

ESTUDO DOS AQUÍFEROS DAS BACIAS DOS RIOS GURGUÊIA E FIDALGO, ESTADO DO PIAUÍ, UTILIZANDO ISÓTOPOS AMBIENTAIS

A. PLATA, W. SANCHEZ e C. SZULAK

PUBLICAÇÃO IEA N.º 315

Novembro — 1973

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SÃO PAULO — BRASIL

**ESTUDO DOS AQUÍFEROS DAS BACIAS DOS RIOS GURGUÉIA E FIDALGO,
ESTADO DO PIAUÍ, UTILIZANDO ISÓTOPOS AMBIENTAIS**

A. Plata, W. Sanchez, C. Szulak

**Divisão de Aplicação de Radioisótopos
na Engenharia e na Indústria
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Publicação IEA Nº 315
Novembro - 1973**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet Presidente
Prof.Dr.Emilio Mattar – Vice-Presidente
Prof.Dr.José Augusto Martins
Dr.Affonso Celso Pastore
Prof.Dr.Milton Campos
Eng^o Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Rômulo Ribeiro Pieroni

ESTUDO DOS AQUÍFEROS DAS BACIAS DOS RIOS GURGUÉIA E FIDALGO, ESTADO DO PIAUÍ, UTILIZANDO ISÓTOPOS AMBIENTAIS

A. Plata, W. Sanchez, C. Szulak

RESUMO

Medindo-se as concentrações dos isótopos ambientais, ^3H (trítio), ^2H (deutério), ^{18}O (oxigênio-18) e ^{14}C (carbono-14), nas águas dos aquíferos das bacias do Rio Gurguéia (formação Cabeças) e Fidalgo (formação Serra Grande), estudaram-se: a) interconexão das águas de lagoas e aquíferos subjacentes; b) localização de zonas de recarga dos aquíferos e determinação da recarga média anual; c) possibilidade de mistura de águas antigas e recentes; d) dados gerais sobre a idade das águas subterrâneas; e) possibilidades de drenagem das águas subterrâneas para os rios Gurguéia e Canindé.

Analisaram-se 40 amostras de água, sendo treze (13) provenientes de lagoas e vinte e sete (27) de poços. No caso das lagoas, coletaram-se amostras na sua parte central ou na saída das mesmas. Sendo as lagoas de pequenas dimensões, admirou-se que a concentração de ^3H era uniforme em toda massa d'água.

As medições dos isótopos estáveis ^2H e ^{18}O proporcionaram dados para investigar a interconexão entre águas das lagoas e dos aquíferos subjacentes - a contribuição dos rios na recarga dos aquíferos e as modalidades de recarga dos aquíferos em função da litologia e textura das formações de superfície.

Este trabalho faz parte do Estudo Geral de Reconhecimento para Irrigações nos Vales dos Rios Gurguéia e Fidalgo, Piauí, realizado pelo consórcio OESA-TECNOSOLO-OTI-EPTISA por solicitação do DNOCS.

1.0.0 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Concomitante aos estudos de reconhecimento dos aquíferos dos vales dos rios Gurguéia e Fidalgo por meio de técnicas radioisotópicas, realizaram-se estudos com isótopos ambientais.

Estes estudos de reconhecimento estiveram a cargo do consórcio OESA-TECNOSOLO-OTI-EPTISA, por solicitação do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, DNOCS. Coube ao Instituto de Energia Atômica-IEA, por meio de sua Divisão de Aplicação de Radioisótopos na Engenharia e na Indústria-DAREI, a coleta das amostras d'água e a análise dos resultados obtidos.

A equipe técnica do IEA, assim como a coordenação dos trabalhos, estiveram sob a orientação do Dr. Antonio Plata Bedmar, perito em hidrologia pertencente ao quadro de colaboradores da Agência Internacional de Energia Atômica-IAEA.

Colaboraram também para a consecução do presente estudo os seguintes órgãos:

- a) - Instituto de Pesquisas Radioativas-IPR, da Universidade Federal de Minas Gerais. A Divisão de Radioisótopos deste instituto, dependente da Comissão Nacional de Energia Nuclear, encarregou-se de todas as medidas de trítio.
- b) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura-CENA, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Este centro realizou todas as determinações dos

isótopos estáveis, deutério e oxigênio-18, nas amostras de água, e as relações $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ utilizadas para a datação, com ^{14}C .

- c) - Centro de Pesquisas Geocronológicas, do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Neste centro estão em andamento as determinações de ^{14}C nas amostras de carbonatos obtidas de águas subterrâneas.

1.1.0 - INTRODUÇÃO

Utilizaram-se neste projeto os isótopos ambientais incorporados na água, para estudar uma série de fenômenos que serão descritos adiante. Consideraram-se três tipos de isótopos:

- a) - trítio, de origem termonuclear;
- b) - os isótopos estáveis, deutério e oxigênio-18;
- c) - Carbono-14, de origem cosmogênica

Os isótopos incluídos nos itens a e b fazem parte da própria molécula de água, e por isso, comportam-se como traçadores praticamente ideais no subsolo, ou seja, não são retidos pelos materiais sólidos do meio e circulam com a mesma velocidade que o restante da massa de água. O mesmo não ocorre com o carbono-14, se bem que, como será visto adiante, as características litológicas dos aquíferos estudados são muito favoráveis para que a sua interação com o meio não seja de muita importância.

A técnica experimental para estes estudos consistiu, simplesmente, na análise das concentrações dos isótopos citados, em amostras de água coletadas adequadamente.

2.0.0 - EXPERIÊNCIAS COM TRITIO

A determinação da concentração de trítio em águas superficiais e subterrâneas teve os seguintes objetivos:

- a) - determinar as possíveis interconexões entre lagoas e os aquíferos subjacentes;
- b) - localizar as zonas de recarga dos aquíferos e avaliar a recarga média anual;
- c) - verificar a possibilidade de mistura de águas antigas com águas recentes, o que seria particularmente interessante em relação com as datações realizadas com carbono-14, no aquífero Cabeças;
- d) - obter informações gerais sobre a idade das águas subterrâneas;
- e) - estudar a possível drenagem das águas subterrâneas para os rios Gurguéia e Fidalgo.

Sabe-se que o trítio (^3H ou simplesmente T) é um isótopo do hidrogênio, com número de massa igual a 3. É o único isótopo radioativo conhecido deste elemento e se desintegra com emissão de partículas beta, com um período de semidesintegração de 12,3 anos.

A presença desse radioelemento deve-se às seguintes causas:

- a) - emissão direta do Sol;
- b) - reações nucleares induzidas pela radiação cósmica nos gases da atmosfera, consistindo principalmente na reação de prótons de alta energia com nitrogênio e oxigênio.

c) - explosões termonucleares (bombas de hidrogênio) efetuadas na atmosfera, a partir de 1952.

As duas primeiras fontes de trítio (trítio cosmogênico) têm atuado permanentemente, produzindo concentrações compreendidas entre 2 e 10 unidades de trítio (U.T.) corresponde à relação, em número de átomos presentes, $T/H = 10^{-14}$, equivalente a $3,2 \cdot 10^{-3}$ microcuries por metro cúbico de água). Por outro lado, devido às grandes quantidades de trítio liberado na atmosfera pelas explosões termonucleares, a concentração deste isótopo nas precipitações chegou a alcançar valores até mil vezes maiores que as existentes em períodos anteriores ao início destas explosões. O trítio liberado na atmosfera dá lugar à formação de moléculas de água do tipo THO, sendo, então, incorporado ao ciclo hidrológico. Devido à desintegração natural do isótopo, as concentrações em águas anteriores a 1952 não são detectáveis na atualidade e, portanto, qualquer atividade presente será de origem termonuclear.

Não existem dados das concentrações de trítio das precipitações na região estudada. Portanto, foi necessário fazer-se uma estimativa das mesmas, baseando-se em dados conhecidos de áreas próximas, em informações que se possui sobre a distribuição de trítio em escala mundial e em concentrações relativas, para diversas estações de controle, durante os últimos 20 anos.

Em virtude desta falta de dados, a estimativa em questão teve por base os valores obtidos pela rede estabelecida pela Agência Internacional de Energia Atômica-IAEA e pela Organização Meteorológica Mundial-OMM, durante o ano de 1965, em regiões próximas à zona em estudo. Estes valores estão indicados na Tabela 1, a qual inclui as concentrações médias mensais destas estações e as concentrações médias anuais. Como estas últimas não diferem demasiado entre si, é aceitável utilizar a média das concentrações médias mensais, salvo à correspondente ao mês de setembro; para esta tem-se apenas três valores e além disso muito baixos. A variação destas concentrações está representada na Figura 1.

A medida que se avança para o interior dos continentes, a tendência das concentrações de trítio é aumentar. Isto é facilmente observável nos dados constantes da Tabela 1. As concentrações em Manaus e Brasília são superiores àquelas apresentadas pelas estações costeiras. A única exceção é o Rio de Janeiro, que apresenta concentrações maiores, possivelmente, por causas meteorológicas locais.

Tomou-se, para a zona em estudo e para o ano de 1965, um valor médio para a concentração de trítio igual a 32 U.T.. A partir deste valor e tomando como padrões as distribuições de outras zonas mais conhecidas (Ottawa, Viena etc.), calcularam-se as concentrações para os anos seguintes, ou seja, admitiu-se que os valores relativos tenham se mantido constantes. O resultado desta avaliação está indicada na Figura 2. A linha de traço descontínuo representa as concentrações que teriam atualmente as amostras de água tomadas de precipitações de anos passados.

2.1.0 - RESULTADOS OBTIDOS

2.1.1. - Bacia do Rio Gurguéia

Desta bacia analisaram-se 18 amostras de água: 8 provenientes de lagoas e 10 de poços. As

TABELA 1

Concentrações de trítio, obtidas pela rede IAEA-OMM, para as precipitações de 1965, em diversas estações do Brasil.

Estação \ Mês	Belém	Manaus	Fortaleza	Natal	Salvador	Brasília	Rio de Janeiro	Média Mensal
Janeiro						47,5	50,0	49,7
Fevereiro				59,6	15,3		41,0	38,6
Março	38,5			17,0	13,2		36,0	26,2
Abril	34,0		17,8	12,1	45,2		33,5	26,6
Maio			44,5	12,7	14,5	19,1		22,7
Junho	31,5	25,0	25,4	16,7	11,7	19,3		21,6
Julho	20,1	50,0		13,9	11,9	43,3	24,0	27,2
Agosto	23,4			12,3	12,9		42,0	22,6
Setembro	17,0			11,6	13,6			14,1
Outubro	26,9	30,6		65,7	20,3	36,0	47,0	38,1
Novembro	23,3	41,7		66,3	30,3	43,9		38,9
Dezembro	24,0	39,8		37,3	24,8	52,4	32,5	35,1
Média Anual	26,7	37,4	29,2	28,6	19,4	37,3	38,2	

TABELA 2

Concentração de Trítio em diversas lagoas
da bacia do Rio Gurguéia.

LAGOA		CONCENTRAÇÃO
NÚMERO	TOPONÍMIA	U. T.
L - 2	São Francisco (Rio Grande do Piauí)	$5,0 \pm 0,4$
L - 5	Impueira	$7,5 \pm 0,6$
L - 6	Parnaguá	$10,2 \pm 0,7$
L - 7	Horta (Manoel Emídio)	$11,2 \pm 0,5$
L - 9	Malícia (Bertolínia)	$6,7 \pm 0,5$
L - 10	Da Velha (Landri Sales)	$10,1 \pm 0,4$
L - 11	Do Morro (Jerumanha)	$10,5 \pm 0,5$
L - 12	Angico Branco (Eliseu Martins)	$6,6 \pm 0,7$
CONCENTRAÇÃO MÉDIA		8,5

concentrações de trítio obtidas das primeiras estão indicadas na Tabela 2. As amostras originárias foram coletadas ou em um ponto mais ou menos central ou na sua extremidade de juzante. Devido ao tamanho reduzido de quase todas estas lagoas, pode-se supor que a concentração seja uniforme em toda a massa de água. Os resultados obtidos nas amostras provenientes dos poços estão indicados na Tabela 3, juntamente com as formações atravessadas, as formações existentes na superfície e a altura da coluna d'água. Esta última é importante para a avaliação da recarga, como será visto posteriormente.

