

BR 9127469  
INIS BR - 2704

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE MARCAÇÃO  
DA UMIDADE DO SOLO COM TRÍTIIO ARTIFICIAL EM  
PESQUISAS HIDROGEOLÓGICAS NO BRASIL**

**DORA DE CASTRO RUBIO POLI**

**Tese apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção  
do Grau de Doutor em  
Tecnologia Nuclear.**

**Orientadora: Dra. Annkarin Aurélio Kimmelman e Silva**

**SÃO PAULO  
1989**

# APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE MARCAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO COM TRÍTIIO ARTIFICIAL EM PESQUISAS HIDROGEOLÓGICAS NO BRASIL

DORA DE CASTRO RUBIO POLI

## SUMÁRIO

As técnicas que utilizam radioisótopos artificiais em estudos hidrogeológicos, vêm sendo cada vez mais utilizadas dado o desenvolvimento na área nuclear, tanto em países desenvolvidos do hemisfério norte quanto em países em desenvolvimento, como a Índia e o Brasil.

No Brasil, estas técnicas foram introduzidas na década de 70, tendo sido continuamente comprovadas muitas vantagens em relação aos métodos tradicionalmente utilizados.

Neste trabalho foi aplicada e avaliada a técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial, em vários tipos de solos para a determinação da infiltração da precipitação na zona não saturada para a determinação da recarga de aquíferos, com a finalidade de auxiliar na avaliação de locais para disposição de rejeitos radioativos e em avaliações de recursos hídricos.

Esta técnica foi aplicada pela primeira vez no Brasil e em poucas vezes em regiões tropicais, sendo mais utilizada nas regiões áridas e semi-áridas.

Este trabalho pretende introduzir no país uma nova opção para a medida da taxa de recarga local, dada a disponibilidade do trítio artificial.

Baseando-se nos resultados obtidos, conclui-se que a técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial é uma ferramenta útil, precisa e provavelmente a melhor técnica disponível para se determinar a recarga de aquíferos.

# APPLICATION AND EVALUATION OF THE ARTIFICIAL TRITIUM TAGGING OF MOISTURE SOIL TECHNIQUE IN HYDROGEOLOGICAL RESEARCH IN BRAZIL

DORA DE CASTRO RUSIO POLI

## ABSTRACT

Hydrogeological studies with artificial radioisotope techniques were increased with the further development of the nuclear technology, and these studies are carried out in high developed countries of the Northern Hemisphere and also in underdeveloped countries such as India and Brazil.

About 1970, these techniques were introduced in Brazil and since then its advantages, in relation to traditional techniques, were continuously shown.

[ In this work, we apply and make an evaluation of the technique of artificial tritium tagging of moisture in many kinds of soils for the determination of rainfall infiltration in unsaturated zone. The purpose of this work is the determination of ground water recharge in order to assist in evaluation of sites for the disposal of radioactive wastes and also to assist in the evaluation of water resources.

The technique presented in this work was used for the very first time in Brazil, but it is sometimes used somewhere else in tropical regions and most frequently in arid and semi-arid regions.

[ With this thesis, we intend to present a new choice for the measuring of local ground water recharge rate, due to availability of artificial tritium.

From the experimental results obtained, we can conclude that the use of artificial tritium tagging method is an accurate, useful and probably the best available technique to determine ground water recharge.

## ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Objetivos .....	2
CAPÍTULO II - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE TRAÇADORES.	4
2.1. Definição .....	4
2.2. Traçadores utilizados em hidrogeologia.....	4
2.3. Traçador ideal .....	6
2.4. Vantagens e desvantagens do uso de traçadores radioativos .....	9 9
2.5. Detecção e medida .....	10
2.6. Considerações de segurança .....	11
CAPÍTULO III - CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRÍTIIO ARTIFI- CIAL .....	12
3.1. Propriedades físicas e químicas do trítio ....	12
3.2. Fontes de trítio .....	14
3.3. Produção artificial de trítio .....	18
3.4. Propriedades da água tritiada .....	19
3.5. Troca isotópica .....	20
3.6. Legislação .....	21
3.6.1. Radioproteção .....	22
3.6.2. Licença .....	23
3.6.3. Custo da água tritiada .....	24

	Pág.
<b>CAPÍTULO IV - AVALIAÇÃO DA RECARGA E DA TAXA DE IN- FILTRAÇÃO .....</b>	26
4.1. Introdução .....	26
4.2. Distribuição vertical da umidade .....	26
4.3. Métodos de cálculo da recarga .....	31
4.4. Modelos .....	37
4.4.1. Modelo I - Fluxo em Pistão .....	37
4.4.2. Modelo II - Fluxo em Pistão Modificado .....	39
4.4.3. Modelo III - Entrada Direta .....	40
4.4.4. Modelo HETP (Height Equivalent Theore- tical Plates) .....	40
 <b>CAPÍTULO V - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA REFERENTE À ME- TODOLOGIA .....</b>	 43
 <b>CAPÍTULO VI - METODOLOGIA .....</b>	 54
6.1. Água tritiada .....	54
6.2. Limite de detecção em geral .....	55
6.3. Cálculo da quantidade de traçador a ser utili- zado .....	56
6.4. Injeção .....	58
6.5. Amostragem .....	60
6.6. Medida de densidade e umidade do solo .....	62
6.7. Destilação das amostras de solo .....	62
6.8. Detecção de trítio pelo método dos detectores líquidos de cintilação .....	63
6.8.1. Mecanismo do processo de cintilação lí- quida .....	63

	Pág.
6.8.2. Espectrômetro de cintilador líquido ....	67
6.8.3. Soluções cintiladoras .....	69
6.8.4. Recipiente de medição .....	71
6.8.5. Relação água - "coquetel" de cintilação.	71
6.8.6. Espectro do trítio e a janela de trabalho .....	75
6.8.7. Eficiência de contagem .....	75
6.8.8. Janela de trabalho .....	78
6.8.9. Preparação das amostras .....	80
6.8.10. Reprodutibilidade dos resultados .....	80
6.9. Cálculo da recarga .....	82
<b>CAPÍTULO VII - APLICAÇÕES .....</b>	<b>85</b>
7.1. Avaliação de locais para disposição de rejeitos radioativos .....	85
7.2. Avaliação da recarga e umidade em zona semi-árida .....	86
7.3. Avaliação da recarga e umidade em terrenos subtropicais úmidos .....	87
<b>CAPÍTULO VIII - AVALIAÇÃO DE LOCAIS PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS .....</b>	<b>88</b>
8.1. Introdução .....	88
8.2. Tipos e acondicionamento de resíduos radioativos .....	89
8.3. Seleção de sítios .....	89
8.4. Considerações ambientais .....	91
8.5. Áreas de estudos .....	93
8.6. Antigo local de disposição de rejeitos radioativos do IPEN.....	94

