

**UM ESTUDO DE ESCOAMENTOS SUBTERRÂNEOS  
COM TRAÇADORES NATURAIS**

**FOR**

**PAULO SÉRGIO PELÓGIA MINARDI <sup>1</sup>**

**E**

**ROBERALDO CARVALHO DE SOUZA <sup>2</sup>**

**RESUMO...** Esse trabalho apresenta os resultados de um estudo em escoamentos subterrâneos utilizando-se traçadores naturais. O objetivo principal foi determinar a possibilidade de intercomunicação entre duas bacias hidrológicas adjacentes, usando-se três poços e nove fontes na região sul do estado de Minas Gerais. A técnica utilizada para tal fim incluiu além dos estudos hidrogeoquímicos, medições de Trítio, isótopos estáveis e Carbono-14. Os resultados obtidos referem-se à quatro campanhas de campo realizadas entre 1981 e 1982 e mostraram a distinção entre os aquíferos e suas relações com as fontes na região circunvizinha.

- 
1. Mestre, Curso de Pós-Graduação em Ciências Nucleares e Técnicas Nucleares - UFMG/Belo Horizonte.
  2. Ph.D, Departamento de Engenharia Eletromecânica/CTEC - UFAL - Cidade Universitária - 57000 - Maceió, Alagoas.

## INTRODUÇÃO

A utilização de traçadores em estudos hidrogeológicos, como um meio eficaz de se obter informações em investigações do sub-solo, é hoje uma ferramenta versátil de extrema utilidade. Algumas de suas aplicações são enfatizadas nesse trabalho. Elas fazem parte de um estudo mais amplo, que vem sendo realizado no divisor de águas entre as bacias do rio Sobradinho e do rio das Antas, na região sul do Estado de Minas Gerais.

O principal objetivo do estudo é confirmar a estanquidade do divisor, apontada por estudos convencionais, e avaliar o risco de infiltração para a bacia do rio das Antas, através do sub-solo, dos rejeitos oriundos da operação de um complexo industrial situado na região. Por esta razão foram perfurados três poços na região do divisor, com a finalidade de se investigar o comportamento do aquífero.

Uma cobertura de solos transportados e de alteração se sobrepõe ao substrato rochoso. Os solos são materiais finos de origem coluvionar ou aluvionar, constituídos predominantemente por argila siltosa, às vezes arenosa, com restos vegetais e pequenos fragmentos de rocha alterada. Sua espessura mais provável, no perfil longitudinal ao colo, é da ordem de 27 metros. A transição solo-rocha, da ordem de 5 metros, é relativamente homogênea, com fissuras em geral de aberturas pequenas, frequentemente preenchidas com materiais argilosos. O substrato rochoso é constituído predominantemente por tinguaito de estrutura fina, com pseudo lucita de coloração clara e granulação fina.

## METODOLOGIA

Os traçadores naturais da água permitem obter informações sobre a origem e o comportamento da água no aquífero, incluindo relações existentes entre águas de diferentes aquíferos ou entre essas e águas superficiais.

Geralmente faz-se uso de dois tipos de traçadores:

a. Materiais dissolvidos na água:

Ions dissolvidos

$^{14}\text{C}$  presente na forma de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$  ou  $\text{CO}_3^{-2}$

Esses materiais representam um comportamento variável com o tempo e com o tipo de material em contato com a água.

b. Traçadores isotópicos que fazem parte da própria molécula d'água:

Tritio de origem termonuclear, sob a forma de THO (radioativo).

D e  $^{18}\text{O}$ , isótopos estáveis, que formam moléculas do tipo DHO e  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .

Esses traçadores têm, geralmente, um comportamento igual ao da água. São traçadores quase ideais.

## RESULTADOS

### HIDROQUÍMICA

Os resultados das análises químicas realizadas nos três poços e em nove fontes da região, Ver Figura 1, apresentados nas tabelas 1, 2 e 3, permitem as seguintes observações:

Excetuando as fontes F7 e F9, os teores de sais dissolvidos são muito baixos, quase da mesma ordem de grandeza que para a água de chuva, indicando que parece se tratar de águas muito jovens, infiltradas em áreas pouco afastadas. As águas superficiais dos poços CDTN-02 e CDTN-03, responsáveis pelos fluxos verticais descendentes, apresentam condutividade semelhantes às fontes F1 e F6, sugerindo que possuem a mesma origem. As águas mais profundas teriam, portanto, uma origem diferente, com área de recarga possivelmente mais afastada da região em estudo. No caso do poço CDTN-01, o fluxo vertical ascendente produz mistura em toda a coluna piezométrica. As fontes F7 e F9 apresentam elevada condutividade, com grande concentração de  $\text{CaSO}_4$ , Fe e Mn, o que indica origem diferente de todas as outras.