Relativamente aos valores de concentração do trítio indicados na Tabela 3, cumpre esclarecer que a obtenção de uma concentração inferior a um dado valor, implica que esta concentração é inferior à margem de erro inerente ao processo de medição. Esta margem de erro corresponde a duas vezes o desvio padrão e foi escolhida para se ter uma confiabilidade de 96%.

2.1.1.1 - Interpretação dos resultados obtidos em lagoas

As concentrações de trítio nas lagoas oscilam entre 5 a 11 U.T., com um valor médio de 8,5 U.T. e praticamente igual a concentração média das precipitações para o ano de 1972 (Figura 2). Isto indica, por um lado, que as concentrações médias inferidas para as precipitações dos últimos anos na área do projeto estão razoavelmente corretas e, por outro, que a proporção de água de precipitações anteriores a 1972 existente nestas lagoas deve ser muito baixa ou mesmo nula. As variações de concentração de uma lagoa para outra pode ser justificada considerando-se exclusivamente as oscilações sazonais da concentração de trítio nas precipitações (Figura 1).

Coletaram-se as amostras de água durante o período de 5 a 30 de junho de 1972. Nesta época, algumas destas lagoas estavam ainda sendo alimentadas por fluxos superficiais, enquanto que outras haviam tido este tipo de alimentação pouco tempo antes. Portanto, não se pode descartar a possibilidade de que estas lagoas recebessem alimentação de águas subterrâneas em uma pequena proporção. Para se estudar mais profundamente este ponto, seria preciso analisar novas amostras de água coletadas durante o período de estiagem, ou seja, na ausência de alimentação por fluxos superficiais.

Nestas condições, qualquer alteração no valor da concentração implicaria na existência de alimentação subterrânea; a concentração de trítio aumentaria se a lagoa recebesse água do período 1960-1972 e diminuiria no caso de tratar-se de água anterior a 1960. Segundo os resultados obtidos, as lagoas L 2, L 5, L 9 e L 12, com menor concentração de trítio, poderiam possuir alimentação de água anterior a 1960, mas isto não pode ser afirmado categoricamente. A possível alimentação da lagoa de Parnaíba por águas subterrâneas deve ser desprezível, comparada com a alimentação superficial existente na época em que foi coletada a amostra analisada.

2.1.1.2 - Interpretação dos resultados obtidos em Poços

Devido às características dos aquíferos, era de se esperar a existência de trítio somente nas zonas de recarga, ou seja, nas zonas de afloramento das camadas permeáveis. Dos dez poços estudados, somente três não contém trítio em concentrações mensuráveis. Destes poços, o de Nazaré do Piauí e o 13-16 recebem água do aquífero Cabeças. O fato de se encontrarem dentro da zona de confinamento do mesmo justifica a ausência de trítio. O poço 13-19 capta água da

TABELA 3

Concentrações de trítio em diversos poços da bacia do Rio Gurguéia

POÇO	FORMAÇÃO	COLUNA D'ÁGUA (m)	CONCENTRAÇÃO (U.T.)
Deiras	Cabeças (A)	95	$0,9 \pm 0,5$
Nazaré do Piauí	Cabeças, Longá (A)		0,8
13-26	Cabeças (A)	72 (I)	$1,8 \pm 0,5$
Conaol	Cabeças (A)	40	$0,6 \pm 0,4$
13-16 (J)	Cabeças (A)		0,5
13-19	?		0,4
19-01	Cabeças, Longá, Poti (A)		$1,7 \pm 0,5$
19-03	Longá, Poti (A)		$0,7 \pm 0,4$
18-02	Cabeças, Longá (A)		$1,6 \pm 0,5$
14-03	Poti (A)	100 (I)	$1,0 \pm 0,4$

formação Longá. A carência de trítio pode ser explicada, admitindo-se a existência de uma camada superior muito pouco permeável.

A presença de trítio nos poços Oeiras, 13-26 e Coneal é justificada, pelo fato deles se encontrarem na zona de recarga do aquífero Cabeças.

Os poços 19-01 e 19-03 situam-se na localidade de Bom Jesus, muito próximos do rio Gurguéia. O trítio deve proceder de infiltrações de água deste rio através de camadas superiores permeáveis. O poço 19-01 capta o aquífero Cabeças, o qual está confinado nesta área, não contendo trítio. Admitindo-se uma concentração média na água do rio Gurguéia de 8,5 U.T., a água extraída do poço necessitaria ter uma contribuição de 20%, aproximadamente, de água do rio, para justificar a concentração de 1,7 U.T. encontrada.

O poço 18-02 está provavelmente recebendo contribuições de água de uma camada superior à formação Cabeças, situada acima do nível piezométrico estático e responsável pelo transporte de trítio. A extração de água deste poço se realiza de forma intermitente. Durante o período de não extração, a camada superior alimenta continuamente o poço, justificando a relativamente elevada concentração de trítio.

O poço 14-03 situa-se em uma zona onde existe uma camada superficial de arenitos da formação Poti, apresentando no local do poço uma espessura de 51 metros. Encontra-se, portanto, em uma zona de recarga que justifica a presença de trítio.

2.1.1.3 - Avaliação da recarga média anual

Dos dez poços estudados, três encontram-se na zona de recarga do aquífero Cabeças (Oeiras, 13-26 e Coneal) e um no afloramento arenítico da formação Poti, (14-03). A partir das concentrações de trítio destes poços, pode-se obter informações sobre a recarga média anual, apoiando-se em diversos parâmetros hidrológicos.

Supondo-se que a recarga média anual W_m (mm/ano) se mantém constante em anos sucessivos, ela pode ser calculada pela relação:

$$W_m = \frac{A_a}{A_p} \cdot P \quad (1)$$

onde:

A_a = atividade total de trítio existente em uma coluna de aquífero, de área unitária e espessura b , igual a da camada permeável que alimenta o poço;

A_p = atividade de trítio, por unidade de área, das precipitações totais ocorrida a partir de 1952 (início das explosões termonucleares) até a atualidade.

P = pluviometria anual média, em mm/ano.

O volume de água existente em uma coluna de aquífero, de porosidade p e área unitária é dado pelo produto $b \cdot p$. Supondo um meio isotrópico, com permeabilidade e porosidade macroscopicamente uniforme e sendo C_a a concentração de trítio na água bombeada do poço, tem-se

$$A_a = C_a \cdot b \cdot p \quad (2)$$

Por outro lado, sendo C_p a concentração média de trítio nas precipitações, tem-se ainda:

$$A_p = 10^{-2} C_p \cdot P \cdot (t_0 - 1952) \quad (3)$$

onde t_0 é o ano atual.

Substituindo-se as expressões (2) e (3) na expressão (1) obtém-se:

$$W_m = \frac{C_a \cdot b \cdot p}{C_p \cdot (t_0 - 1952)} \cdot 10^3 \text{ mm/ano} \quad (4)$$

Os valores de C_a estão indicados na Tabela 3, enquanto que os C_p podem ser obtidos a partir da Figura 2. No caso presente, t_0 corresponde ao ano 1972, ou seja, $(t_0 - 1952) = 20$ anos. Este último dado implica em admitir a hipótese de que as águas infiltradas alcançam o nível freático em curto prazo. Para a porosidade pode-se utilizar um valor estimado de $p = 0,15$. Os valores de b estão indicados na terceira coluna da Tabela 3. Para os poços 13-26 e 14-03, nos quais é conhecida a coluna litológica, somente as camadas de arenitos existentes abaixo do nível freático são consideradas, admitindo-se que os demais materiais (siltitos e folhelhos) não transmitem água em proporções significativas. Para os poços Oeiras e Coneal não são conhecidas as colunas litológicas e, portanto, utiliza-se a espessura total.

Com estes valores e sendo $C_p = 14,1 \text{ U T}$, (Figura 2), obtém-se os seguintes valores para W_m :

Poço Oeiras:	$W_m \cong 45 \text{ mm/ano}$
Poço 13-26:	$W_m \cong 69 \text{ mm/ano}$
Poço Coneal:	$W_m \cong 13 \text{ mm/ano}$
Poço 14-03:	$W_m \cong 50 \text{ mm/ano}$

A média dos quatro valores é de 44 mm/ano. O reduzido número de amostras analisadas e o elevado erro relativo das concentrações obtidas (Tabela 3) limitam a segurança deste resultado.

2.1.2 - Bacia do Rio Fidalgo

Analisaram-se um total de 22 amostras de água: 5 provenientes de lagoas e 17 de águas subterrâneas. Os resultados obtidos das primeiras estão indicados na Tabela 4.

Uma das 17 amostras de água subterrânea mostrou um resultado anormalmente elevado, devido à contaminação durante o processamento, segundo foi comunicado pelo laboratório que realizou as análises. Os resultados das 16 amostras restantes estão indicadas nas Tabelas 5, 6 e 7. Para facilitar a interpretação estas amostras foram classificadas em três grupos, de acordo com a formação geológica de onde procediam.

2.1.2.1 - Interpretação dos resultados obtidos em lagoas

Dos 5 resultados disponíveis (Tabela 4), destaca-se o elevado valor correspondente à lagoa da Volta. Para justificar esse resultado, haveria que admitir que esta lagoa contivesse água das precipitações correspondentes ao período 1964-1965 ou, então, que estivesse recebendo aporte de água dos últimos 10 anos pela descarga de algum aquífero. Ambas as hipóteses são

improváveis. Sabe-se que esta lagoa está sendo alimentada pela água proveniente do poço surgente número 123. Mas a água deste poço também foi analisada e não contém trítio (Tabela 6). O resultado, portanto, é ainda mais inexplicável. O mais provável é que essa amostra sofreu contaminação durante o processamento, o mesmo que ocorreu com uma das amostras de água subterrânea. Inclusive, as concentrações indicadas para ambas são semelhantes: 23 ± 1 U.T. para a amostra da lagoa da Vofia e 24 ± 2 U.T. para amostra de água subterrânea proveniente do poço 116, do Projeto Morro dos Cavalos.

Os resultados das lagoas restantes são aceitáveis. As três lagoas, Comprida, Alagadiço e Itapueira possuem praticamente a mesma concentração de trítio. Todas elas encontram-se sobre o rio Fidalgo. Estas concentrações correspondem, com bastante precisão às indicadas para as precipitações de 1972, na Figura 2. Isso indica duas coisas:

- a) - que a água destas três lagoas deve ter-se originado do escoamento do rio Fidalgo, motivado pelas precipitações de princípios de 1972;
- b) - que as concentrações médias anuais inferidas para as precipitações dos últimos anos, na área de estudo, estão razoavelmente corretas.

Segundo os resultados apresentados, estas lagoas não devem receber contribuições de águas subterrâneas da formação Serra Grande ou, pelo menos essas contribuições são desprezíveis. Baseia-se esta conclusão na não existência de trítio dentro da zona confinada do aquífero Serra Grande (Tabela 5). Os resultados com isótopos estáveis, que serão apresentados adiante, confirmam esta conclusão.

A lagoa de Boqueirãozinho Grande não se encontra no curso do rio Fidalgo, mas em um riacho que desemboca no rio Piauí, próximo a São João do Piauí. A concentração de trítio também é coerente com a correspondente às precipitações de 1972. Segundo a curva da Figura 1, poderia corresponder exatamente com as precipitações do período abril-maio daquele ano.

2.1.2.2 - Interpretação dos resultados obtidos em poços

2.1.2.2.1 - Aquífero Serra Grande

Das 6 amostras analisadas deste aquífero somente contém trítio a do poço 249 (Tabela 5), que se encontra dentro da zona de afloramento da formação. Os outros 5 poços estão localizados na zona confinada do aquífero e, portanto, não podem receber recarga através das camadas superiores. Isto justifica a inexistência de trítio.

O poço de Santa Rita encontra-se muito próximo da lagoa do mesmo nome; apesar disso, não contém trítio. Isso demonstra que não há interconexão entre ambos, isto é, que a lagoa não fornece água ao aquífero Serra Grande em magnitudes apreciáveis.

2.1.2.2.2 - Formação Cabeças

A maior concentração de trítio das amostras colhidas da formação Cabeças (Tabela 6), corresponde ao poço 109 que se encontra numa zona de afloramento, onde a recarga se realiza pela superfície.