	Pág.
8.6.1. Dados gerais sobre a área de estudo ...	94
8.6.2. Trabalho experimental .....	94
8.6.3. Discussão dos resultados .....	103
8.7. Sítio atual de disposição de rejeitos radioati- vos do IPEN .....	104
8.7.1. Dados gerais sobre a área de estudo ...	104
8.7.2. Trabalho experimental .....	106
8.7.3. Discussão dos resultados .....	107
8.8. Conclusão .....	115
CAPÍTULO IX - AVALIAÇÃO DA RECARGA E UMIDADE EM ZONA SEMI-ÁRIDA .....	116
9.1. Dados gerais sobre a área de estudo .....	116
9.2. Trabalho experimental .....	121
9.3. Discussão dos resultados .....	142
9.4. Conclusão .....	145
CAPÍTULO X - AVALIAÇÃO DA RECARGA E UMIDADE EM TER- RENOS SUBTROPICAIS ÚMIDOS .....	146
10.1. Estação Experimental para Estudo da Dinâmica e da Evolução da Composição Química da Água na Zona não Saturada (Viveiro, USP) .....	146
10.1.1. Dados Gerais sobre o local de estudo.	146
10.1.2. Trabalho experimental .....	148
10.1.3. Discussão dos resultados .....	149
10.2. Cajati-Jacupiranga .....	152
10.2.1. Dados gerais sobre a área de estudo..	152
10.2.2. Parte Experimental .....	154
10.2.3. Discussão dos resultados .....	164

	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO XI - CONCLUSÕES .....</b>	<b>166</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>168</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 3.1. Conteúdo de trítio na precipitação de Halley Bay (JOUZEL, 1979) .....	18
Figura 4.1. Diagrama esquemático do ciclo hidrológico (BEAR, 1979).....	27
Figura 4.2. Divisões da água sub-superficial CETESB, 1978) .....	29
Figura 4.3. Diagrama da água do solo mostrando classes e pontos de equilíbrio (TODD, 1959).	29
Figura 4.4. Representação esquemática dos modelos : I. Fluxo em Pistão; II. Fluxo em Pistão Modificado e III - Entrada Direta (ALLISON & HUGHES, 1974) .....	38
Figura 4.5. Modelo de Multicaixas (HETP) do movimento da umidade do solo (MÜNNICH, 1983)..	42
Figura 6.1. Representação esquemática da injeção de água tritiada no solo .....	61
Figura 6.2. Sistema de destilação de solo utilizado neste trabalho .....	64
Figura 6.3. Processo de cintilação líquida (SAMPA, 1979) .....	66
Figura 6.4. Diagrama de blocos do espectrômetro de cintilador líquido .....	68

Figura 6.5. Contagem em função da relação água/agua sol para uma atividade, A, constante e volume de água variável (Dados obtidos experimentalmente no espectrômetro de LKB Wallac).....	73
Figura 6.6. Contagem em função da relação água/agua sol para um volume total constante ( V= 20ml). Dados obtidos experimentalmente no espectrômetro LKB Wallac).....	74
Figura 6.7. Espectros do trítio e da radiação de fundo, do espectrômetro de cintilador líquido LKB Wallac.....	77
Figura 6.8. Distribuição do trítio x perfil esperado .....	84
Figura 8.1. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 2 meses da injeção. Data da amostragem: 24/07/79 .....	96
Figura 8.2. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 3 meses da injeção. Data da amostragem: 24/08/79 .....	97
Figura 8.3. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 6 meses da injeção. Data da amostragem: 28/11/79 .....	98
Figura 8.4. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 9 meses da injeção. Data da amostragem: 25/02/80 .....	99
Figura 8.5. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 12 meses da injeção. Data da amostragem: 28/05/80.....	100
Figura 8.6. Dados do movimento da umidade do solo em relação à precipitação e à evaporação .....	102

Figura 8.7. Localização do sítio para disposição de rejeitos radioativos (MARCELINO, 1983).	105
Figura 8.8. Perfil de trítio e de umidade após 3 meses da injeção. Data da amostragem: 30/11/81 .....	108
Figura 8.9. Perfil de trítio e de umidade após 6 meses da injeção. Data da amostragem: 03/03/82 .....	109
Figura 8.10. Perfil de trítio e de umidade após 9 meses da injeção. Data da amostragem: 08/06/82 .....	110
Figura 8.11. Perfil de trítio e de umidade após 12 meses da injeção. Data da amostragem: 27/08/82 .....	111
Figura 8.12. Análise de sondagem de local de estudo .....	112
Figura 8.13. Deslocamento do trítio e recarga do aquífero durante o período de um ano..	114
Figura 9.1. Mapa de localização do estado do Rio Grande do Norte (IPT, 1979) .....	118
Figura 9.2. Localização da bacia da Costa Leste, no estado do Rio Grande do Norte (IPT, 1979) .....	119
Figura 9.3. Localização dos pontos de injeção (SANTOS, 1984) .....	124
Figura 9.4. Perfil de trítio e de umidade após 6 meses da injeção, Campo Limpo, RN ....	128
Figura 9.5. Perfil de trítio e de umidade após 6 meses da injeção do trítio, Mipibu, RN	129

Figura 9.6. Perfil trítio e de umidade após 6 meses da injeção do trítio, Local próximo ao Poço IPT 978/440, RN .....	130
Figura 9.7. Perfil do trítio e de umidade após 6 meses da injeção do trítio, Posto da Marinha, RN .....	131
Figura 9.8. Perfil de trítio e de umidade após 6 meses da injeção do trítio, Extremoz, RN .....	132
Figura 9.9. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Goianinha, RN .....	133
Figura 9.10. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Campo Limpo, RN.....	134
Figura 9.11. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. São José do Mipibú, RN	135
Figura 9.12. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Local próximo ao poço IPT 978/440, RN .....	136
Figura 9.13. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Posto da Marinha, RN ..	137
Figura 9.14. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Extremoz, RN .....	138
Figura 9.15 Mapa geológico do local (IPT, 1981)...	140
Figura 10.1. Perfil da extração experimental (SZI-KSAY, 1980).....	148
Figura 10.2. Perfil do trítio e de umidade após 5 meses da injeção - Viveiro/USP.....	150
Figura 10.3. Mapa geológico do maciço alcalino de Jacupiranga (FRIEDRICH, 1988) .....	155

Figura 10.4. Perfil de alteração do Dunito (OLIVEIRA, 1988) .....	156
Figura 10.5. Localização dos pontos de injeção de trítio - Fazenda São Francisco - Cajati, Profundidade de injeção: 50 cm....	157
Figura 10.6. Perfil de trítio e de umidade após 1 mês da injeção - Cajati .....	159
Figura 10.7. Perfil de trítio e de umidade após 6 meses da injeção - Cajati .....	160
Figura 10.8. Perfil de trítio e de umidade após 9 meses da injeção - Cajati .....	161
Figura 10.9. Perfil de trítio e de umidade após 12 meses da injeção - Cajati .....	162

## ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1. Características principais dos traçados artificiais mais utilizados em hidrogeologia (BEDMAR, 1972) .....	7
Tabela 3.1. Sumário de parâmetros principais para o trítio .....	13
Tabela 3.2. Propriedades do trítio (JACOBS, 1968).	13
Tabela 3.3. Distribuição de produção natural de trítio na estratosfera (CRAG, 1975)...	14
Tabela 3.4. Estimativa da produção de trítio por explosões termonucleares (ERICKSON, 1966) .....	15
Tabela 3.5. Projeção da quantidade total de trítio liberada de todas as fontes (MCI), (NCRP Report nº 62, 1979).....	17
Tabela 3.6. Propriedades termodinâmicas dos óxidos de hidrogênio (NCRP Report nº 62, 1979)	20
Tabela 3.7. Limites anuais para ingestão e inalação de trítio e água tritiada (CNEN, 1988).....	22
Tabela 6.1. Tipos e recipientes de medição (SAMPA, 1979) .....	72
Tabela 6.2. Espectro do trítio e da radiação de fundo, do espectrômetro LKB Wallac....	76

	Pág.
Tabela 6.3. Valores da figura de mérito para diversas janelas de trabalho, do espectrômetro de cintilador líquido LKB Wallac..	79
Tabela 8.1. Características gerais das categorias de resíduos radioativos em relação à disposição (SS nº 54, 1981) .....	90
Tabela 8.2. Considerações hidrológicas na seleção de sítios (SS nº 53, 1981) .....	92
Tabela 8.3. Datas de amostragens de solo .....	85
Tabela 8.4. Dados do movimento da umidade do solo e recarga do aquífero para o antigo local de disposição de rejeito radioativo no IPEN (maio/79 - maio/80). Data da injeção: 24/05/79 .....	101
Tabela 8.5. Dados do movimento da umidade do solo e da recarga após 3, 6, 9 e 12 meses da injeção. Data da injeção: 26/08/81 ....	113
Tabela 9.1. Pluviometria e temperatura médias mensais na Bacia da Costa Leste (1911/79) (IPT, 1981) .....	118
Tabela 9.2. Coluna estratigráfica da Bacia da Costa Leste (IPT, 1981) .....	122
Tabela 9.3. Primeira amostragem (6 meses após a injeção) .....	125
Tabela 9.4. Segunda amostragem (12 meses após a injeção) .....	126
Tabela 9.5. Dados do movimento da umidade do solo e da recarga do aquífero após 6 meses da injeção do trítio.....	139

Pág.

Tabela 9.6. Dados da migração da unidade e recarga do aquífero após um ano da injeção do trítio.....	141
Tabela 10.1. Dados do movimento da unidade do solo e recarga do aquífero em Cajati (abril de 1988 a abril de 1989) - Data da injeção de trítio: 14/04/88 .....	163

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A aplicação de técnicas que utilizam radioisótopos artificiais em estudos hidrogeológicos tem aumentado consideravelmente nos últimos anos dado o desenvolvimento na área nuclear, tanto em países desenvolvidos do hemisfério norte quanto em países em desenvolvimento como a Índia e o Brasil.

A complexidade intrínseca que caracteriza a maioria dos sistemas hidrogeológicos dificulta a elaboração de modelos matemáticos que representem adequadamente o comportamento físico do sistema considerado. Assim, torna-se importante o desenvolvimento de novas técnicas para a determinação de parâmetros indispensáveis ao cálculo do balanço hídrico de um sistema, com comparação dos resultados obtidos por diferentes métodos.

Um dos fatores mais importantes na avaliação de recursos hídricos de uma região é a recarga de aquíferos.

Vários métodos de determinação de recarga são disponíveis. Estes métodos podem ser classificados em convencionais e isotópicos.

Os métodos convencionais, tais como, lisímetro, armazenamento, inventário etc., requerem o conhecimento dos dados hidrometeorológicos da área em estudo. Face a esses problemas, as técnicas isotópicas têm sido usadas com maior frequência

nos últimos anos, envolvendo o uso de traçadores ambientais ou artificiais, para a estimativa da recarga de aquíferos.

A técnica que utiliza o trítio artificial como traçador baseia-se na marcação da umidade do solo, numa determinada profundidade. O traçador se move juntamente com a umidade do solo por causa da subsequente precipitação ou evaporação. O deslocamento do traçador é indicado pelo pico em sua concentração ou pelo centro de gravidade do perfil de trítio. O conteúdo de umidade da coluna de solo entre a profundidade de injeção e a de deslocamento do traçador é a medida da recarga do aquífero no intervalo de tempo entre a marcação e a amostragem do solo.

As principais vantagens desse método, são: não causa mudanças nas condições naturais, pode ser aplicado no campo sem requerer equipamentos sofisticados e, em geral, tem um custo relativamente baixo.

Uma aplicação importante da técnica de marcação da umidade do solo é na avaliação de locais para disposição de rejeitos radioativos no solo. O rejeito radioativo que é estocado no subsolo ou na superfície, poderá sofrer, com o tempo, infiltração vertical junto com a água e a seguir poderá se mover horizontalmente na direção do fluxo da água subterrânea.

## 1.2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho, são:

- A aplicação pioneira no Brasil de uma técnica específica, a de marcação da umidade do solo com trítio artificial,
- Aplicar e avaliar a técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial, em vários tipos de solos para

a determinação da infiltração da precipitação na zona não saturada,

- Determinar a recarga de aquíferos com a finalidade de auxiliar na avaliação de locais para disposição de rejeitos radioativos e em avaliações de recursos hídricos,

- Introduzir no país uma nova opção para a medida de taxa de recarga local, dada a disponibilidade do trítio artificial e a falta de laboratórios com condições de medir trítio ambiental, além da dificuldade de se obter perfis de trítio bem definidos no hemisfério sul.

## CAPÍTULO II

### CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE TRAÇADORES

#### 2.1. DEFINIÇÃO

O termo "traçador" é dado indiscriminadamente a qualquer produto que incorporado à massa de uma substância permite investigar o seu comportamento num determinado processo físico ou químico (BEDMAR, 1972).

#### 2.2. TRAÇADORES UTILIZADOS EM HIDROGEOLOGIA

Os traçadores usados em hidrogeologia podem ser divididos em:

1. Traçadores químicos
2. Traçadores isotópicos

##### 1. Traçadores químicos

Os traçadores químicos normalmente utilizados, são: sais de cloretos solúveis em água, fenóis, ácido bórico, detergentes etc., que são determinados por análises químicas. Os corantes: fluoresceína, dicromato de potássio, rodamina B, eosina, vermelho de congo, azul de metileno, anilina etc., também são usados e são determinados por colorimetria.

O traçador químico mais utilizado é o ânion cloreto. Sua retenção nos materiais sólidos é quase nula, sua determinação analítica é simples porque pode ser medido por técnicas conductimétricas. Entretanto, apresenta um inconveniente,

pois existe naturalmente na água o que leva a resultados errôneos. Em alguns casos, é necessário adicionar grandes quantidades de traçador e isso altera consideravelmente a densidade da água.

