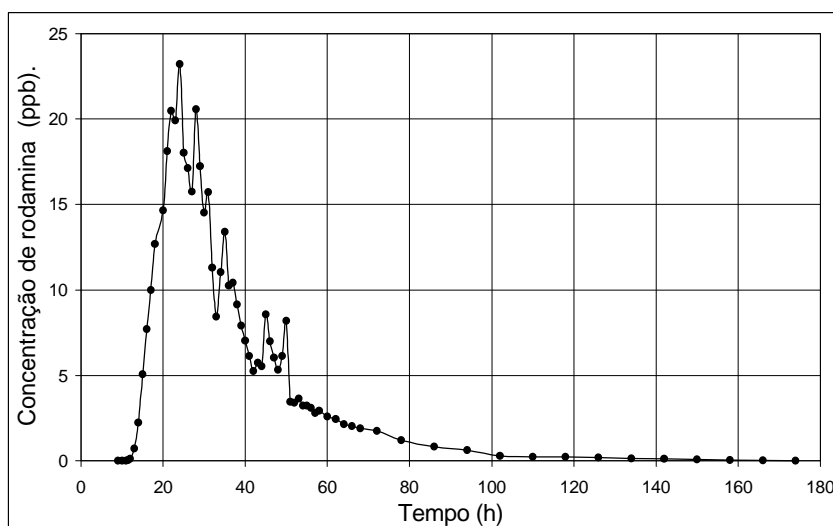
**Gráfico 2.** Diagrama  $\delta D - \delta^{18}O$  para todas as amostras de água analisadas.

Para a região de Montes Claros, os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam entre  $-4,94\text{‰}$  e  $-6,57\text{‰}$ . As amostras de poços ou de mananciais que não sofreram evaporação apresentam valores de  $\delta^{18}\text{O}$  mais negativos do que  $-6,0\text{‰}$ , correspondendo a águas procedentes de precipitações ocorridas em cotas mais elevadas da região.

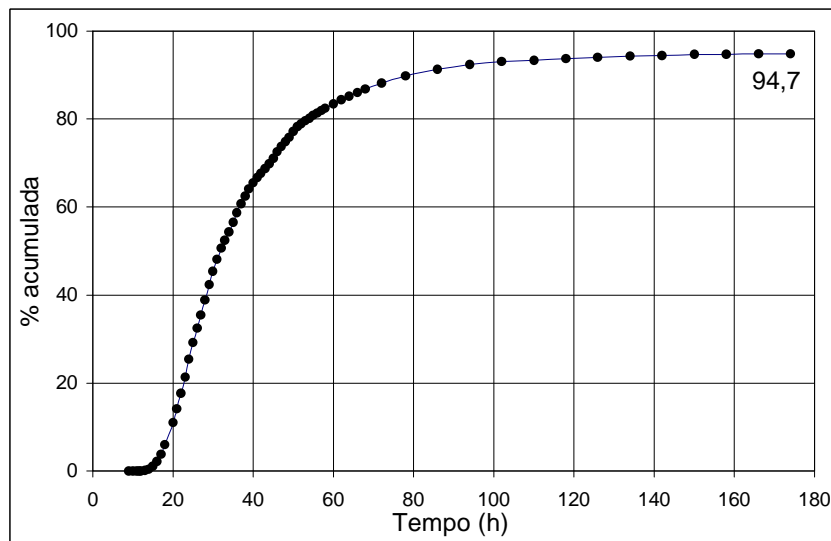
Para a bacia do rio Caititu, os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam entre  $-3,82\text{‰}$  e  $-7,29\text{‰}$ . A distribuição espacial da composição isotópica nessa bacia é bastante heterogênea, indicando a ausência de fluxos subterrâneos importantes para se produzir a mistura e homogeneização, dentro do aquífero, de águas infiltradas em diferentes áreas da bacia. Essa conclusão se encontra apoiada pela distribuição irregular dos parâmetros obtidos por análises físico-químicas. Ademais, não se encontrou nenhuma correlação aceitável entre a composição isotópica das águas subterrâneas e os diversos parâmetros físico-químicos ou concentrações iônicas.

**Recarga** - Os resultados disponíveis até o momento para a taxa de infiltração indicam um valor para a recarga compreendido entre 15 e 20 % da precipitação total anual para as duas regiões estudadas. Esse resultado é válido para áreas cobertas por camadas de materiais granulares.

**Interconexão** - Os gráficos 3 e 4 apresentam um teste de comunicação subterrânea realizado no Rio Cedro.



**Gráfico 3.** Curva de detecção do traçador na surgência da Fazenda Josimar.



**Gráfico 4.** Recuperação da massa do traçador correspondente à curva do gráfico 3.

Semelhantemente a outros quatro testes executados, sendo dois em outros trechos desse rio e dois em trechos do Rio Pai João, os resultados apresentam uma elevada recuperação da massa de traçador injetada, sempre superior a 90 %, indicando a continuidade do fluxo onde os cursos desses rios são subterrâneos. A ausência de perdas significativas nesses trechos subterrâneos tem especial relevância para a exploração futura dos aquíferos a montante das captações de água existentes.