TABELA 4

Concentrações de trítio em diversas lagoas da bacia do Rio Fidalgo

LAGOA	CONCENTRAÇÃO (U.T.)
Boqueirãozinho Grande	$8,6 \pm 0,6$
Lagoa Comprida (Santa Rita)	$8,3 \pm 0,7$
Alagadiço Grande	$8,7 \pm 0,7$
Ipueira	$8,6 \pm 0,7$
Lagoa da Volta (1)	$23,0 \pm 1,0$

(1) Trata-se de uma pequena lagoa situada próxima ao poço surgente de São Miguel (123). Não parece haver conexão superficial com a lagoa Canto da Volta, que não pode ser atingida, por dificuldade de acesso.

TABELA 5

Concentrações de trítio em amostras d'água da formação Serra Grande de diversos poços da bacia do Rio Fidalgo

POÇO		CONCENTRAÇÃO
NÚMERO	TOPONÍMIA	(U.T.)
116	Morro dos Cavalos	0,5
128	Alto Novo	0,8
129	Malhada de Dentro	0,5
249	Conceição do Canindé	$3,3 \pm 0,4$
305	São João do Piauí	1,0
309	Santa Rita	0,7

TABELA 6

Concentrações de trítio em amostras d'água da formação Cabeças
de diversos poços da bacia do Rio Fidalgo

POÇO		CONCENTRAÇÃO (U.T.)
NÚMERO	TOPONÍMIA	
109	Paes Landim	$1,3 \pm 0,5$
114	Acerto	0,8
119	Caçara	0,5
123	São Miguel	0,5
125	Lago Comprida	$0,7 \pm 0,5$
131	Carro Quebrado	$0,6 \pm 0,5$

TABELA 7

Concentrações de trítio em amostras d'água da formação Picos
de diversos poços da bacia do Rio Fidalgo

POÇO		CONCENTRAÇÃO (U.T.)
NÚMERO	TOPONÍMIA	
101	Espírito Santo	0,7
106	Fazenda Muquém	0,8
204	Lagoinha	$4,2 \pm 0,5$
252	Pajeú	$0,6 \pm 0,5$

Os 5 poços restantes encontram-se dentro da zona confinada do aquífero, como o demonstra o fato de todos eles serem surgentes. Destes, os poços 114, 119 e 123 encontram-se isentos de trítio. Os dois poços restantes parecem possuir uma minúscula concentração deste isótopo. Ambos os poços se encontram muito próximos de lagoas: o de número 125, nas proximidades da lagoa Comprida e o poço 131 da lagoa Inhuma. Pode-se concluir, como hipótese mais provável, que a pequena atividade de trítio provenha destas lagoas. Se isto é verdade, a água que aflora nestes poços, procedente do aquífero Cabeças, arrastaria consigo uma pequena quantidade de água proveniente de uma camada superior alimentada pelas lagoas. Se designarmos por Q a vazão que aflora no poço, Q_1 a vazão procedente do aquífero e Q_2 a água proveniente das lagoas, deveríamos ter:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

e

$$C.Q = C_1.Q_1 + C_2.Q_2$$

onde C , C_1 e C_2 são as concentrações respectivas de trítio. Segundo os resultados, C é da ordem de 0,65 U.T. (Tabela 6), C_1 pode ser considerado zero e, para C_2 , pode-se tomar o valor de 8,5 U.T. (Tabela 2). Teremos, portanto,

$$0,65 Q = 8,5 Q_2$$

e

$$Q_2 / Q = 0,65 / 8,5 \cong 0,08$$

Este resultado indica que apenas 8% da água surgente procederia da lagoa. Certamente, a margem de erro desta cifra é muito elevada, devido à escassa precisão da determinação das concentrações de trítio em ambos os poços.

2.1.2.2.3 - Formação Picos

Devido às características litológicas e estratigráficas desta formação, pode-se esperar uma distribuição irregular das zonas de recarga. Estas últimas devem coincidir com os afloramentos das zonas permeáveis. O número de amostras coletadas (Tabela 7) é demasiado pequeno para que se possa definir a localização destas zonas de recarga. Os resultados obtidos (Tabela 7) indicam o seguinte:

- a) - o poço de Lagoinha encontra-se numa zona de recarga; sua concentração de trítio será interpretada com maiores detalhes no item seguinte;
- b) - o poço de Pajeú parece conter uma débil proporção de águas modernas, sendo que o mais provável é que procedam do rio Canindé, no leito do qual o mesmo se acha situado. Da mesma forma, as concentrações dos isótopos estáveis, D e ^{18}O , indicam também que o rio contribui para a recarga das camadas superiores em uma pequena proporção;
- c) - os poços das fazendas Muquém e Espírito Santo não se encontram na área de recarga do aquífero. O último poço foi surgente em tempos passados, o que confirma a hipótese anterior.

2.1.2.3 - Avaliação da recarga média anual

Das 16 amostras de água subterrânea consideradas, em 3 delas foi detetado de forma inequívoca, trítio de origem termonuclear. Os poços da origem e as respectivas concentrações de trítio, são:

- poço 249 (Conceição do Canindé):	$3,3 \pm 0,4$ U.T.
- poço 109 (Paes Landim):	$1,3 \pm 0,5$ U.T.
- poço 204 (Lagoinha):	$4,2 \pm 0,5$ U.T.

A partir destes dados, podem-se obter informações sobre a recarga média local, apoiando-se em diversos parâmetros hidrológicos. Supondo que a recarga média anual, W_m (mm/ano), se mantenha constante em anos sucessivos, o seu valor pode ser calculado, de forma análoga a do item 2.1.1.3, pela expressão (4),

Os valores de C_B estão indicados acima, para os três poços que contém trítio. Os valores de C_D , t_0 e p são os mesmos que foram utilizados no item 2.1.1.3. O valor de b é, neste caso, o valor menos seguro. O poço 249 apresenta uma profundidade de 60 metros, encontrando-se totalmente nos arenitos da formação Serra Grande, sem atingir o ombasamento impermeável. De uma forma estimativa, tomaremos um valor de $b = 40$ metros. O de número 109 possui uma profundidade de 130 metros, nível estático a 5 metros e atravessando arenitos da formação Cabeças. Suporemos $b = 125$ metros. E, finalmente, o poço 204, na formação Picos, possui uma profundidade de 121 metros, com nível freático a 8 metros. Até os 27 metros, encontram-se arenitos; de 27 metros ao fundo, são diabásios. Admite-se um valor de $b = 19$ metros.

Com estes valores e a partir da expressão (4), obtêm-se os seguintes valores para a recarga média anual:

Poço 249 (Conceição do Canindé):	$W_m \approx 70$ mm/ano
Poço 249 (Conceição do Canindé):	$W_m \approx 86$ mm/ano
Poço 109 (Paes Landim):	$W_m \approx 43$ mm/ano

Infelizmente, os dados utilizados não permitem uma grande segurança nestes resultados de recarga, devendo ser tomados apenas como orientação geral.

3.0.0 - EXPERIÊNCIAS COM ISÓTOPOS ESTÁVEIS

A análise dos isótopos estáveis, deutério e oxigênio-18, em amostras superficiais e subterrâneas, tinha por objetivo obter informações sobre os seguintes pontos:

- localização de possíveis afloramentos de águas subterrâneas;
- estudo da possível contribuição dos rios e das lagoas na recarga dos aquíferos;
- identificação de massas de água, caracterizadas por possuírem uma determinada composição isotópica uniforme, a qual poderia ajudar a estabelecer o esquema de fluxos dentro do sistema;
- modalidade de recarga dos aquíferos em função da litologia e textura das formações de superfície.

A contribuição destes isótopos no estudo de possíveis afloramentos de aquíferos nas

bacias dos rios Gurguéia e Fidalgo será analisada em seguida, juntamente com as informações colhidas através das medições de descargas e de concentrações de trítio. Os conceitos teóricos relativos ao tratamento dispensado aos isótopos estáveis poderão ser encontrados nas referências bibliográficas.

3.1.0 - FATORES DETERMINANTES DA COMPOSIÇÃO ISÓTOPICA DAS PRECIPITAÇÕES

Em linhas gerais, pode-se dizer que a composição isotópica das precipitações depende da evolução da água desde a sua saída dos oceanos.

Considerando-se que tanto no fenômeno da evaporação, como no da condensação, a fase vapor tem uma concentração menor de isótopos pesados, compreende-se que as massas de nuvens, em seu caminho iniciado no oceano e que continua através dos continentes, vão se empobrecendo progressivamente destes isótopos.

Existem, por outro lado, dois fatores que modificam a composição isotópica das precipitações no momento em que estas se produzem:

- a) - a evaporação das gotas de água, que depende da temperatura e do tamanho destas;
- b) - o intercâmbio com o vapor atmosférico, previamente existente, o qual depende da intensidade e da duração da precipitação.

Para uma zona determinada, as condições meteorológicas se mantem aproximadamente constantes em anos sucessivos. Portanto, é de se esperar que as precipitações locais tenham concentrações reproduzíveis dentro de cada ciclo anual. Sabe-se que isso sucede na grande maioria dos casos.

Na região estudada não existe dados sobre as concentrações de D e ^{18}O nas precipitações e, infelizmente, isso também não foi possível de ser obtido durante o transcorrer do presente estudo.

Existem, mesmo assim, numerosos dados de estações relativamente próximas à região em estudo, provenientes da rede de estações da OIEA-OMM, que foram publicados pelo Organismo Internacional de Energia Atômica (Viena). Com os dados correspondentes às cinco estações mais próximas, foi possível a construção do diagrama representado na Figura 3. Apesar de se tratarem de zonas com diferentes condições meteorológicas, os pontos se distribuem em torno de uma reta que obedece, aproximadamente, a equação $\delta_D = 7,6 \delta_{18} + 8,5$ (13). Em princípio, parece razoável aceitar que as precipitações, na zona em que se realizaram os estudos, tenham concentrações isotópicas de acordo com esta equação. A diminuição da pendente observada, em relação à linha para condições de equilíbrio, encontra-se dentro do previsível.

3.2.0 - RESULTADOS OBTIDOS

3.2.1 - Bacia do Rio Gurguéia

3.2.1.1 - Amostras de águas subterrâneas

Foram analisadas, no total, 32 amostras de águas subterrâneas, das quais 24 correspondem

a poços existentes, segundo a informação inicial, na formação Cabeças. Os resultados destas amostras estão indicados na Tabela 8. As oito amostras restantes correspondem a poços ou fontes situados em formações superiores à formação Cabeças (Longá, Poti, Piauí etc.), cujos resultados estão indicados na Tabela 9.

Com os resultados obtidos, constituiu-se o diagrama representado na Figura G-4, onde se refletem as variações relativas de concentração de D e ^{18}O .

A curva que melhor se ajusta aos pontos obtidos obedece à equação $\delta_D = 5,7 \delta_{18} - 1,5$. Os pontos correspondentes às amostras de água da formação Cabeças encontram-se em uma zona relativamente pequena, em torno dos valores médios $\delta_D = -31,9 \text{ ‰}$ e $\delta_{18} = 5,3 \text{ ‰}$. Os desvios médios com relação a estes valores estão indicados na última linha da Tabela 8 e são da mesma ordem de grandeza que as margens de erro do procedimento de análise utilizado ($\pm 1,5 \text{ ‰}$ para o deutério e $\pm 0,2 \text{ ‰}$ para o oxigênio-18).

3.2.1.1.1 - Amostras da formação Cabeças

As águas infiltradas no subsolo a profundidades maiores de 2 ou 3 metros não sofrem evaporação nem outros tipos de mudança de estado, que possam dar lugar a fracionamento isotópico. A concentração de ^{18}O das águas infiltradas pode se modificar por intercâmbio isotópico com oxigênio das rochas, mas este fenômeno é muito lento a temperaturas normais e facilmente identificável, uma vez que o deutério não se altera. Pode-se aceitar, portanto, que as águas infiltradas conservam sua composição isotópica por tempo indefinido, modificando-se somente por mistura com outras águas de composição diferente.

Logo, as águas da formação Cabeças, infiltradas na área de recarga, devem conservar suas concentrações de D e ^{18}O durante o seu deslocamento para a área de descarga. Isto se cumpre de forma satisfatória em, exatamente, a metade dos poços analisados desta formação; estão indicados na Tabela 8, na coluna denominada: situação normal. Estas amostras, como se verá adiante, devem corresponder a águas infiltradas diretamente das precipitações e com um período de permanência em superfície, anterior à infiltração, muito reduzido.