Entre os corantes, o dicromato de potássio é muito usado para estudos de fluxos superficiais. Ele pode ser detectado em concentrações de até  $2 \times 10^{-3}$  mg/l, por meio de técnica colorimétrica, que se baseia na reação com difenil carbazida (BEDMAR, 1972). Mas, há risco do cromo hexavalente ser reduzido a trivalente pelas substâncias redutoras presentes na água.

## 2. Traçadores isotópicos

Os traçadores isotópicos podem ser divididos em:

A. Naturais ou ambientais: estáveis e radioativos

B. Artificiais

### A. Traçadores isotópicos ambientais

Os traçadores ambientais são os isótopos estáveis e/ou radioativos. Eles ocorrem naturalmente ou são produzidos pelo homem, mas são tão espalhados que fazem parte integrante do ambiente. Os isótopos ambientais normalmente usados em hidrogeologia, são os isótopos estáveis:  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{15}\text{N}$  e os isótopos radioativos:  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{32}\text{Si}$  etc.

### B. Traçadores radioativos artificiais

Os traçadores radioativos artificiais são os radioisótopos obtidos pelo bombardeio de núcleos estáveis com partículas nucleares, normalmente com nêutrons num reator nuclear.

Esses traçadores são detectados por meio das radiações emitidas. Os emissores  $\gamma$  são os preferidos por causa da maior facilidade de medida "in-situ".

Os traçadores artificiais mais úteis em hidrogeolo-

gia são resumidos na Tabela 2.1. onde são mostrados as suas características principais.

Além dos traçadores indicados na Tabela 2.1., também têm sido utilizados os seguintes traçadores:  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{58}\text{Co}(\text{CN})_6\text{K}_3$ ,  $^{124}\text{Sb-EDTA}$ ,  $^{103}\text{Ru-EDTA}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}(\text{CN})_2\text{K}$ ,  $^{35}\text{S}$ , etc.

Nesta tese será discutido o traçador trítio artificial, cuja aplicação é o objetivo do trabalho.

### 2.3. TRAÇADOR IDEAL

Um traçador ideal para uso hidrogeológico deve cumprir as seguintes condições (BEDMAR, 1972; AOKI, 1983):

1. Seguir fielmente o movimento da água.

Esta condição exige que:

- O traçador não deve reagir quimicamente com a água, pois sua identificação posterior pode ser prejudicada.
- Não deve modificar sua concentração durante o fenômeno em estudo pela interação com os materiais sólidos do meio.
- Não deve reagir quimicamente com os materiais do meio.
- Não deve haver troca iônica, adsorção e precipitação química ou coloidal.
- A quantidade de traçador utilizada, não deve modificar significativamente a densidade, viscosidade ou temperatura da água, para não ocorrerem alterações no fluxo natural.
- Os fenômenos de dispersão e de difusão do traçador devem ser análogos aos da molécula da água.

2. Quando se trata de traçador adicionado ao meio em estudo, este não deve estar contido na água em grandes quantidades, que possa interferir nos resultados.

TABELA 2.1. Características principais dos traçadores artificiais mais utilizados em hidrogeologia.  
(BEDMAR, 1972)

Isótopo	T <sub>1/2</sub>	Radiação emitida	Vantagens e inconvenientes	Aplicações
<sup>3</sup> H	12,33 anos	β <sup>-</sup>	É normalmente utilizado na forma de HTO. É o único radioisótopo cujo comportamento é igual ao da água.	recarga, tempo de trânsito.
<sup>131</sup> I	8 dias	γ	É comumente usado na forma de ânion iodeto para experiências de duração inferior a 30 dias. O iodo, por causa dos diferentes estados de oxidação, pode ser inconveniente se existir agentes oxidantes no meio.	velocidade do fluxo da água subterrânea.
<sup>51</sup> Cr	27,8 dias	γ	É normalmente usado na forma de Cr-EDTA. É um traçador de amplas possibilidades. Quando usado em águas subterrâneas pode ocorrer perda do traçador principalmente quando há rochas que contenham ferro, manganês e magnésio.	direção do fluxo da água subterrânea.
<sup>82</sup> Br	36 horas	γ	É utilizado na forma de ânion brometo. Seu comportamento em águas subterrâneas é satisfatório por que não é absorvido pelos materiais sólidos do meio.	velocidade do fluxo da água subterrânea.

3. Deve ser susceptível a determinação quantitativa para uma concentração muito baixa, preferencialmente pela detecção "in-situ".
4. Deve ser facilmente solúvel em água.
5. Não deve contaminar o meio em estudo por longos períodos de tempo.
6. Deve ser de baixo custo, de fácil manipulação e inócuo para os seres vivos.

Como não existe um traçador que cumpra perfeitamente as condições ideais e por causa do grande número de problemas que se utilizam traçadores, não é possível selecionar um traçador que se adapte a todos eles.

Em alguns casos, a escolha do traçador é complexa, necessitando-se um estudo prévio de laboratório e/ou de campo para comprovar o comportamento do soluto (traçador em determinada forma química) em relação ao absorvedor (água).

De um modo geral, a escolha de um traçador depende de situações particulares, como por exemplo, quando se trata de águas subterrâneas ou superficiais e do tipo de investigação em particular.

Em hidrogeologia se usam traçadores para resolver os seguintes problemas:

- interconexão entre poços profundos;
- medida de vazão;
- determinação de tempo de trânsito de águas subterrâneas;
- medida de dispersão;
- medida de tempo de residência das águas;
- medida de tempo de difusão e transporte de materiais adicionados;
- localização e medição de fugas;

- determinação da concentração de sedimentos transportados por um rio;
- determinação de arraste de sedimentos pelas águas nos leitos dos rios ou no litoral marinho,
- determinação de erosão pluvial;
- medida de densidade dos sedimentos no fundo de lagoas, represas, portos e vias de navegação;
- determinação de porosidade efetiva, permeabilidade, velocidade horizontal e fluxo vertical;
- medida de direção e sentido de fluxo;
- datação de águas subterrâneas etc.

#### 2.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS

As vantagens dos traçadores radioativos artificiais em comparação com os traçadores químicos, são:

a) extraordinária sensibilidade de detecção, permitindo diluições extremas. Por exemplo,  $3,7 \times 10^{10}$  Bq (1 Ci) de  $^{131}\text{I}$  pode marcar  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  de água, enquanto que uma marcação semelhante com fluoresceína ou dicromato de potássio seriam necessários  $\approx 500 \text{ kg}$  desses produtos (BEDMAR, 1972).

b) possibilidade de medida "in-situ".

c) vida limitada do traçador, não produzindo contaminações e podendo ser escolhido de acordo com sua meia vida, com base na duração da experiência. Esta vantagem é importante quando se trata de águas subterrâneas pois elas são de renovação lenta.

d) a medida do traçador é seletiva e portanto não há interferência de outros materiais contidos na água, radioativos ou não. Esta propriedade permite a utilização simultânea de dois ou mais traçadores numa mesma experiência.

As desvantagens dos traçadores radioativos artificiais, são:

a) necessidade de autorização para aquisição e aplicação de materiais radioativos.

b) os isótopos de meia vida curta devem ser adquiridos e usados em datas fixas.

c) os equipamentos de medida geralmente são mais caros que os utilizados para os traçadores não radioativos.