A composição química geral dos sais dissolvidos nas fontes é razoavelmente semelhante, segundo o diagrama PIPER-HILL-LANGELIER. O poço CDTN-01 se diferencia destas fontes por possuir uma concentração maior de  $\text{CO}_3\text{H}^-$ . A água superficial do poço CDTN-02 tem uma composição química semelhante a das fontes, mas, como no caso do poço CDTN

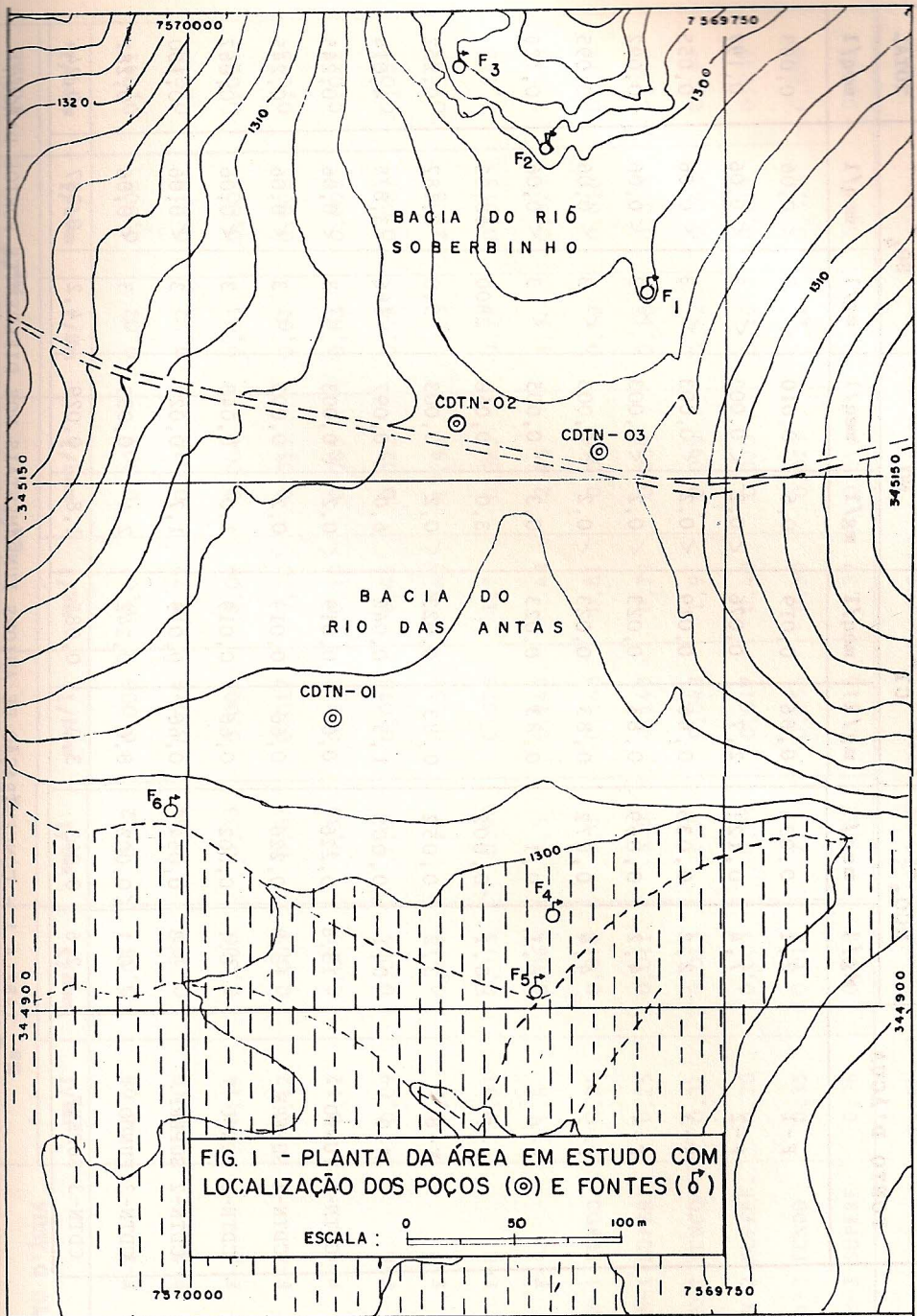


FIG. 1 - PLANTA DA ÁREA EM ESTUDO COM LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS (⊙) E FONTES (⊕)

PONTO D'ÁGUA	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		TOTAL
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	
F-1	2,1	0,034	0,66	0,019	0,6	0,010	< 3	< 0,06	0,063
F-2	7,4	0,121	2,7	0,076	< 0,2	< 0,003	< 3	< 0,06	0,197
F-3	2,2	0,036	0,66	0,019	< 0,2	< 0,003	< 3	< 0,06	0,055
F-4	4,2	0,069	0,83	0,023	< 0,2	< 0,003	< 3	< 0,06	0,092
F-5	4,4	0,072	0,83	0,023	< 0,2	< 0,003	< 3	< 0,06	0,095
F-6	6,1	0,1	0,83	0,023	0,3	0,005	< 3	< 0,06	0,128
F-7	< 0,1	< 0,002	-	-	3,0	0,048	2800	58,33	-
F-8	3,2	0,052	0,83	0,023	< 0,2	0,003	9,0	0,187	0,262
F-9	< 0,1	< 0,002	1,5	0,042	6,0	0,097	186	3,875	4,014
CDTN-1 FUNDO	13,8	0,226	0,66	0,019	< 0,2	< 0,003	< 3	< 0,06	0,245
CDTN-1 SUPERF.	13,8	0,226	0,66	0,019	< 0,2	< 0,003	< 3	< 0,06	0,245
CDTN-2 FUNDO	< 0,1	0,002	0,66	0,019	3,0	0,048	< 3	< 0,06	0,067