As restantes amostras têm concentrações mais elevadas, indicando que devem corresponder a águas que experimentam evaporação prévia à infiltração em maior grau que as anteriores. Além do mais, em quase todas estas amostras se encontra uma justificação, mais ou menos clara, de sua elevada concentração, tal como se indica em seguida.

Poço 22-11: Este poço se encontra no limite das formações Cabeças e Pimenteirais. A água pode provir, principalmente, desta segunda formação. O nível piezométrico se encontrava a 52,5 metros e a profundidade do poço era de 106,5 metros. Quando se realizou a coleta de amostras, o poço estava em vias de perfuração, existindo, portanto, a possibilidade de haver sido injetada água com maiores concentrações no decorrer dos trabalhos de perfuração.

Poço Oeiras: Para este poço não conhecemos uma justificativa clara, a não ser sua proximidade a afloramentos de outras formações superiores.

Poços 132, 138, 137, 122 e 124: Todos estes poços se encontram dentro da área de confinamento da formação Cabeças. Nesta mesma zona existem outros 5 poços jorrantes

TABELA 8

Concentrações de D e ^{18}O de diversos poços da bacia do Rio Gurgueia e que, segundo informação inicial, pertencem à formação Cabeças

POÇO	CONCENTRAÇÃO				OBSERVAÇÕES
	SITUAÇÃO ANORMAL		SITUAÇÃO NORMAL		
	δ_D (‰)	δ_{18} (‰)	δ_D (‰)	δ_{18} (‰)	
22-11	-22	3,9			R
Deiras	-13	-3,1			R
132	-21	-2,9			C
Nazaré do Piauí			-29	-5,1	C
125			-34	-5,9	C J
123			-36	-5,9	C J
131			-34	-5,5	C J
114			-32	-5,2	C J
119			-29	-4,7	C J
109			-34	-5,4	R
138	-22	3,5			C
137	-7	-1,1			C
122	-24	-4,3			C
124	-25	-3,7			C
13-07	-23	-3,2			R
13-16			-32	-5,1	R J
13-19	-23	-3,7			R
13-26			-29	-5,4	R
13-24			-32	-5,7	C J
14-02	-26	-2,6			C J
17-18			-31	-5,0	C J
18-02	-18	-3,1			C
19-01			-31	-4,7	C
18-07	-22	-3,4			C J
CONCENTRAÇÃO MÉDIA			-32	-5,3	
DESVIO MÉDIO			± 2	$\pm 0,3$	

C: Poço em zona de confinamento

J: Poço jorrante.

R: Poço em zona de recarga.

(números 125, 123, 131, 114 e 119), os quais têm a composição isotópica característica do aquífero Cabeças. Portanto, parece lógico admitir que os poços acima referidos não tomam água desta formação, em cujo caso seriam jorrantes, se não da formação Longá. Por ser esta formação muito menos permeável que a formação Cabeças, a água tem maior dificuldade para se infiltrar no subsolo, permanecendo mais tempo na superfície, exposta a evaporação.

Desses poços se destaca o de número 137 por sua elevada concentração. Este poço deve estar sendo alimentado por alguma lagoa permanente ou temporal.

Poços 13-07 e 13-19: Estes poços, segundo os dados geológicos, encontram-se em uma área de afloramento da formação Cabeças. Próximo a estes existem outros dois poços jorrantes, com a composição isotópica característica do aquífero Cabeças, repetindo-se, portanto, a situação do caso anterior.

Ensaio realizado em poços com traçadores injetados demonstraram a existência, nesta zona, de aquíferos superpostos com diferentes níveis piezométricos. Deve-se admitir, logicamente, que só as águas profundas dos poços jorrantes pertencem ao aquífero Cabeças enquanto que as águas mais superficiais não estão conectadas com este aquífero. Provavelmente, o afloramento da formação Cabeças nesta zona é mais aparente que real, pelo menos do ponto de vista hidrológico.

Poço 14-02: Trata-se do poço jorrante do Núcleo Colonial do Incra, situado no município de Eliseu Martins. A água deste poço, se bem que proceda, basicamente, da formação Cabeças, deve estar misturada com águas de camadas superiores, em pequena proporção.

Poço 18-02 (Santa Luz): Segundo informação recebida de outros técnicos do projeto que colaboraram em sua construção, este poço está recebendo contribuição de água de camadas superiores à formação Cabeças; pode-se ouvir a queda de água de níveis superiores. Por outra parte, a água deste poço contém trítio em concentrações relativamente elevadas (item 2.1.1.2), não restando dúvidas, portanto, quanto à contribuição de águas modernas em uma proporção considerável. Além do mais, estas concentrações elevadas de trítio e isótopos estáveis permitem suspeitar que a maior parte da água deste poço provém das referidas camadas superiores.

Poço 18-07 (Poço Verde): Trata-se de um afloramento natural que forma uma lagoa com 10 000 m³ de volume aproximadamente. A vazão de água oscila em torno de 23 litros por segundo, resultando um tempo normal de renovação de águas de 5 dias, suficiente para que a evaporação das mesmas modifique a concentração, até alcançar o valor indicado na Tabela 8. A amostra de água, tomada na superfície da lagoa, apresenta uma concentração de isótopos estáveis que tende a indicar sua procedência da formação Cabeças.

3.2.1.1.2 - Amostras de formações superiores

Dos resultados indicados na Tabela 9, chama a atenção o correspondente ao poço 14-03 (Aliança do Gurqueia). Durante muito tempo, houve dúvidas sobre a procedência ou não de suas águas da formação Cabeças. As concentrações de D e ¹⁸O correspondem às destes aquíferos, podendo a resposta ser afirmativa, embora a informação não seja suficiente para assegurá-la. Somente o resultado proveniente das medições com carbono-14 deverá dar a resposta segura.

Uma situação similar ocorre com a fonte *Manteiga*, que dá origem ao riacho dos Mendes, de curso permanente. Esta água poderia proceder da formação Cabeças, aflorando por algum acidente estrutural das camadas superiores. Neste caso, também, só o ^{13}C poderá aclarar a situação de forma segura.

Estas amostras e as da Tabela 8, que acreditamos pertencerem à formações superiores à formação Cabeças, foram reunidas na Tabela 10, tendo-se eliminado o poço 22-11 por pertencer a uma formação inferior à Cabeças e os resultados dos poços *Qeiras* e 137 por corresponderem à águas anormalmente evaporadas.

Obtém-se, assim, concentrações médias $\delta_{\text{D}} = -22 \pm 2,7 \text{ ‰}$ e $\delta_{^{18}\text{O}} = -3,5 \pm 0,4 \text{ ‰}$, que podem ser consideradas representativas destes aquíferos superiores.

3.2.1.1 : Considerações sobre o processo de recarga

Segundo foi visto nos itens anteriores, eliminando-se alguns poços com águas fortemente evaporadas devido a fenômenos locais de recarga, podem ser diferenciados dois tipos de água: um correspondente ao aquífero Cabeças e outro a todos os aquíferos mais superficiais. Ambos os tipos de água estão caracterizados pelas duas zonas indicadas com linha interrompida no diagrama da Figura G-4.

A distinta composição isotópica destas águas não pode ser explicada por diferenças de concentração das precipitações, sobretudo se for levado em conta que, devido à evapotranspiração, o período útil para a recarga se reduz a 2 ou 3 meses do ano. Por outro lado, não foram observadas contribuições significativas para a recarga dos aquíferos por parte das lagoas e rios da zona em estudo, salvo algum caso isolado.

No caso do aquífero Cabeças, as baixas concentrações de D e ^{18}O só podem ser explicadas, admitindo-se uma infiltração direta e rápida das precipitações. Dada a evaporação na zona, bastaria uma retenção média da água na superfície de 1 ou 2 dias, para que as concentrações de D e ^{18}O fossem sensivelmente maiores.

A permeabilidade desta formação, na área de afloramento, deve ser muito elevada. Esta hipótese vê-se confirmada no diagrama da Figura G-4; os pontos do aquífero Cabeças se adaptam do mesmo modo tanto à linha 2 de águas subterrâneas quanto à linha 1 de precipitação. O ponto de cruzamento de ambas deve corresponder, também, à concentração média das precipitações locais, durante o período útil para recarga. Pelo contrário, nos aquíferos superiores o processo de infiltração deve ser mais lento e, portanto, a água permanece em superfície um tempo maior.

Este tempo depende, basicamente, da permeabilidade das camadas superficiais, da vegetação existente e da topografia da região. A evaporação prévia à infiltração pode dar-se nas seguintes circunstâncias:

- a) - como consequência da retenção da água pela vegetação existente; dependendo sua magnitude do tipo e densidade de vegetação;
- b) - como consequência da retenção da água em superfície, que depende do tipo de solo existente. Os solos pesados, com elevado conteúdo de argila, possuem um poder de retenção maior que outros solos mais permeáveis;

TABELA 9

Concentrações de D e ^{18}O de diversos poços da bacia do Rio Gurguéia
a que, segundo informação inicial, pertencem às camadas
superiores à formação Cabeças

POÇO	CONCENTRAÇÃO	
	δ_{D} (‰)	$\delta_{^{18}\text{O}}$ (‰)
08-19	- 27	- 3,2
14-03	- 31	- 4,7
14-18	- 26	- 4,7
16-01	- 16	- 2,7
16-02	- 17	- 3,3
12-01	- 21	- 3,5
11-25	- 23	- 4,0
Fonte Manteiga	- 36	- 4,9

- c) - durante o escoamento superficial;
- d) - por armazenamento em pequenas lagoas.

Estes dois últimos fatores dependem da topografia da região. Em muitos casos, os quatro fatores citados atuam conjuntamente.

No caso presente, a vegetação e a topografia são, de certo modo, uniformes. Deve ser, portanto, a permeabilidade das camadas superficiais que determina o tempo de retenção da água. A existência de tolhelhos e siltitos nas formações superiores à formação Cabeças é a causa da sua menor permeabilidade e, por conseguinte, de sua menor recarga.

Por outro lado, parece ter grande significado, em relação à recarga, o fato de que as cinco amostras de água do rio Gurguéia tenham concentrações que se ajustam à linha 2 da Figura G-4. Na época do ano em que foram tomadas as amostras, o rio estava alimentado parcialmente por águas subterrâneas, cuja composição isotópica deve encontrar-se na linha 2, porém com valores δ mais negativos. Parece, portanto, que o enriquecimento isotópico produzido por evaporação de água durante seu curso ao longo do rio tem lugar de acordo com esta linha. Se isto ocorre no rio principal, pode ocorrer, também, para o resto do escoamento superficial produzido pelas precipitações. Ao contrário, quando este escoamento desemboca em uma lagoa e a água fica, praticamente, isolada, o enriquecimento por evaporação se produz segundo a linha do diagrama representado na Figura G-5, o que é um fato comprovado.

O exposto anteriormente confirma a hipótese que os dois sistemas, Cabeças e aquíferos superiores, podem estar alimentados pelas mesmas precipitações. O tempo médio de retenção na superfície, necessário para produzir a diferença entre as concentrações observadas nestes sistemas, pode ser determinado experimentalmente com um programa adequado de amostragem. Segundo a Figura G-4, o tempo de retenção para as águas infiltradas no aquífero Cabeças é, praticamente, zero. Isto quer dizer que a infiltração tem lugar, principalmente, durante o período que vai desde o início da chuva até o momento no qual a umidade relativa da atmosfera começa a ser inferior a 1. Quando a atmosfera se encontra saturada de umidade, não se produz evaporação e, portanto, também não ocorre o fracionamento isotópico da água.

Para as formações superiores, as diferenças de concentrações de D e ^{18}O , em relação à água do aquífero Cabeças, é de $\delta_D = 10 \text{ ‰}$ e $\delta_{18} = 1,8 \text{ ‰}$. A partir das informações obtidas com amostras do rio Gurguéia e de cálculos aproximados efetuados,⁽⁹⁾ (13) a velocidade de enriquecimento isotópico da água, durante o escoamento superficial, pode ser estimado em $\approx 2 \text{ ‰/dia}$, para o deutério e $\approx 0,35 \text{ ‰/dia}$, para o oxigênio-18. Com estes valores obtém-se um tempo médio de retenção na superfície, da água infiltrada nestas formações, de ≈ 5 dias.