## 2.5. DETECÇÃO E MEDIDA

O termo detecção é usado não somente para indicação da presença da radiação nuclear, mas também para a medida da quantidade, energia e propriedades relacionadas. Um sistema de detecção consiste basicamente de duas partes, um detector e um aparelho de medida.

Os diferentes tipos de detectores podem ser caracterizados pela natureza da interação da radiação com o detector. Vários tipos operam em função da ionização que é produzida neles pela passagem de partículas carregadas, como por exemplo: câmaras de ionização, contadores proporcionais, contadores Geiger-Müller, contadores de cristais e câmaras de nuvem. Os detectores que produzem luminescência por excitação e ionização incluem-se os cintiladores e as emulsões. Os detectores de estado sólido, Germânio-Lítio e Silício-Lítio apresentam alto poder de resolução da radiação gama.

Os detectores de cintilação são os mais empregados para traçadores artificiais porque apresentam alta sensibilidade de detecção e medida da radiação  $\gamma$ . Para emissores  $\beta$  de baixa energia, que é o caso do trítio, os mais indicados são os detectores líquidos de cintilação, que será discutido em

mais detalhes no Capítulo 6.

## 2.6. CONDIÇÕES DE SEGURANÇA

O uso de rádioisótopos artificiais em estudos hidrogeológicos, como em qualquer outro campo de aplicação requer considerações de segurança e proteção radiológica. As recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (SAFETY SERIES nº 9, 1982), indicam que:

- Para se evitarem exposições desnecessárias, nenhuma prática deve ser autorizada pelas autoridades competentes, a menos que se garanta que os benefícios resultantes sejam suficientes para justificar os detrimientos resultantes de uma exposição à radiação ionizante.

- O projeto, planejamento e execução, das práticas com materiais radioativos, devem ser realizados de modo que as exposições à radiação sejam tão baixas quanto possíveis, considerando também os fatores econômicos e sociais.

- Devem ser observados os limites anuais máximos de dose efetiva tanto para os trabalhadores (50mSv) quanto para o público em geral (5mSv).

A legislação no Brasil será discutida no Capítulo 6.

**CAPÍTULO III**  
**CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRÍTIO ARTIFICIAL**

**3.1. PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO TRÍTIO**

O hidrogênio possui três isótopos, dois estáveis e um radioativo (EVANS, 1974):

$^1\text{H}$  - hidrogênio ou próton (estável)

$^2\text{H}$  - deutério ou hidrogênio pesado (estável)

$^3\text{H}$  - trítio (radioativo)

O trítio é um emissor  $\beta$  puro, decaindo a  $^3\text{He}$  pela seguinte reação (EVANS, 1974):



É conveniente expressar a quantidade de trítio ( $^3\text{H}$  ou T) em unidades de trítio, onde 1 UT é definida como um átomo de  $^3\text{H}$  por  $10^{18}$  átomos de H, ou 1 UT é equivalente a 7,2 dpm/l de água ou 3,2pCi/l, ou 120mBq/l de água (TRS nº 207, 1987).

O peso atômico do  $^3\text{H}$  é  $3,016997 \pm 0,000001\text{g}$ , comparados com  $^1\text{H}$  e  $^2\text{H}$ , de  $1,008142 \pm 0,000003$  e  $2,014735 \pm 0,000006\text{g}$  (JACOBS, 1968).

A Tabela 3.1 apresenta um sumário de parâmetros principais para o trítio.

A tabela 3.2. fornece algumas propriedades do trítio (JACOBS, 1968).

TABELA 3.1. Sumário de parâmetros principais para o trítio

Parâmetro	Valor	Fonte
radiação	$\beta$ (100%)	EVANS, 1974
produto de decaimento	$^3\text{He}$	EVANS, 1974
$T_{1/2}$	12,38 $\pm$ 0,03 anos	OLIVER, 1989
	12,33 anos	TRS nº 273, 1987 TABLE OF ISOTOPES, 1987
peso atômico	3,016997 $\pm$ 0,000001	JACOBS, 1968
$E_{\beta_{\text{max}}}$	18,610 $\pm$ 0,016keV	OLIVER, 1989
$E_{\beta_{\text{med}}}$	5,6928 $\pm$ 0,0033keV	OLIVER, 1989
radiação acima de 17keV	0,05%	EVANS, 1974
partículas $\beta$ :		EVANS, 1974
alcance no ar	4,5 - 6mm	
penetração máxima	0,6mg/cm <sup>2</sup>	
meia espessura	0,039mg/cm <sup>2</sup> e 0,1 $\mu\text{mAl}$	

TABELA 3.2. Propriedades do trítio (JACOBS, 1968)

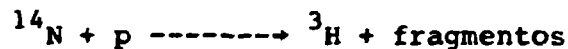
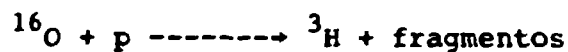
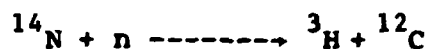
Parâmetro/unidade	HAMMEL (1949)	GRILLY (1950)
temperatura crítica, ( $^{\circ}\text{K}$ )	43,7	
volume crítico, cm <sup>3</sup> /mol	53,7	
pressão crítica, atm	20,8	
temperatura do ponto triplo, $^{\circ}\text{K}$	21,65	20,27
pressão do ponto triplo, mm/Hg	188	157,4
ponto de ebulição, $^{\circ}\text{K}$	25,57	24,92

### 3.2. FONTES DE TRÍTIO

O trítio provém de duas fontes: a natural e a artificial.

#### A. Fonte natural

A fonte natural é a produção pela interação da radiação cósmica de alta energia com componentes atmosféricos, principalmente por prótons de alta energia, com nitrogênio e oxigênio. As estimativas da concentração de trítio dessa fonte variam, mas parece ser da ordem de 7UT. As reações mais importantes, são (PAYNE & HALEVY, 1968):



Segundo CRAG (1975), a produção de trítio por processos naturais na estratosfera, não é uniforme na superfície terrestre, sendo distribuída em diversas faixas de latitude (Tabela 3.3., CRAG, 1975).

TABELA 3.3. Distribuição de produção natural de trítio na estratosfera (CRAG, 1975)

Intervalo de latitude	Tempo de residência (anos)	Fração de produção total (%)
0° - 20°	6,0 ± 2,0	8
20° - 30°	3,0 ± 1,0	7
30° - 45°	1,5 ± 0,5	20
> 45°	1,0 ± 0,3	65

A produção global desta fonte é estimada em  $96,2 \times 10^{16}$  Bq (26MCi) (NCRP Report nº 62, 1979).

#### B. Fonte Artificial

A fonte artificial, é antropogênica e se originou desde 1952, pela detonação de dispositivos termonucleares (bomba de hidrogênio). Esta produção supera a primeira, alcançando valores de até 5000UT (CHANDRA, 1978), pela injeção de pulsos periódicos dentro da atmosfera, com o resultado que as precipitações têm sido marcadas com uma quantidade de trítio que pode ser medida facilmente.