**Conclusões** - Os estudos realizados permitiram identificar a origem das águas subterrâneas exploradas nas bacias dos Rios Pai João e Cedro. Os dados locais de recarga e de vazão indicam que os mananciais não podem drenar uma área cárstica tão grande, existindo a possibilidade de explorar o aquífero sem afetar a vazão desses rios. Em período de estiagem, as águas captadas nesses rios são mais antigas e procedem dos mananciais de cabeceira. Como os aquíferos sob os vales desses rios apresentam águas recentes, sua exploração pode ocorrer de forma independente.

Adicionalmente, águas com algumas dezenas de anos que migram para bacias adjacentes (Rio Pacuí, por exemplo) poderiam ser captadas através de galerias e conduzidas pelos leitos naturais desses rios. A perfuração progressiva dessas galerias supriria gradativamente as necessidades futuras de abastecimento. No caso extremo, as águas da bacia adjacente seriam transpostas.

No caso da bacia do rio Caititu, a distribuição irregular em planta dos diferentes parâmetros físico-químicos e isotópicos indica um fluxo subterrâneo lento e recarga produzida próxima aos poços.

Em linhas gerais, a “idade” da água subterrânea aumenta ao longo dos vales, podendo atingir até 150 anos no médio e baixo cursos desse rio. A direção do fluxo subterrâneo é mais ou menos perpendicular ao curso do rio e, provavelmente, dirigido no sentido de Sul a Norte.

### **CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS.**

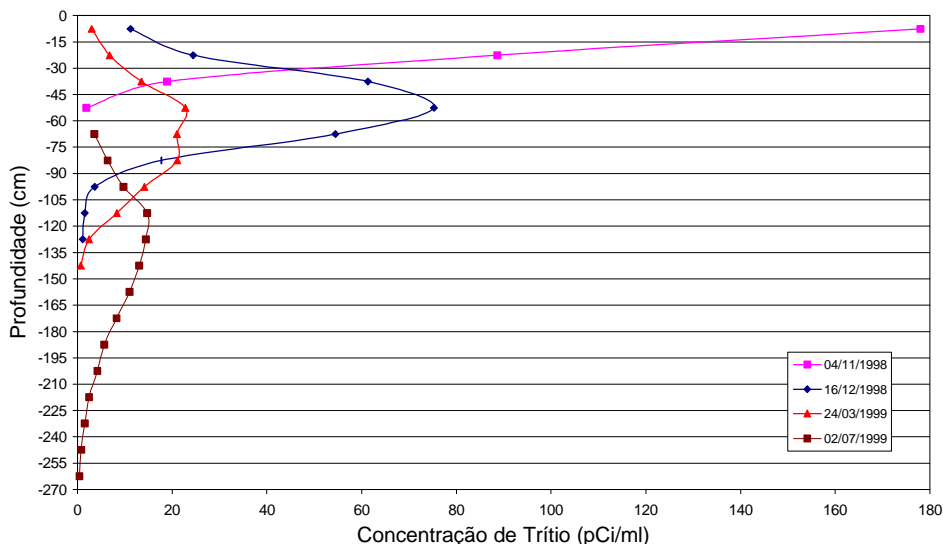
Encontra-se em andamento um projeto iniciado pelo CDTN/CNEN em junho de 1998 na região de Poços de Caldas, sul de Minas Gerais, que integra um programa de gestão geoambiental visando compatibilizar a preservação das fontes de águas minerais com o processo de ocupação urbana. O projeto, solicitado pela Prefeitura Municipal de Poços de Caldas, tem o apoio da COLAB/CNEN – Coordenação do Laboratório de Poços de Caldas, da CNEN, e o suporte financeiro da COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais, com a interveniência da FUNDEP/UFMG – Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais.

Cerca de cinquenta pontos de água, compreendendo fontes de águas minerais, poços, nascentes, rios e represas foram monitorados durante um ano (outubro de 1998 a novembro de 1999) para análises físico-químicas e de isótopos ambientais (trítio, deutério, oxigênio-18, carbono-13 e carbono-14). Em quatro parcelas de terreno de 18 m<sup>2</sup> cada, injetou-se trítio artificial para determinação da taxa de infiltração e da recarga dos aquíferos.

Scudino (1992) relata que o sistema geotermal de Poços de Caldas é domínio de um complexo vulcânico constituído de rochas alcalinas fraturadas, com elevados gradientes geotérmicos e a ocorrência natural de fontes termais com vazão total de 18 m<sup>3</sup>/h, a temperaturas de 40 a 44<sup>o</sup> C. Três zonas aquíferas são identificadas: uma zona rasa, onde predomina um ambiente oxidante, tem águas pouco mineralizadas, CO<sub>2</sub> elevado, pH neutro, tempos de trânsito de 1 a 10 anos e com isótopos <sup>18</sup>O e <sup>2</sup>H relativamente concentrados, refletindo a composição das precipitações atuais. Na zona aquífera intermediária, as águas entre 100 e 200 metros apresentam idades de 60 a 3850 anos e sua composição química e isotópica sugere misturas em diferentes frações com as águas de circulação profunda. As águas termais, oriundas da zona aquífera profunda, representam o processo final da evolução química e isotópica das águas subterrâneas, originando-se de precipitações pretéritas, com baixo conteúdo em <sup>18</sup>O e <sup>2</sup>H, distinguindo-se das águas da zona rasa pelo ambiente redutor, tempos de trânsito da ordem de 12500 anos e pela alta concentração de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> e sílica, acompanhados de elevados



apresenta a evolução da nuvem de trítio artificial em um dos quatro testes de infiltração realizados.