Por outro lado, a fração de água das precipitações que sai da bacia por meio dos fluxos superficiais (rio Gurguéia) é de 3 %, aproximadamente. Portanto, pode-se admitir que o tempo de retenção da água na superfície do solo está determinado, principalmente, pela evaporação (E) e pela infiltração (I), sobretudo nas áreas mais distantes dos rios principais. Nestas condições, o tempo médio de retenção, para uma precipitação P (mm), equivale a $(1 + E)/P$. Supondo-se que os parâmetros E e P são uniformes em toda a bacia, deduz-se que o tempo de retenção é inversamente proporcional à velocidade de recarga e que, portanto, a recarga por unidade de superfície para as formações superiores deve ser 20 %, aproximadamente, da que

corresponde ao aquífero Cabeças.

3.2.1.3 - Amostras de lagoas

As concentrações de deutério e oxigênio-18 foram medidas em amostras oriundas de doze lagoas e cujos resultados estão indicados na Tabela 11. Estes resultados foram também representados no diagrama da Figura G-5, proporcionando uma linha de evaporação que obedece a equação $\delta_D = 4,2 \delta_{18} + 2,6$. As altas concentrações de D e ^{18}O destas lagoas indicam o alto grau de evaporação a que se encontram submetidas. As diferenças de concentração vêm determinadas, principalmente, por sua relação área-volume e pela evolução anterior da água, indicando os resultados que as lagoas não contribuem, de forma significativa, para recarga dos aquíferos subjacentes. Há alguns casos em que existem poços muito próximos às lagoas, não se observando, entretanto, nenhuma interconexão. De todos os poços estudados, somente o de número 137 pode estar sendo parcialmente alimentado pelas águas da lagoa ou, talvez, do rio Piauí, que se encontra próximo.

Quanto à hipótese da possível alimentação das lagoas por águas subterrâneas, os resultados obtidos com isótopos estáveis não permitiram conclusões adicionais às proporcionadas pelo trítio. Para tanto, teria sido necessário estudar o balanço isotópico das lagoas por meio de um programa de amostragem mais intensivo, durante um período de tempo de 1 a 3 meses.

Este balanço parece especialmente importante no caso da lagoa de Paranaguá, pelo seu possível desempenho futuro com relação à regularização do rio Paraim. A informação que pode ser esperada deste balanço compreende os seguintes pontos:

- a) - perdas por infiltração;
- b) - contribuição de águas subterrâneas;
- c) - perdas por evaporação.

3.2.2 - Bacia do Rio Fidalgo

3.2.2.1 - Amostras de águas subterrâneas

Analisaram-se, no total, 52 amostras de águas subterrâneas. Classificaram-se os resultados destas análises em 5 zonas e, dentro de cada zona, de acordo com o tipo de formação geológica de onde foram extraídas as amostras. Esta delimitação em zonas teve por base as diferentes composições isotópicas das águas subterrâneas. Em cada zona, a composição isotópica da água é mais ou menos uniforme e distinta daquelas correspondentes às zonas vizinhas.

Os resultados de cada zona estão indicados nas Tabelas 12 a 16, e também foram utilizados na construção do diagrama da Figura F-4, onde podem ser observadas as variações relativas de concentração de D e ^{18}O . Estes pontos determinam uma linha reta (linha 2) que obedece à equação: $\delta_D = 6,6 \delta_{18} + 2,6$. Para efeito de comparação, traçaram-se as linhas correspondentes às condições de equilíbrio (linha 4) e às precipitações de locais próximos (linha 1).

3.2.2.1.1 - Zona 1

TABELA 10

Concentrações de D e ^{18}O de diversos poços da bacia do Rio Gurguéia
pertencentes às ordens superiores à formação Cabeças

POÇO	CONCENTRAÇÃO	
	δ_D (‰)	δ_{18} (‰)
08-19	- 27	- 3,2
14-18	- 26	- 4,7
16-01	- 16	- 2,7
16-02	- 17	- 3,3
12-01	- 21	- 3,5
11-25	- 23	- 4,0
132	- 21	- 2,9
138	- 22	- 3,5
122	- 24	- 4,3
124	- 25	- 3,7
13-07	- 23	- 3,2
13-19	- 23	- 3,7
18-02	- 18	- 3,1
CONCENTRAÇÃO MÉDIA	- 22	- 3,5
DESVIO MÉDIO	± 3	$\pm 0,4$

TABELA 11

Concentrações de D e ¹⁸O em diversas lagoas da bacia do Rio Gurgueia

LAGOA		CONCENTRAÇÃO	
NÚMERO	TOPONÍMIA	δ_D (‰)	δ_{18} (‰)
L - 1	Nazaré do Piauí	+ 19	+ 2,9
L - 2	São Francisco (Rio Grande do Piauí)	+ 16	+ 2,9
L - 3	Boa Vista (Rio Grande do Piauí)	+ 35	+ 7,6
L - 4	Espirito Santo (Caracol)	+ 16	+ 4,8
L - 5	Impueira (Curimatá)	+ 9	+ 2,1
L - 6	Parnaguá	+ 16	+ 2,4
L - 7	Rio Paraím (1)	+ 10	+ 2,2
L - 8	Horta (Manoel Emídio)	+ 29	+ 6,1
L - 9	Malícia (Bertolinia)	+ 15	+ 2,2
L - 10	Da Velha (Landri Sales)	+ 16	+ 3,0
L - 11	Do Morro (Jerumenha)	+ 26	+ 6,0
L - 12	Angico Branco (Eliseu Martins)	+ 42	+ 9,0

(1). Esta amostra foi tomada no rio Paraím, 20km acima de sua entrada na lagoa de Parnaguá.

A água desta zona apresenta uma composição isotópica média de $\delta_D = -33,1$ e $\delta_{18} = -5,3$ ‰ ($-33,1; -5,3$). Os poços desta zona pertencem a três formações diferentes: formação Serra Grande, formação Picos e formação Cabeças. As águas destas formações não podem ser isotopicamente diferenciadas. Como se observa na Tabela 12, os desvios dos resultados ajustam-se satisfatoriamente dentro dos limites de erro indicados pelo centro que realizou as análises e que são: $\pm 1,5$ ‰ para o deutério e $\pm 0,2$ ‰ para o oxigênio-18.

A delimitação desta zona (Figura F-5) é insegura em seu contato com a zona 2, no trecho compreendido entre Simplício Mendes e São Francisco, devido à falta de dados (não há poços nestas áreas). Entre Simplício Mendes e Carneira, a divisória foi traçada, como indicado, exclusivamente em consequência do conteúdo isotópico do poço 252. Devido à diferença entre a composição isotópica da água deste poço e a dos poços 212 e 261, que lhe são vizinhos, repetiram-se as análises com novas amostras. Os resultados obtidos foram similares, não resultando dúvidas sobre esta diferenciação.

Também ficou insegura a divisória de separação isotópica com a zona 5, no trecho próximo a São Miguel. Dos dois poços analisados nesta povoação, o de número 123 recebe água da formação Cabeças, enquanto que o de número 132 recebe da formação Longá. Isto deve justificar a composição isotópica de ambos.

A alta concentração de deutério e oxigênio-18 do poço 228 é explicada pelo fato de tratar-se de um poço de grande diâmetro, exposto à evaporação.

3.2.2.1.2 - Zona 2

Os poços desta zona pertencem à formação Serra Grande e à formação Picos, com composição isotópica média de $(-18,6; -3,4)$ e $(-21,1; -3,6)$ respectivamente. Observa-se uma grande dispersão nas concentrações dos diferentes poços, o que somente pode ser explicado por diferenças de evaporação das águas que contribuem para a recarga durante o período prévio de infiltração. A topografia do terreno pode conduzir à retenção da água em pequenas lagoas desigualmente distribuídas. A evaporação destas lagoas modificaria a composição isotópica da água infiltrada. Outra causa que poderia explicar esta dispersão de valores, seria a alimentação pelo rio Canindé, cujas águas devem estar enriquecidas de D e ^{18}O . Esta explicação, entretanto, poderia somente ser válida para os poços mais próximos do rio.

A alta concentração da amostra do poço 262 é lógica, já que se trata de um poço manual exposto à evaporação.

3.2.2.1.3 - Zona 3

Esta zona corresponde ao embasamento cristalino. A composição isotópica é quase idêntica a da água da formação Serra Grande da zona 2 $(-18,6; -3,2)$. A dispersão de valores é muito elevada e a explicação do fenômeno pode ser a indicada anteriormente.

3.2.2.1.4 - Zona 4

Trata-se de uma zona situada dentro da zona 2, como se fosse uma ilha. Sua composição isotópica média é $(-31,7; -5,1)$, que se aproxima bastante daquela zona 1. Todos os poços se

TABELA 12

Concentrações de D e ¹⁸O em diversos poços da zona 1 da bacia do Rio Fidalgo

POÇO		FORMAÇÃO	CONCENTRAÇÃO	
NÚMERO	TOPONÍMIA		δ_D (‰)	δ_{18} (‰)
312	Fomento Agrícola (S. João do Piauí)	S E R R A G R A N D E	-36	-5,4
302	Fazenda Maravilhosa		-33	-5,4
309	Santa Rita 2		-33	-5,4
301	Santa Rita 1		-36	-5,4
113	Malhadinha		-31	-5,2
231	Simplicio Mendes (Prefeitura)		-32	-5,1
112	Morro dos Cavalos		-30	-5,2
116	Morro dos Cavalos		-34	-5,5
118	Morro dos Cavalos		-33	-5,2
128	Alto Novo		-29	-4,4
129	Malhada de Dentro		-33	-5,3
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)			-32(2)	-5,3(0,2)
110	Betúlia	P I C O S	-38	-5,7
115	Morro dos Cavalos		-34	-5,9
101	Espírito Santo		-36	-5,5
228	Boqueirão (Cacimbão) (1)		-9	-1,8
237	Barra (Simplicio Mendes)		-29	-4,9
106	Fazenda Muquém		-32	5,2
252	Pajeú		33	-5,2
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)			-34(2)	-5,4(0,3)
109	Paes Landim	C A B E C A S	-34	-5,4
119	Caçara		-29	-4,7
114	Acerto		-32	-5,4
131	Carro Quebrado		-34	-5,5
125	Lagoa Comprida (São Miguel)		-34	-5,9
123	São Miguel		-36	-5,9
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)			33(2)	-5,5(0,3)

11). Este poço não foi considerado para o cálculo dos valores médios.

TABELA 13

Concentrações de $\delta^{18}\text{O}$ em diversos poços da zona 2 da bacia do Rio Fidalgo

POÇO		FORMAÇÃO	CONCENTRAÇÃO	
NÚMERO	TOPONÍMIA		δ_{D} (‰)	δ_{18} (‰)
261	Marcos	S E R R A G R A N D E	18	-3,3
262	Conceição do Canindé (Cacimão) (1)		-14	-2,5
216	Conceição do Canindé (Praça Torre)		-24	-3,8
208	Ponte do Morro		-24	-4,3
209	Santa Luzia		-15	-2,5
210	Cabeça de Vaca		-12	-2,9
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)			-19(4)	-3,4(0,5)
204	Lagoinha	P I C O S	-21	-3,3
214	Dominguinhos		-21	-3,8
243	Fazenda Ligeiro 2		-21	-3,4
244	Pirajá		-17	-3,9
240	Castelo		-19	-3,1
261	Boa Vista		-21	-3,5
212	Malhada da Onça		-28	-4,5
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)			-21	-3,6

(1). Este poço não foi considerado para o cálculo dos valores médios.

TABELA 14

Concentrações de D e ^{18}O em diversos poços da zona 3 da bacia do Rio Fidalgo (embasamento cristalino)

POÇO		CONCENTRAÇÃO	
NÚMERO	TOPONÍMIA	δ_{D} (‰)	$\delta_{^{18}\text{O}}$ (‰)
404	Lagoa de Dentro (Campo Alegre)	- 16	- 3,0
413	Areia (Cacimbão) (1)	- 15	- 2,8
401	Pé do Morro	- 26	- 4,3
410	São Francisco	- 17	- 3,1
409	Macambira	- 23	- 3,7
411	Boa Vista	- 11	- 1,8
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)		- 19(5)	- 3,2(0,7)

(1). Este poço não foi considerado para o cálculo dos valores médios.