ERICKSON (1965) determinou as quantidades de trítio liberadas na atmosfera de 1952 a 1962 (TABELA 3.4., PANE, 1979).

TABELA 3.4. Estimativa da produção de trítio por explosões termonucleares (ERICKSON, 1965)

Ano	Produção de trítio		Quantidade total existente	
	kg	MCi	kg	MCi
1952	0,5	5	0,5	5
1953	0	0	0,4	4
1954	13	126	12,9	125
1955	3	29	15,2	148
1956	6	58	20,2	196
1957	8	78	26,9	261
1958	21	204	46,0	447
1959	0	0	43,5	422
1960	0	0	41,0	398
1961	56	544	95,0	922
1962	89	864	176,0	1709

As centrais nucleares também liberam trítio no meio ambiente, principalmente quando se utilizam reatores moderados a água pesada.

Em instalações nucleares, o trítio é produzido por processos de fissão, captura neutrônica e decaimento no material fissil, no moderador, no refletor, em materiais estruturais etc. Esta produção é estimada em torno de 20Ci/MWe anual (BONKA, 1979).

A Tabela 3.5 apresenta uma projeção da quantidade total de trítio liberada de todas as fontes (NCRP Report, nº 62, 1979).

Por causa dos mecanismos de circulação de ar na atmosfera, a concentração de trítio no hemisfério sul tem se mantido relativamente constante (BEDMAR, 1974).

Determinações do conteúdo de trítio no hemisfério sul têm provado que o trítio liberado no hemisfério norte demora aproximadamente 2 anos para chegar ao hemisfério sul (ERICKSON, 1965).

Determinações do conteúdo de trítio na precipitação em Halley Bay ( $75^{\circ}30'$ ) sobre um período de 1966-1976 (Figura 3.1., JOUZEL et alli, 1979) mostra por exemplo um pico, no ano de 1969 que deve ter sido produzido pelos testes nucleares chineses no hemisfério norte ( $40^{\circ}N$ ), em 1967. Os testes nucleares de julho a setembro de 1968 também têm contribuído ao pico de 1969.

Os valores baixos medidos a partir de 1975 podem ser relacionados às explosões nucleares francesas de 72, 73 e 74 e a subsequente cessação dos testes atmosféricos (JACOBS et alli, 1979).

A partir de 1973 as baixas concentrações de trítio no hemisfério sul, dificultam as determinações de recarga de aquíferos baseados no método do trítio ambiental.

TABELA 3.5. Projeção da quantidade total de trítio liberada de todas as fontes (MCi), NCRP Report nº 62, 1979).

Ano	Liberação anual		Trítio acumulado no ambiente				Total
	Atmosférica	Liberação líquida	Testes nucleares atmosféricos	Produção natural de trítio	Centrais Nucleares	Outras Atividades	
1980	6,1	0,65	1170	70	1	16	1257
1981	6,2	0,75	1110	70	2	17	1199
1982	6,3	0,85	1050	70	4	17	1141
1983	6,4	0,85	990	70	5	18	1083
1984	6,5	0,95	935	70	7	19	1031
1985	6,7	1,0	880	70	8	19	977
1986	6,8	1,2	840	70	10	20	930
1987	6,9	1,4	790	70	12	20	892
1988	7,1	1,6	750	70	15	21	856
1989	7,2	1,7	705	70	17	22	814
1990	8,1	2,0	665	70	20	22	777
1991	8,6	2,2	630	70	24	22	746
1992	9,0	2,4	595	70	29	23	717
1993	9,5	2,6	560	70	34	23	687
1994	10	3,0	530	70	39	24	663
1995	11	3,2	500	70	46	24	640
1996	12	3,4	475	70	52	24	621
1997	12	3,6	450	70	60	25	605
1998	13	4,0	425	70	68	25	588
1999	14	4,2	400	70	77	25	572
2000	12	3,6	380	70	83	25	558

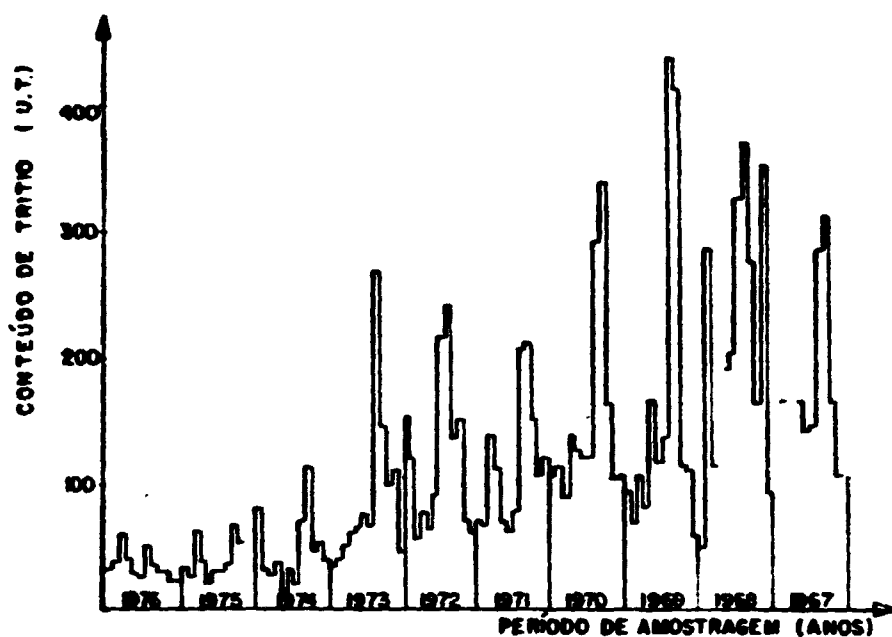
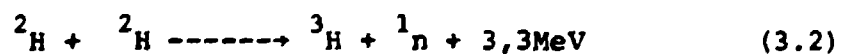


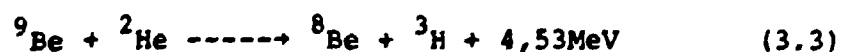
Figura 3.1. Conteúdo de trítio na precipitação de Halley Bay  
(JOUZEL, 1979)

### 3.3. PRODUÇÃO ARTIFICIAL DE TRÍTIIO

Há muitas reações nucleares que podem ser usadas para produzir trítio. OLIPHANT et alii, 1934 determinaram trítio pelo bombardeio de deuteronos em compostos contendo deutério (JACOBS, 1968), reação esta confirmada por DEE (1934):



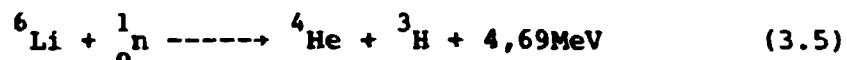
O bombardeio de outros elementos com deutério, por exemplo, boro, cobre ou flúor, também dão origem ao trítio. No ciclotron, o trítio pode ser produzido pelo bombardeio de um alvo de berílio com deuteronos, pela reação (EVANS, 1974):