CDTN-2 SUPERF.	3,3	0,054	0,66	0,019	1,7	0,027	< 3	< 0,06	0,100
CDTN-3 FUNDO	< 0,1	< 0,002	8,6	0,242	2,4	0,039	< 3	< 0,06	0,281
CDTN-3 SUPERF.	2,6	0,043	3,0	0,085	1,8	0,029	4,2	0,087	0,244

TABELA 1 - CONCENTRAÇÃO DE ANIÕES FUNDAMENTAIS NOS DIFERENTES PONTOS D'ÁGUA

PONTO D'ÁGUA	Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Ca <sup>++</sup>		Mg <sup>++</sup>		TOTAL
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	
F-1	0,08	0,03	0,22	0,006	0,07	0,003	0,02	0,002	0,041
F-2	0,18	0,008	0,64	0,016	0,72	0,036	0,22	0,018	0,078
F-3	0,14	0,006	0,33	0,008	0,09	0,004	0,03	0,002	0,020
F-4	0,12	0,005	0,67	0,017	0,30	0,015	0,07	0,006	0,043
F-5	0,12	0,005	0,39	0,010	0,10	0,005	0,03	0,002	0,022
F-6	0,09	0,004	1,0	0,026	0,45	0,022	0,09	0,007	0,059
F-7	3,6	0,157	13	0,332	360	17,96	25	2,06	20,509
F-8	0,31	0,013	0,90	0,023	1,7	0,085	0,19	0,015	0,142
F-9	1,5	0,065	9,5	0,243	43	2,15	3,9	0,321	2,779
CDTN-1 FUNDO	0,24	0,010	5,8	0,148	0,81	0,040	0,19	0,016	0,214
CDTN-1 SUPERF.	0,25	0,011	5,6	0,143	0,79	0,039	0,18	0,015	0,208
CDTN-2 FUNCO	0,31	0,013	1,7	0,043	1,9	0,095	0,52	0,043	0,194
CDTN-2 SUPERF.	0,20	0,009	0,66	0,017	0,40	0,020	0,16	0,013	0,059
CDTN-3 FUNDO	0,35	0,015	2,2	0,056	0,30	0,015	0,12	0,010	0,096
CDTN-3 SUPERF.	0,36	0,016	0,62	0,016	0,32	0,016	0,13	0,011	0,059

TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO DE CATIONS FUNDAMENTAIS NOS DIFERENTES PONTOS D'ÁGUA

PONTO D'ÁGUA	CONDUTIVIDADE ( $\mu s$ )			pH		DEFICIT DE CATIONS			$\delta^{18}O$ (%)	CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIU U.T.
	FEV/82	MAR/82	IN LOCO	LAB.	meq/l	%	(*)			
F-1	8,6	7	4,4	-	0,022		35	-7,5	$14,0 \pm 0,6$	
F-2	12,4	9	4,9	-	0,119		60	-8,3	$10,6 \pm 0,7$	
F-3	36,8	4	5,1	4,7	0,035		64	-7,9	$10,5 \pm 0,4$	
F-4	6,1	3	5,5	4,9	0,049		53	-8,3	$7,1 \pm 0,7$	
F-5	4,1	3	5,9	5,0	0,073		77	-8,2	$9,9 \pm 0,5$	
F-6	12,4	5	6,0	5,8	0,069		54	-6,2	$10,3 \pm 0,5$	
F-7	3267	1700	3,0	4,0	-		-	-8,8	$10,0 \pm 0,5$	
F-8	15,1	26	4,4	5,2	0,120		46	-7,2	$10,5 \pm 0,4$	
F-9	346,3	360	5,4	4,2	1,235		31	-9,3	$8,3 \pm 0,5$	
CDTN-1 FUNDO	27,6	18	-	5,4	0,031		13	-8,3	$2,9 \pm 0,5$	
CDTN-1 SUPERF.		19	-	5,2	0,037		15	-8,3	$13,0 \pm 0,5$	
CDTN-2 FUNDO	34,9	45	-	4,1	-		-	-7,9	$12,5 \pm 0,5$	
CDTN-2 SUPERF.		5	-	4,9	0,041		41	-8,6	$13,1 \pm 0,6$	
CDTN-3 FUNDO	22,0	30	-	3,8	0,185		66	-8,0	$12,0 \pm 0,6$	
CDTN-3 SUPERF.		6	-	4,9	0,185		76			

(\*) Porcentagem em relação a concentração total de anions.

TABELA 3 - CONDUTIVIDADE, pH E DÉFICIT DE CATIONS NAS DIFERENTES AMOSTRAS.

TABELA 4 - RESULTADOS DE

OXIGÊNIO-18 E TRÍTIU.

-03, caracteriza-se por uma concentração maior de  $\text{NO}_3^-$ . Como o poço CDTN-01 não contém  $\text{NO}_3^-$  e sim uma concentração relativamente elevada de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  a água desse poço deve ter uma origem diferente da água dos outros poços, justificada também, pela alternância nas direções do fluxo vertical. Na realidade, o fluxo vertical ascendente do poço CDTN-01 emascara a situação e impede conhecer a composição química verdadeira da água existente nos níveis superiores, que poderia ser semelhante a das águas superficiais dos outros poços e das fontes.

#### OXIGÊNIO - 18

Os valores de  $\delta_{18}$  obtidos encontram-se na tabela 4. O valor médio de -8,3% é normal para a região em estudo, comparado com dados conhecidos de Brasília (-4,8% para o período útil de recarga compreendido entre outubro e abril) e Rio de Janeiro (-5,3%). A diferença verificada com respeito a essas duas estações, pode ser justificada pelo conhecido efeito de altitude, que em geral corresponde a um decréscimo de 0,3% para cada 100m de altitude.

As fontes F6, F8 e talvez F1 apresentam valores de  $\delta_{18}$  mais positivos, devido provavelmente a uma evaporação prévia à infiltração ou depois do seu afloramento.

O valor médio de  $\delta_{18}$  para as fontes F2, F3, F4 e F5 é de -8,2%, o que corresponde possivelmente a águas não evaporadas após sua precipitação.