TABELA 15

Concentrações de D e ^{13}O em diversos poços da zona 4 da bacia do Rio Fidalgo (formação Serra Grande)

POÇO		CONCENTRAÇÃO	
NÚMERO	TOPONÍMIA	δ_{D} (‰)	$\delta_{^{13}\text{O}}$ (‰)
254	Baixa do Angico	- 31	- 5,3
246	Barreiras	- 35	- 5,2
207	Fazenda Cantinho	- 31	- 5,2
226	Escondido	- 30	- 4,9
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)		32 (2)	- 5,1(0,2)

TABELA 16

Concentrações de D e ^{16}O em diversos poços da zona 5 da bacia do Rio Fidalgo (formação Cabeças)

POÇO		CONCENTRAÇÃO	
NÚMERO	TOPONÍMIA	δ_{D} (‰)	$\delta_{^{16}\text{O}}$ (‰)
124	Vale Verde	- 25	- 3,7
122	Boa Vista (Socorro do Piauí)	- 24	- 4,3
137	Arceira (Socorro do Piauí) (1)	- 7	- 1,1
138	Cacimbas	- 22	- 3,5
132	São Miguel 2	- 21	- 2,9
CONCENTRAÇÃO MÉDIA (DESVIO MÉDIO)		- 23(2)	- 3,6(0,4)

(1): Este poço não foi considerado para o cálculo dos valores médios.

encontram na formação Serra Grande. As concentrações individuais são muito uniformes. Não se dispõe de informações suficientes para definir a causa que originou a formação desta "enigmática ilha". Como ponto de apoio, temos o dado que a cota do nível freático no poço 246 parece encontrar-se 20 metros mais baixa que a correspondente a outros poços próximos, não concordando, também com a piezometria geral do aquífero Serra Grande.

3.2.2.1.5 - Zona 5

Esta zona é constituída por poços situados na formação Cabeças. Apresentam uma composição isotópica média de $(-23,0; -3,6)$, não se incluindo o poço 137, de concentração muito maior. Este poço deve ser alimentado principalmente por águas que permaneceram retidas em superfície durante um tempo muito prolongado.

Deve-se esclarecer que as divisórias isotópicas que separam a zona 1 das zonas 2 e 5 coincidem, em grande parte, com as divisórias piezométricas dos aquíferos Serra Grande e Cabeças.

3.2.2.2 - Significado das divisórias isotópicas

Tanto o deutério como o oxigênio-18 são excelentes traçadores da água, já que estão incorporados em sua molécula e possuem um comportamento químico idêntico aos isótopos leves ^1H e ^{16}O . Por outro lado, as águas subterrâneas de onde procedem as amostras analisadas não podem estar afetadas pelo processo de evapotranspiração. Por estas razões, pode-se ter uma segurança quase absoluta de que a composição isotópica dos aquíferos não se altera com o tempo, a não ser como consequência de misturas naturais com outras águas de composição diferente. É certo que a concentração de ^{18}O pode modificar-se por processos de intercâmbio com o oxigênio das rochas, mas estes processos são extremamente lentos em temperaturas normais e, em qualquer caso, não afetariam nossas conclusões.

De acordo com o exposto, a caracterização isotópica de cada zona possui, por si própria, uma consistência suficiente para que dela se possam tirar conclusões em relação ao esquema de fluxos do sistema. Estas conclusões são as seguintes:

- a) - De um ponto de vista isotópico, não existe inconveniente para que a zona de recarga do aquífero confinado Serra Grande se encontre na área de afloramento desta formação, próxima à cabeceira do rio Fidalgo.
- b) - As águas da zona 2 não podem alimentar as áreas de confinamento do aquífero Serra Grande. Esta conclusão é apoiada pela piezometria do sistema e pela existência de uma barreira de diabases na região de Campinas do Piauí.
- c) - As águas da zona 3 tem sua composição isotópica devida, provavelmente, às infiltrações locais, sem que haja, praticamente, mistura dentro da formação cristalina. Isto justifica a grande dispersão das concentrações encontradas, mesmo em poços muito próximos um do outro. Esta falta de mistura também se observa em algumas áreas da zona 2.
- d) - A zona 4 parece encontrar-se ilhada hidráulicamente da região circunvizinha. Não se encontraram em torno desta zona poços com concentrações intermediárias que marquem as linhas de descarga da água desta zona; todas as mudanças de concentração são bruscas. Poderia haver a possibilidade de que a descarga se realize

por camadas mais profundas que aquelas de onde se extrai a água nos poços circundantes.

- e) - A zona 5 é bastante homogênea, com exceção do poço 137. Estas águas não podem deslocar-se até a zona 1, o que está de acordo com a piezometria do aquífero Cabeças nesta área.

3.2.2.3 - Considerações sobre o processo de recarga

Dada a reduzida extensão da área estudada, parece lógico descartar a possibilidade de que as diferenças de composições isotópicas das diferentes massas de água possam ser motivadas por mudanças na composição das precipitações locais. Se este fora o caso, ter-se-ia obtido uma distribuição de concentrações variando de forma gradual, em um determinado sentido e, de maneira alguma, ter-se-ia encontrado divisórias tão marcantes e em concordância com a litologia das formações ou com as divisórias piezométricas do sistema.

Devemos, portanto, admitir que a composição isotópica das precipitações é a mesma para toda a área estudada e que as mudanças se produzem durante o processo de infiltração. Por outro lado, devido a relação entre precipitação e evapotranspiração, a infiltração ocorre, principalmente, durante os meses de fevereiro e março. Em vista disso, as oscilações de concentração das precipitações durante o ano não explicam as diferentes concentrações das águas subterrâneas. Ao contrário, o fato de que é tão reduzido o período útil para a recarga, indica que o mais provável é serem as águas infiltradas em anos sucessivos procedentes de precipitações, com uma composição isotópica bastante uniforme.

Na Figura F-4 representaram-se, com traço descontinuo, as áreas onde se encontram a maioria dos pontos correspondentes às amostras de água analisadas. Quatro das cinco zonas descritas estão bem caracterizadas na referida figura. As concentrações mais baixas encontradas nas zonas 1 e 4 devem ser as mais próximas das concentrações médias das precipitações que contribuem para a recarga.

De acordo com o exposto, deve-se admitir que as águas com maiores concentrações das zonas 2, 3 e 5 procedem do mesmo tipo de precipitação que as correspondentes às zonas 1 e 4. O aumento de concentração deve estar motivado pela evaporação da água ocorrida antes da infiltração e cujos fatores já foram discutidos no item 3.2.1.2.

Deste modo, a infiltração das precipitações deve ser bastante rápida nas zonas 1 e 4, sem que exista evaporação prévia. Esta infiltração deve se produzir através dos afloramentos de arenitos de elevada permeabilidade. Nas áreas onde não existem tais afloramentos, a recarga deve ser quase nula. As precipitações que caem sobre estas últimas dão lugar ao escoamento superficial, por meio de riachos e baixios, que devem percorrer áreas impermeáveis e, por isso, não contribuem para a recarga. Em outras palavras, os afloramentos permeáveis areníticos não devem receber águas de escoamentos procedentes de outras áreas, pelo menos em quantidades significativas.

No entanto, a recarga das zonas 2, 3 e 5 se efetua por uma fase prévia em que as águas estão expostas à evaporação. Os quatro fatores citados no item 3.2.1.2 devem atuar de forma conjunta.

Para explicar o enriquecimento isotópico da água nesta fase prévia, podem ocorrer duas

hipóteses:

- a) - o processo de evaporação pode ocorrer ao longo da linha 2 (Figura F-4), ou seja, em condições mais próximas das de equilíbrio.
- b) - pode tratar-se de um processo misto, em que parte da recarga ocorre de forma direta e parte com evaporação prévia, segundo a inclinação da linha de evaporação 3. A mistura de ambas no sistema pode se dar segundo a linha 2.

Em qualquer caso, torna-se óbvio que, quando existe evaporação prévia, as concentrações para os diferentes poços apresentam uma grande dispersão originada pelo fato de que os períodos de evaporação são demasiado variáveis de uma zona a outra, por influência da topografia e da vegetação.

3.2.2.4 - Amostras de lagoas

As concentrações de deutério e oxigênio-18 foram medidas em amostras provenientes de sete lagoas e cujos resultados estão indicados na Tabela 17. Estes resultados foram também representados no diagrama da Figura F-4, determinando a linha 3 de evaporação e que obedece à equação: $\delta_D = 4,9 \delta_{18}$. Para maior informação incluíram-se também no diagrama os resultados de outras lagoas do vale do rio Gurgueia.

Devido ao regime de precipitações na região, é de se esperar que a água das lagoas se renove completamente cada ano, durante os meses de dezembro a abril. As concentrações de D e ^{18}O , ao finalizar este período, deverão corresponder a algum ponto da linha 3, não muito distante da intersecção com a linha 2. Ao término das precipitações, as lagoas prosseguem evaporando, com o conseqüente aumento das concentrações de D e ^{18}O ao longo da linha 3. À medida que a evaporação continua, estas concentrações tendem, assintoticamente, a estabilizar-se em um valor de equilíbrio. Este valor é atingido quando o volume da lagoa se reduz para 50 % a 80 % do volume inicial.

As lagoas em questão encontram-se em uma área onde as águas subterrâneas apresentam concentrações que oscilam em torno de - 33 ‰ para o deutério e - 5,3 ‰ para o oxigênio-18. Em nenhum dos poços analisados se encontram concentrações suficientemente elevadas que indiquem recarga pelas lagoas, embora muitos dos poços analisados se encontrem em suas proximidades. Depreende-se disso que as lagoas se encontram sobre materiais muito pouco permeáveis e que, possivelmente, foram se impermeabilizando cada vez mais durante o transcurso de tempo, por deposição de sedimentos finos transportados em suspensão.

A possibilidade de que as lagoas possam estar alimentadas pelo aquífero Serra Grande, através de fraturas das camadas superficiais, não foi constatada. Com este tipo de alimentação seria difícil justificar as elevadas concentrações em isótopos estáveis existentes nessas lagoas. Os resultados obtidos com trítio também confirmam estas conclusões (item 2.1.2.1).