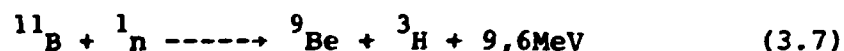
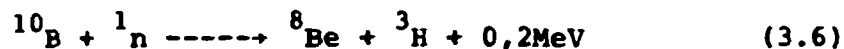
O trítio também pode ser produzido pela reação em cadeia (JACOBS, 1968):



CHADWICK & GODHABER, 1935, mostraram que a irradiação de lítio com nêutrons, produz trítio, pela reação (JACOBS, 1968):



e que a irradiação de  ${}^{10}\text{B}$  com nêutrons também produz trítio. CORNOG & LIBBY, 1941 sugeriram as reações:



Em grande escala, o trítio pode ser produzido em reatores nucleares pela irradiação de lítio metálico, ligas ou sais. O trítio produzido pode ser liberado aquecendo-se o fluoreto acima de  $450^\circ\text{C}$  (JACOBS, 1968). Entretanto, para propósitos práticos, o trítio gasoso é obtido comercialmente em vidros "break-seal", tipo ampolas, que evita qualquer necessidade de armazenamento.

Comercialmente, o trítio não é produzido no Brasil.

#### 3.4. PROPRIEDADES DA ÁGUA TRITIADA

O trítio gasoso  $\text{T}_2$ , à temperatura ambiente, tende a formar HT pela reação com hidrogênio gasoso. O vapor HTO é formado rapidamente pela reação:



e é a forma mais comum do trítio encontrado no ambiente. As propriedades dos óxidos dos três isótopos do hidrogênio são listadas na Tabela 3.6 (NCRP Report nº 62, 1979).

TABELA 3.6. Propriedades termodinâmicas dos óxidos de hidrogênio (NCRP Report nº 62, 1979).

Propriedade/ unidade	HTO	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	T <sub>2</sub> O	Referência
Ponto de ebulição °C	100,76	100,00	101,42	101,51	Smith e Fitch (1965)
Temperatura do ponto triplo, °C	2,25	0,010	3,82	4,49	Smith e Fitch (1965)
Pressão do ponto triplo, mm/Hg	4,73	4,58	5,02	4,87	Smith e Fitch (1965)
Calor de vaporiza- ção para o ponto de ebulição, kcal.mol <sup>-1</sup>	9,91	9,72	9,9	10,1	Jones (1963)
Entropia a 298,16 keu*	17,88	16,75	18,9	19,0	Jones (1963)

\* a unidade de entropia (eu) é uma unidade termodinâmica igual a uma caloria por grau centígrados.

### 3.5. TROCA ISOTÓPICA

O trítio segue praticamente as mesmas reações do hidrogênio ordinário, mas a grande diferença de massa entre eles torna os efeitos isotópicos facilmente perceptíveis (JACOBS, 1968). LIBBY, 1943, calculou as constantes de equilíbrio para várias reações envolvendo as variantes isotópicas dos gases de hidrogênio e seus óxidos (NCRP Report nº 62, 1979). Seus cálculos basearam-se nos níveis vibracionais da molécula de água para temperaturas variando de 20 a 500°C (JACOBS, 1968).

BLACK & TAYLOR, 1943, determinaram experimentalmente as constantes de equilíbrio para a reação:



para o intervalo de temperatura de 16 a 303°C e os resultados são comparáveis aos de LIBBY. O coeficiente de equilíbrio para a reação acima é aproximadamente 6 para 25°C, favorecendo portanto a formação de água tritiada (NCRP Report nº 62, 1979).

No solo, o trítio também pode se tornar parte integrante da micela da argila, na forma de grupos hidroxila ligados principalmente aos átomos de alumínio e magnésio. Estes grupos hidroxila sofrem uma troca lenta com a água proveniente de outros compartimentos do solo (TRS nº 207, 1987).

Os solos que contêm uma quantidade considerável de matéria orgânica, como por exemplo; humus, podem retardar a infiltração da água tritiada. O material orgânico contém hidrogênio ligado ao oxigênio e que pode ser trocado rapidamente pelo trítio, dependendo da quantidade de material orgânico presente, do seu modo de degradação e do pH do solo.

Embora a interação da água tritiada com os solos que contenham matéria orgânica possa afetar o movimento do trítio no solo, esta interação é relativamente pequena na maioria dos sistemas naturais, devido ou a pequenas quantidades de matéria orgânica normalmente presentes ou a altas taxas de percolação (TRS nº 207, 1987).

### 3.6. LEGISLAÇÃO

Neste item será discutida a radioproteção e a licença para manipulação de materiais radioativos.

### 3.6.1. Radioproteção

O trítio é certamente um dos radionuclídeos de menor toxicidade, mas, em alguns casos, ele é mais difícil de ser controlado do que outros radionuclídeos mais tóxicos. Em primeiro lugar, por causa das grandes quantidades usadas normalmente (Curies) e em segundo lugar, por causa do procedimento necessário para monitoração em laboratório. Além disso, é a característica real do trítio como isótopo do hidrogênio que faz com que o trítio seja utilizado em uma grande diversidade de formas químicas e portanto, sua toxicidade dependerá muito mais da forma química utilizada (CHARAMATHIEU, 1968).

O trítio está incluído na classe D - baixa toxicidade, segundo a norma CNEN - NE - 6.02 de outubro de 1984, ou classe V - baixa toxicidade, segundo a norma CNEN - NE - 3.01 de julho de 1988.

A Tabela 3.7 fornece o limite de incorporação anual, LIA (Bq) e as concentrações derivadas de ar, DAC ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ), baseada numa semana de 40h, para o trítio e a água tritiada. Para obter o LIA, expresso em Ci, o valor deve ser dividido por  $3,7 \times 10^{10}$ . Para obter o DAC expresso em ( $\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$ ), o valor deve ser dividido por  $3,7 \times 10^{10}$  (SS nº 9, 1982, CNEN, 1988).

TABELA 3.7. Limites anuais para ingestão e inalação de trítio e água tritiada (CNEN, 1988)

Radionuclídeo		unidade	oral	inalação
$^3\text{H}$	LIA	Bq	$3 \times 10^9$	$3 \times 10^9$
(água tritiada)	DAC	$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	-	$8 \times 10^5$
$^3\text{H}$	LIA	Bq	-	-
(trítio elementar)	DAC	$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	-	$2 \times 10^5$

A água tritiada é a forma mais perigosa sob a qual pode se encontrar o trítio na atmosfera e ao redor de reatores que utilizam água pesada como moderador e refrigerador. A água tritiada na sua forma líquida é absorvida como se fosse um líquido, 99% do trítio inalado sob a forma de vapor de água tritiada alcança o sangue após 10min. A absorção de HTO através da pele que esteja em contacto com a água ou ar é tão importante quanto a absorção pela respiração (CHARAMATIEU,1965).