As águas superficiais dos poços CDTN-02 e CDTN-03 têm valores de  $\delta_{18}$  semelhante aos correspondentes às fontes F2 e F5. As águas mais profundas têm  $\delta_{18}$  mais negativos, indicando uma possível recarga a cotas mais elevadas (150 a 250m de diferença) e um percurso maior através do sub-solo, o que justifica a maior salinidade apresentada em relação às águas superficiais.

O poço CDTN-01 tem  $\delta_{18}$  semelhante ao das águas profundas dos outros poços, mas isso não implica necessariamente em uma interconexão entre ambos.



O  $^{14}\text{C}$  foi analisado somente no poço CDTN-01, em decorrência do fluxo vertical ascendente, possivelmente causado por águas mais antigas procedentes dos tinguaitos. O resultado obtido corresponde a uma atividade específica de  $105,4 \pm 2,1\%$  em relação ao padrão de carbono moderno. O  $\delta_{13}$  em relação ao padrão internacional de carbono de formação Peedee de Carolina do Sul (USA) é de  $-14,8\%$ , coerente com uma procedência de carbono de tipo biogênico.

A amostra analisada corresponde a carbono recente e o valor superior a 100% do padrão C moderno explica-se pela presença de  $^{14}\text{C}$  liberado nas explosões nucleares, ocorridas entre 1952 e 1963. Assim, trata-se de carbono moderno procedente de plantas que cresceram durante este período ou em época posterior.

#### TRÍTIU

Os resultados das análises de trítio são apresentadas na tabela 4, e foram comparados com concentrações de trítio nas precipitações para as estações da WMO-IAEA existentes em Brasília e Rio de Janeiro. Como não se conhecem as concentrações locais nos últimos 30 anos, e a área em estudo tem uma posição intermediária entre essas duas estações, as médias dos valores correspondentes às estações foram utilizadas na comparação.

Com exceção do poço CDTN-01, os valores obtidos mostram que as águas são muito modernas. Para os poços CDTN-02 e CDTN-03, as concentrações de trítio para as águas da superfície e do fundo são coerentes e reforçam as conclusões obtidas para o  $\delta_{18}$ , que indicam uma possível recarga a cotas mais elevadas para as águas mais profundas.

Para o poço CDTN-01 o valor obtido indica que se trata de uma mistura de águas anteriores a 1954 e águas modernas (de 1954 até hoje). Este misturamento é explicado pela ocorrência de fluxo vertical ascendente, que promove o misturamento de águas antigas provenientes dos tinguaitos e águas modernas das camadas mais superficiais. Este resultado não é necessariamente incoerente com o resultado de  $^{14}\text{C}$ , uma vez que o  $^{14}\text{C}$  moderno encontrado é de origem biogênica, parecendo lógico concluir que sua presença é devida à parcela de águas modernas superficiais.

## CONCLUSÕES

O conjunto de testes com traçadores artificiais (Ver trabalho sobre o mesmo tema utilizando-se traçadores artificiais dos mesmos autores, a ser apresentado) realizados nos três poços indicam, de forma inequívoca, a existência de uma camada superficial permeável que atinge até 7 metros de solo transportado. Abaixo, encontra-se uma camada impermeável ou pouco permeável, compreendida entre 6 e 10m para os poços CDTN-01 e CDTN-02 e entre 6 e 14m para o poço CDTN-03, aproximadamente.

No caso dos poços CDTN-02 e CDTN-03, encontra-se a seguir, até 19m em CDTN-02 e 26m em CDTN-03, uma camada altamente permeável, que não foi encontrada no CDTN-01.

As duas camadas permeáveis contêm água com origens diferentes. A camada superficial recebe água de infiltração direta em zonas próximas aos poços e a camada mais profunda recebe água por infiltração em cotas mais elevadas. As reduzidas concentrações salinas e as concentrações de trítio indicam que se trata de águas jovens com um percurso curto nos materiais do sub-solo.

A água das fontes parecem estar relacionadas com a camada permeável superficial e não tem relação alguma com a camada principal mais profunda. Este fato, somado ao fato de existir uma camada impermeável entre duas camadas permeáveis, torna muito pequena a probabilidade de infiltração da água da barragem para a camada mais profunda.

### Bibliografia Consultada:

- PLATA, BEDMAR, A. - "Isótopos em Hidrologia".  
Madri, Alhambra, 1972.  
- Comunicações Pessoais.