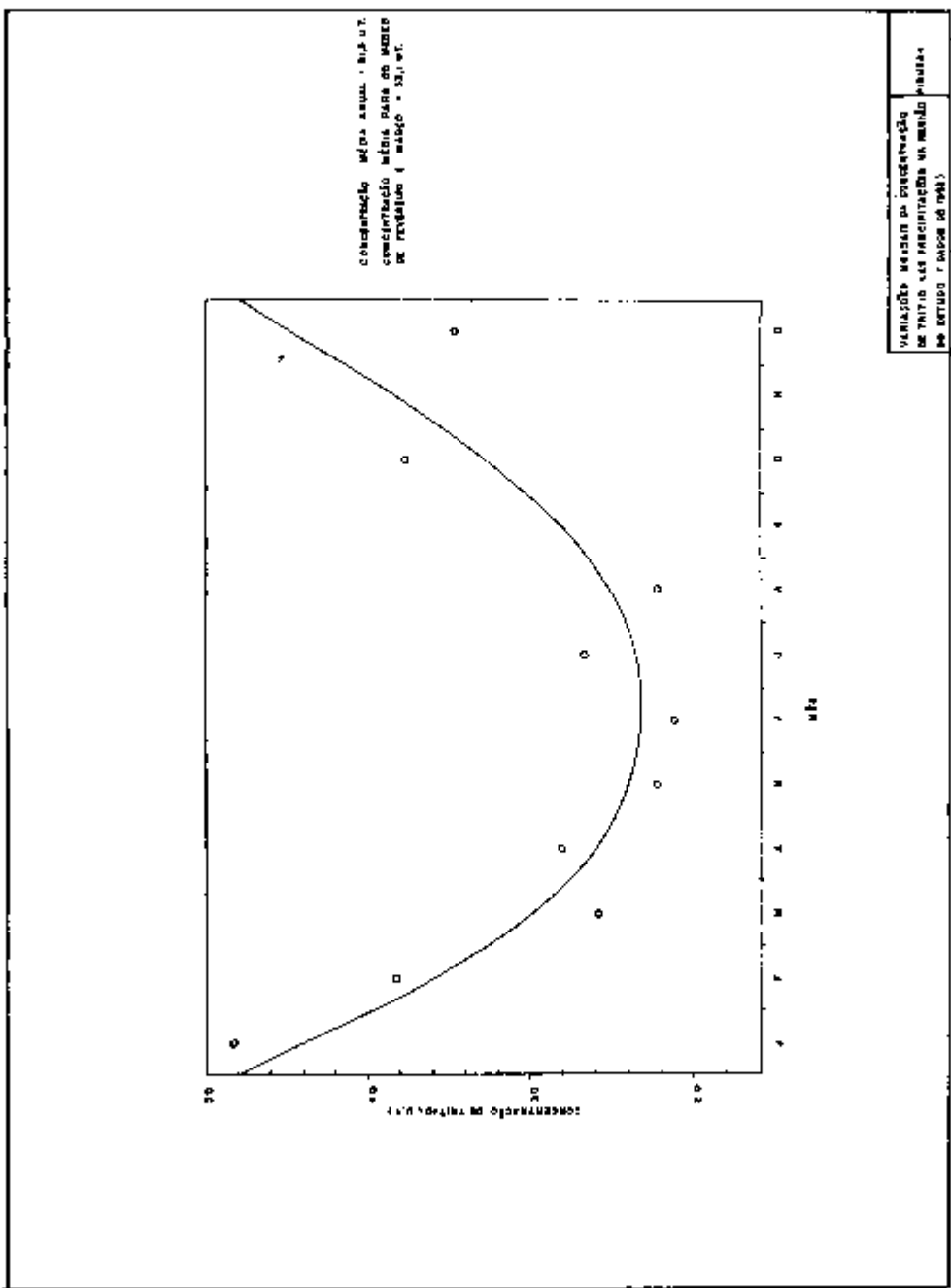
4.0.0 - EXPERIÊNCIAS COM CARBONO - 14

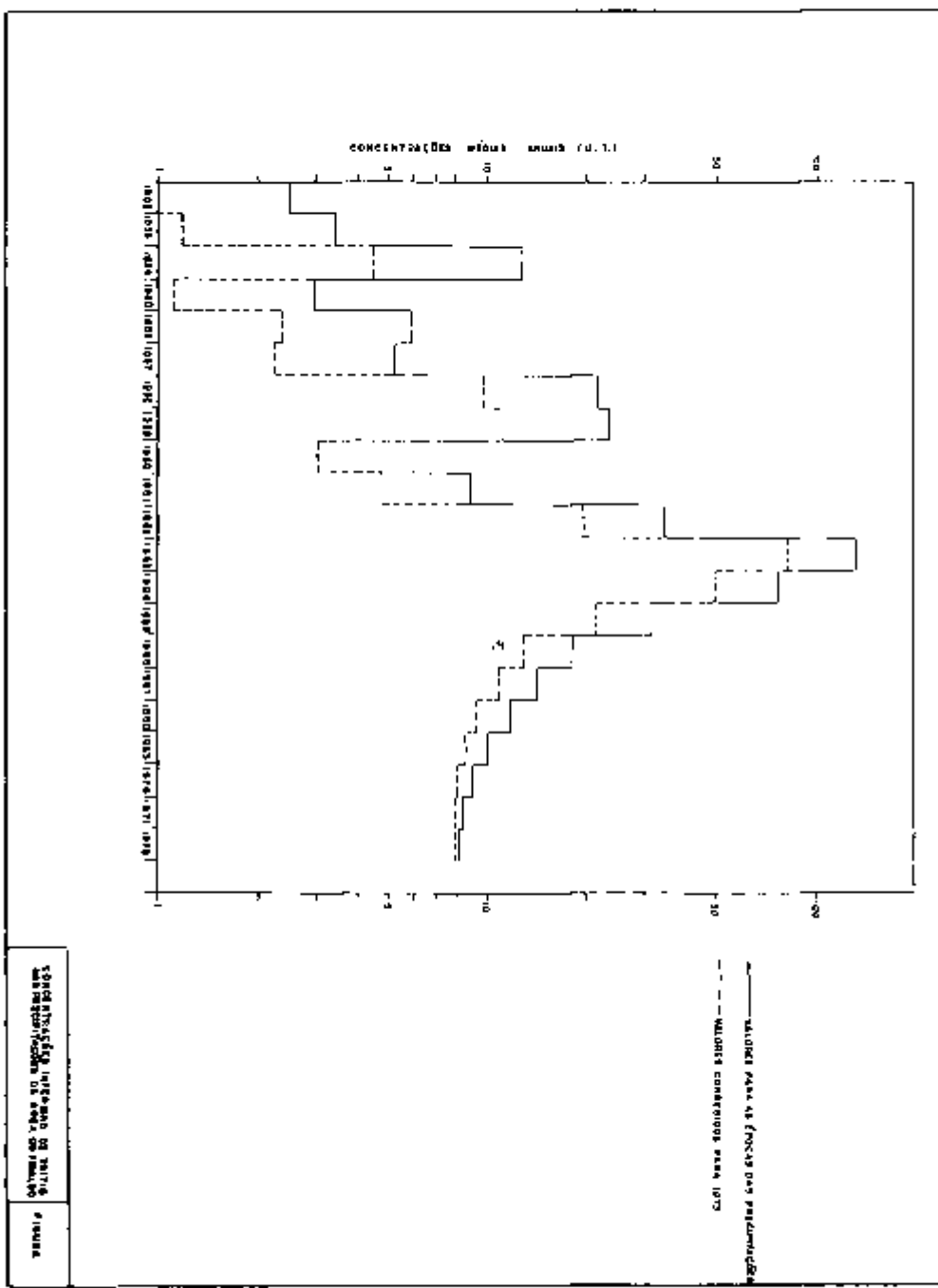
No momento em que este relatório está sendo escrito, os resultados das medições de carbono-14 não haviam, ainda, chegado ao nosso poder. Este importante sub-capítulo será objeto de um relatório adicional, o qual será elaborado assim que se disponha dos resultados.

TABELA 17

Concentrações de D e ¹⁸O em diversas lagoas da bacia do Rio Fidalgo

LAGOA	CONCENTRAÇÃO	
	δ_D (‰)	δ_{18} (‰)
Santa Rita	+ 23	+ 4,2
Da Comprida (Santa Rita)	+ 42	+ 8,5
Alagadiço Grande	+ 42	+ 8,2
Alagadiço Pequeno	+ 41	+ 8,5
Ipeúira	+ 19	+ 4,0
Da Volta	+ 37	+ 7,2
Boqueirãozinho	+ 38	+ 7,6