**Gráfico 6.** Evolução em profundidade da nuvem de trítio na Fazenda Córrego do Meio, Poços de Caldas - MG

A injeção de cerca de 0,8 mCi de trítio diluídos em 50 litros de água ocorreu em 30/10/98. Essa água tritiada foi aspergida na superfície de uma parcela de terreno de 3 metros de largura por 6 metros de comprimento. A seguir, 300 litros de água isenta de trítio foram acrescentados para forçar a penetração inicial do traçador e reduzir a taxa de evaporação.

As curvas do gráfico 6 expressam a concentração de trítio em amostras de água extraídas do solo a cada 15 centímetros de profundidade. Falta plotar nesse gráfico a curva correspondente à última amostragem, ocorrida em 12/11/99, cujas análises encontram-se em andamento.

Os dados disponíveis até o momento permitiram a elaboração do resumo apresentado na Tabela 1, com índices pluviométricos tomados na COLAB/CNEN. A ocorrência de microclimas na região vai demandar um estudo mais minucioso, onde se leve em consideração outras estações pluviométricas.

Data	Profundidade do Pico (cm)	Profundidade da Frente (cm)	Chuva no Período (mm)	Densidade Úmida (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Recarga (g/cm <sup>2</sup> )	Porcentagem da Precipitação (%)
04/11/98	7,5	37,5	-	-	-	-	-
16/12/98	52,5	97,5	270	1,57	23,5	17	61
24/03/99	67,5	142,5	1024	1,55	21,3	5	5
02/07/99	127,5	247,5	205	1,47	22,6	20	97

**Tabela 1.** Recarga do aquífero na Fazenda Córrego do Meio – Poços de Caldas, MG.

Como pode ser observado, as recargas mais intensas, em termos de valor absoluto, ocorrem no início do período chuvoso e nos meses subsequentes a esse período, correspondendo a 61 e 97 % da precipitação, respectivamente. Já em pleno período chuvoso a recarga é mínima, correspondendo somente a 5 % da precipitação.

A recarga total para o período compreendido entre 04/11/98 e 02/07/99 é de 42 g/cm<sup>2</sup>, ou seja, cerca de 28 % da precipitação.

**Conclusões** - As informações obtidas até o momento com os estudos isotópicos e hidrogeoquímicos realizados pelo CDTN/CNEN têm permitido agrupar os pontos amostrados conforme os três aquíferos previstos no modelo proposto para a região. A análise de índices físico-químicos associados a dados isotópicos segundo sua distribuição espacial permitirá estimar a trajetória da água subterrânea, a qual poderá servir de base para os planos de uso e ocupação do solo, permitindo assim a preservação das fontes de águas minerais.

Por outro lado, a extrapolação para outras áreas geologicamente compatíveis das informações sobre recarga, resultantes dos quatro experimentos em andamento, proporcionará a comparação com dados de recarga obtidos por métodos tradicionais. Tal procedimento permitirá certamente uma exploração mais racional da água subterrânea.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGUÁS, L. A. et alii. Changes of soil water balance due to forest clearing in the central Amazon region. In: Proceedings of the XXVI Congress of the IAH. Solutions” 95. Managing the effects of man’s activities on groundwater. Edmonton, IAH, 1995, p. 1-6.



- ATHAVALE, R. et alii. Estimation of recharge to the phreatic aquifers of the Lower Maner Basin, India, by using the tritium injection method. Journal of Hydrology, **45**, 1980, p. 185 - 202.
- MINARDI, P.S.P et alii. Pesquisa de recursos hídricos dos aquíferos cársticos Caititu e Pai João-Cedro. Belo Horizonte, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1996. (Relatório Técnico nº RC-CT7-006/96).
- MUNNICH , K. O. Moisture movement in the unsaturated zone. In: Guidebook of Nuclear Techniques in Hydrology, Vienna, IAEA, 1983, p. 203 – 222. (Tech. Rep. Ser. Nº 91).
- SCUDINO, P. C. B. Caracterização hidrodinâmica do meio aquífero fraturado na área de Poços de Caldas e adjacências, mediante a análise do conteúdo radioisotópico das águas subterrâneas. Belo Horizonte, UFMG, 1992, 132p. (Dissertação de mestrado).
- ZIMMERMANN, U. et alii. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes. In: Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle. Geophysical Monograph Nº 11. Washington, D. C., American Geophysical Union, 1967, p 28-34.
- ZUBER, A. Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater systems. In: FRITZ, P. & FONTES, J. Ch. Handbook of environmental isotope geochemistry. Amsterdam, Elsevier, 1986, ch. 1., v. 2, p. 1 – 59.