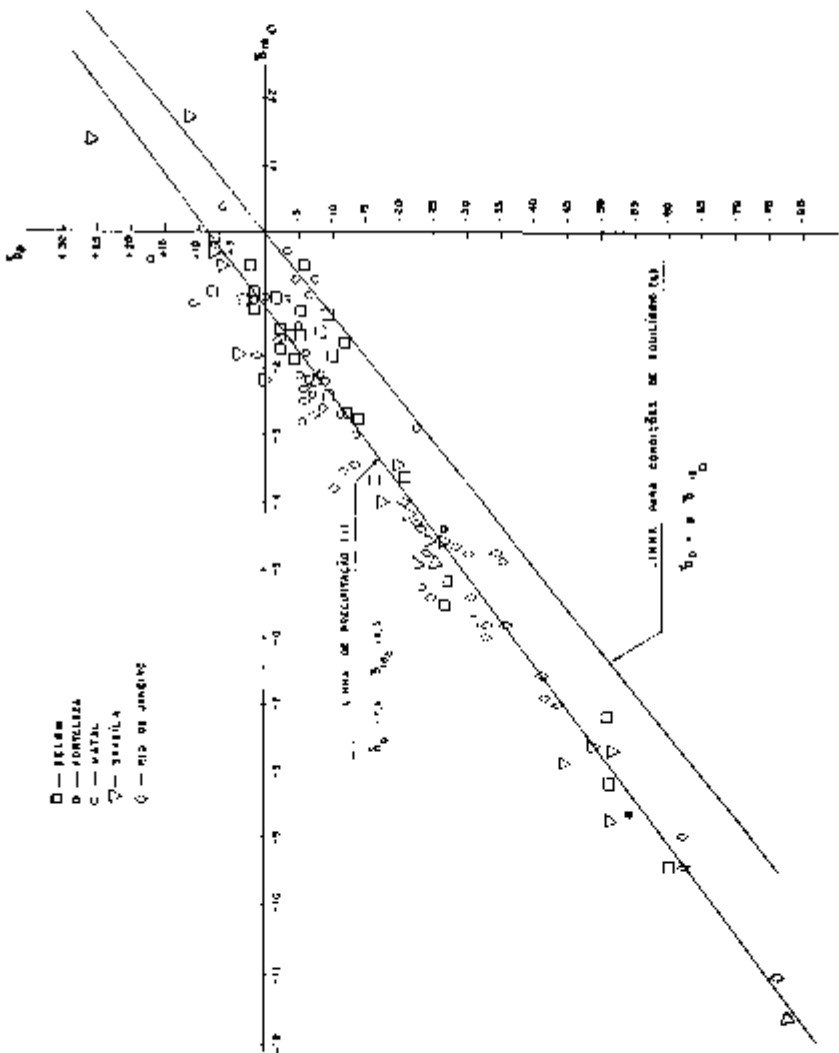


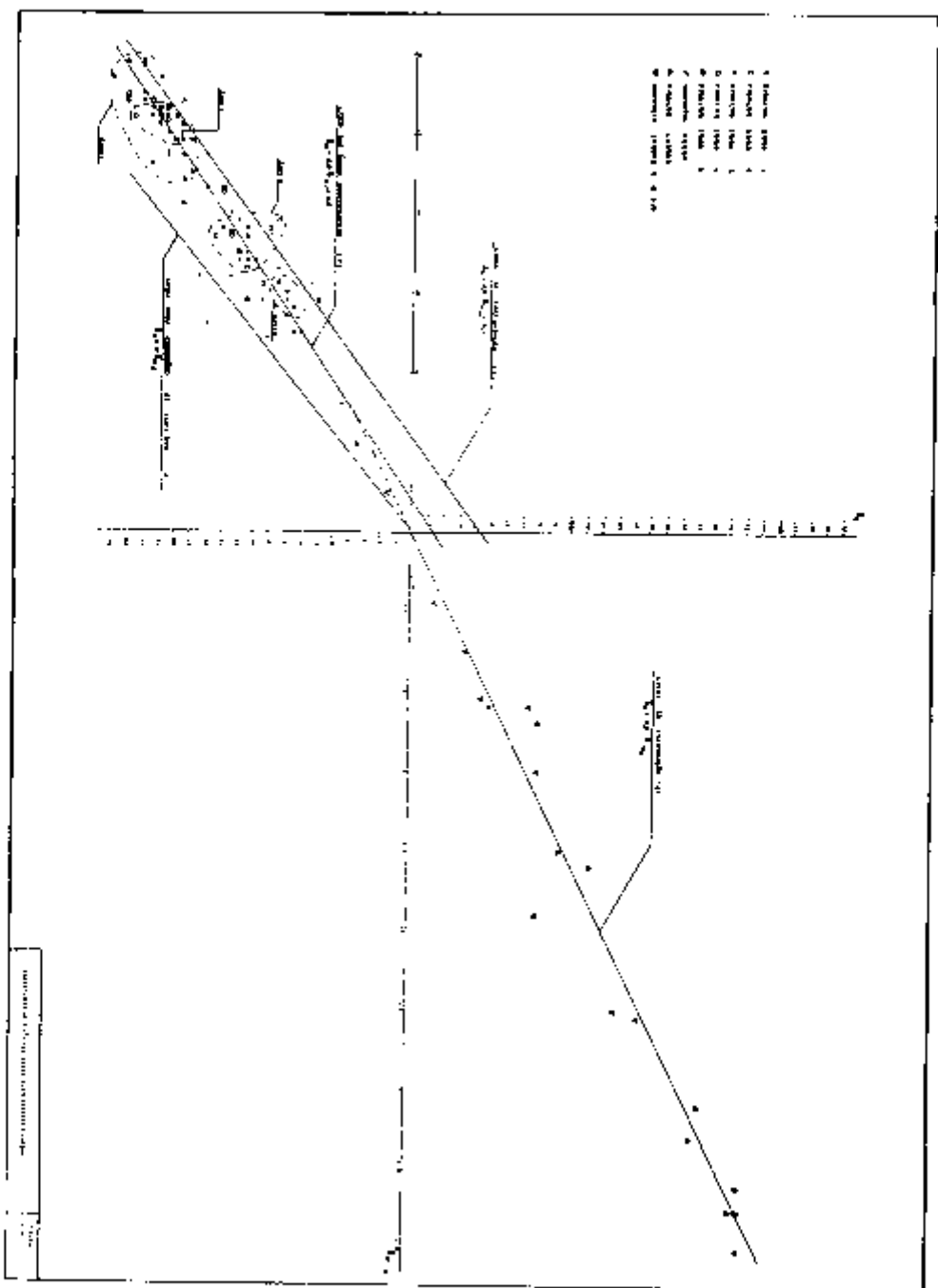


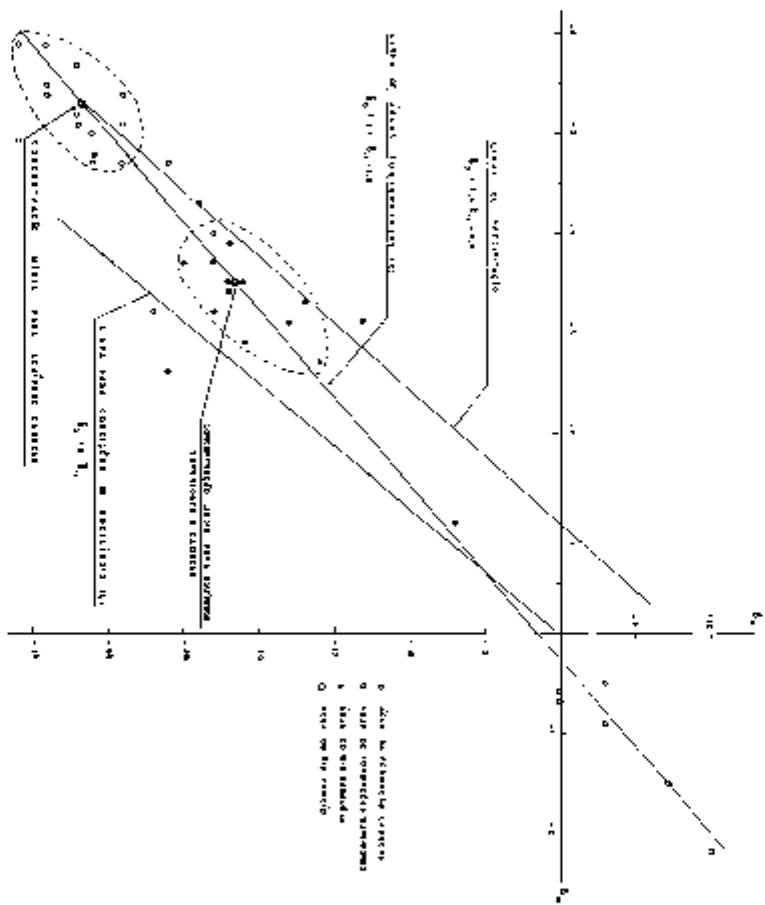
CONCENTRATIONS (mg/L) versus TIME (hr)

Figure 1

1-10000

Temperatura de equilíbrio
em $^{\circ}\text{C}$ de 10 a 25





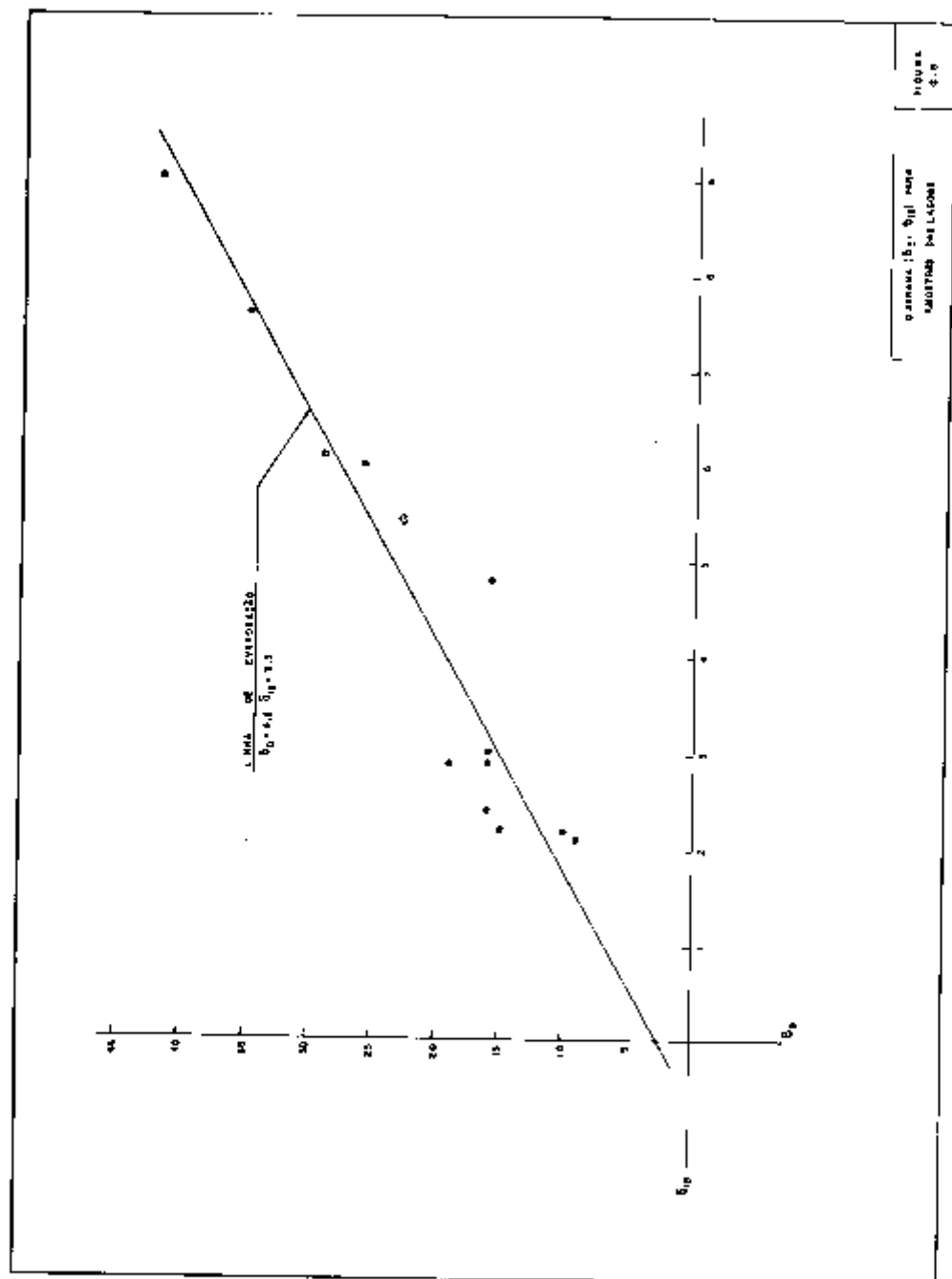


Figura 4.9

Y-axis: N_p (fish)
 X-axis: B_p (fish per trap)

ABSTRACT

Possibilities that surface and underground aquifers were actually connected, localization of the recharge zones, determination of its annual average rate of recharge, water age estimations, mixing of ancient and new water, and the possibility for the Gurguéia and Canindé rivers to drain underground aquifers, were studied by measuring the concentration of environmental isotopes (^3H , ^2H , ^{18}O , and ^{14}C) in 40 water samples.

27 of that samples were collected from different wells, and the remainder 13 from lagoons. In the last case, the samples were taken from the central region or at the water outlet. Because of the small dimensions of the investigated lagoons, it was assumed that the ^3H concentration was constant throughout the water mass.

The possibility that some lagoons were actually connected with subjacent underground reservoirs, was investigated by measuring in both aquifers the concentrations of the stable isotopes ^2H and ^{18}O . The river contributions to underground aquifer recharge as a function of the formations lithology, was also analysed through environmental isotopes.

This work was part of a general study on the irrigation prospects for the valleys of Gurguéia and Fidalgo rivers, in the Piauí State, carried out by the OESA-TECNOSOLO-OTI-EPTISA partnership at the request of DNOCS.

RÉSUMÉ

En mesurant les concentrations des isotopes du milieu ambiant, ^3H (tritium), ^2H (déutérium), ^{18}O (oxygène-18) et ^{14}C (carbone 14), dans les eaux des auitières de la Rivière Gurguéia (Formation Cabeças) et Fidalgo (Formation Serra Grande), on a étudié:

- l'interconnexion des eaux des étangs et aquifères sous-jacents;
- la localisation de zones de recharge des aquifères et la détermination de la recharge annuelle moyenne;
- la possibilité de mélange des eaux anciennes et récentes;
- les données générales sur l'âge des eaux souterraines;
- les possibilités de drainage des eaux souterraines aux rivières Gurguéia et Canindé.

On a analysé 40 échantillons d'eau, treize (13) desquelles provenant d'étangs et vingt sept (27) provenant de puits. Dans le cas des étangs, on a collecté des échantillons des parties centrales ou à la sortie de ceux-ci. Comme les étangs sont de petites dimensions, on a admis que la concentration du ^3H est uniforme dans toute la masse d'eau.

Les mesures des isotopes stables ^2H et ^{18}O ont proportionné des données pour rechercher l'interconnexion entre les eaux des étangs et celles des aquifères sous-jacents; la contribution des rivières à la recharge des aquifères et les modalités de la recharge des aquifères en fonction de la lithologie et de la texture des formations de superficie.

Ce travail fait partie de l'Etude Générale de Prospection pour Irrigations dans les Vallées des Rivières Gurguéia et Fidalgo, Piauí, réalisé par le complexe OESA-TECNOSOLO-EPTISA sollicité par le DNOCS.

5.0.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - PLATA BEDMAR, A. *Isótopos en Hidrología*. Madrid, Ed. Alhambra, 1972. 372p (ZAIROS, 8 - Sección II. Control y aprovechamiento de las aguas, 4).
- 2 - GUIZERIX, J. et alii. Appareil pour la mesure des vitesses relatives des eaux souterraines par la méthode de dilution ponctuelle. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Radioisotopes in hydrology: proceedings of a Symposium... in Tokyo, 5 - 9 March 1963*. Vienna, 1963. p. 25 - 35.
- 3 - BOROWCZYK, M. et alii. Laboratory investigations on the determination of filtration velocity by means of radioisotopes. *Atomkernenergie*, München, 10(1/2): 51-8, 1965.
- 4 - HALEVY, E. et alii. Borehole dilution techniques: a critical review. In: INTERNATIONAL

- ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. **Isotopes in hydrology: proceedings of a Symposium held by the IAEA in co-operation with the International Union of Geodesy and Geophysics, in Vienna, 14-18 Nov. 1966.** Vienna, 1967. p. 531-64.
- 5 KLOTZ, D. & MOSER, H. Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. VII. Messung kleiner Filtergeschwindigkeiten mit dem Verdünnungsverfahren. **Atomkernenergie**, München, 14 (6): 423-30, 1969.
 - 6 - HALEVY, E. & NIR, A. The determination of aquifer parameters with the aid of radioactive tracers. **J. geophys. Res.**, Baltimore, 67: 2403, 1962.
 - 7 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. **Tritium and other environmental isotopes in the hydrological cycle.** Vienna, 1967. 83p. (Technical reports series, 73).
 - 8 - WILSON, A.T. & FERGUSSON, G.T. Origin of terrestrial tritium. **Geochim. cosmochim. Acta**, London, 18: 273-7, 1960.
 - 9 - CRAIG, H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, Washington, 133: 1833-4, 1961.
 - 10 - DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. **Tellus**, Stockholm, 16(14): 436-68, 1964.
 - 11 - FRIEDMAN, et alii. The variation of the deuterium content of natural waters in the hydrologic cycle. **Rev. Geophys.**, 2(1):177-224, 1964.
 - 12 - GAT, J. R. & TZUR, Y. Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. **Isotopes in hydrology: proceedings of a Symposium held by the IAEA in co-operations with the International Union of Geodesy and Geophysics, in Vienna, 14-18 Nov. 1966.** Vienna, 1967. p. 49-60.
 - 13 - CRAIG, H. & GORDON, L. I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere. In: NORTH ATLANTIC TREATISE ORGANIZATION, Advanced Research Institute, Brussels. **Proceedings of the 3rd Symposium on Applications of Thermoluminescence to Geological Problems, held by NATO, in Spoleto, 1965.** New York, Academic Press, 1968.