Em caso de ingestão ou inalação, o trítio é eliminado do organismo por meios líquidos, suor, saliva, urina etc., com meia vida biológica de 12 dias. Baseando-se nas doses máximas permissíveis indicadas pelo ICRP nº 30, 1982, para um indivíduo trabalhando 8 h por dia, durante o ano inteiro, considera-se:

- nível de intervenção: 850kBq de trítio/l de urina
- nível de investigação: 250kBq de trítio/l de urina
- nível de registro: 85kBq de trítio/l de urina

O trabalhador é retirado do seu trabalho quando o nível de trítio na urina for igual ou superior ao nível de intervenção e é reintegrado quando a concentração de trítio na urina estiver no nível de registro.

### 3.6.2. Licença

A aplicação de radioisótopos, requer uma licença do órgão fiscalizador, que no Brasil é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), sediada no Rio de Janeiro.

A licença é um documento que autoriza o requerente a exercer determinada atividade, envolvendo radiação sob as condições genéricas de leis e regulamentos, bem como de condições especificadas na própria licença. É emitida pela CNEN, mediante pedido do interessado, depois de verificada a competência

cia técnica do utilizador, assim como a adequação de métodos, aparelhos e instalações empregados (CNEN, 1973).

Estão isentas do processo de licenciamento, estabelecido na norma CNEN - NE - 6.02, 1984, as instalações que envolvam radionuclídeos cujas atividades totais não excedam os seguintes valores:

Classe A - 0,1 $\mu$ Ci

Classe B - 1 $\mu$ Ci

Classe C - 10 $\mu$ Ci

Classe D - 100 $\mu$ Ci

O uso de radioisótopos artificiais em estudos hidrogeológicos, como em qualquer outro campo de aplicação, deve levar em conta as condições de proteção radiológica e de segurança. O princípio básico a ser seguido é que a quantidade de radioisótopo presente na área sob investigação deve ser limitada de tal forma que a dose máxima permissível não seja excedida. A aprovação para uso de radioisótopos, é fornecida pela CNEN, com base nas normas internacionais de proteção radiológica.

### 3.6.3. Custo da água tritiada

O custo da água tritiada varia de acordo com a atividade e a concentração. Os preços são os seguintes (NEN - New England Nuclear, dezembro, 1989):

Atividade	Concentração	Preço
5mCi	1mCi/ml	US\$ 995,00
1Ci	1Ci/ml	US\$ 3.520,00
5Ci	5Ci/ml	US\$ 6.169,00

Em estudos de aplicação de traçadores na hidrogeologia, com trítio artificial, as quantidades utilizadas são da ordem de  $\mu\text{Ci}$ . Cada determinação de recarga com trítio artificial emprega no total  $\approx 60\mu\text{Ci}$ . Deste modo,  $5\text{mCi}$  de trítio são suficientes para  $\approx 83$  determinações de recarga de aquíferos, indicando um custo relativamente baixo, do traçador.

## CAPÍTULO IV

### AVALIAÇÃO DA RECARGA E DA TAXA DE INFILTRAÇÃO

#### 4.1. INTRODUÇÃO

O problema conceitual básico em hidrologia é o ciclo da água, em suas formas sólida, líquida e gasosa. A Figura 4.1. (BEAR, 1979), mostra os principais componentes desse ciclo. As águas superficiais se evaporam, permanecem armazenadas como umidade atmosférica e se depositam novamente como precipitação, chuva ou orvalho.

Neste ciclo, o que mais nos interessa é a taxa de infiltração da água no solo, cuja determinação é objetivo deste trabalho.

#### 4.2. DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA UMIDADE

As formações subsuperficiais que contêm água podem ser divididas em várias zonas horizontais de acordo com a proporção relativa de espaços porosos que são ocupados pela água. Essencialmente, tem-se uma zona de saturação, na qual todos os poros são completamente preenchidos com água sob pressão hidrostática e uma zona de aeração (zona não saturada), na qual os interstícios são ocupados parcialmente por gases (principalmente ar e vapor d'água) e parcialmente por água (BEAR, 1979).

A Figura 4.2. (CETESB, 1978), mostra uma representação esquemática da água subsuperficial num solo homogêneo.

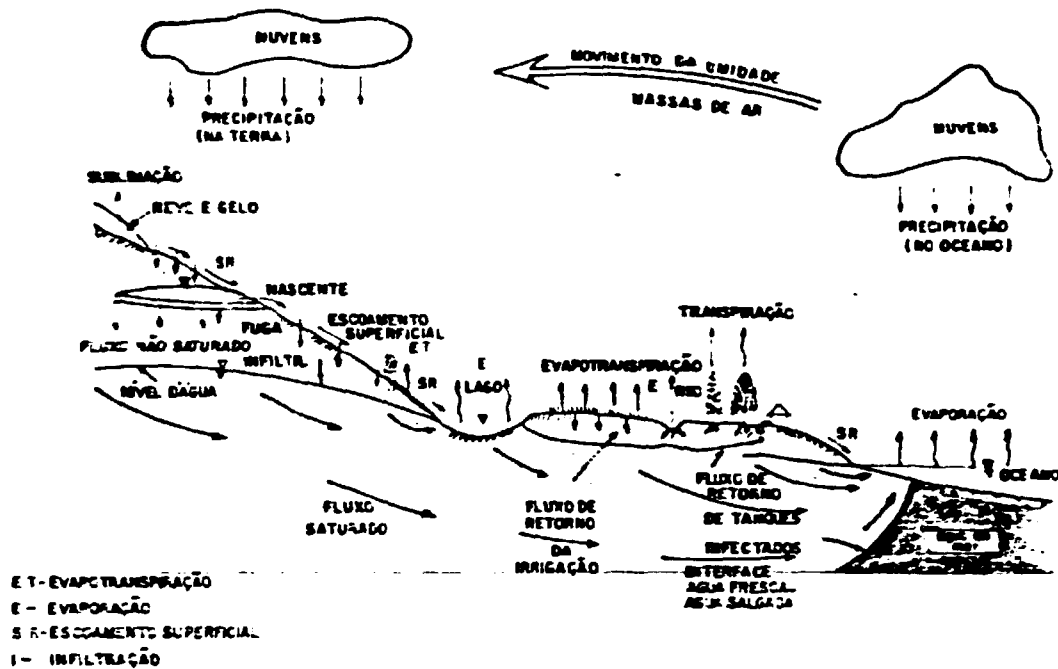


FIGURA 4.1. Diagrama esquemático do ciclo hidrológico (BEAR, 1979).

A água (precipitação ou irrigação), se infiltra através da superfície da terra, move-se para baixo, inicialmente pela influência da gravidade e se acumula, preenchendo todos os interstícios.

#### Zona saturada

A zona saturada é contornada na parte superior, por uma superfície limite de saturação ou por um estrato impermeável. A superfície superior da zona de saturação é o nível d'água ou superfície freática. A superfície freática é uma superfície imaginária em que todos os pontos estão à pressão atmosférica (tomada convenientemente como  $p=0$ ). Na realidade,

a saturação se estende um pouco acima do nível d'água permitindo atração por capilaridade. A água que ocorre na zona saturada é normalmente referida simplesmente como água subterrânea (BEAR, 1979).

#### Zona de aeração

A zona de aeração se estende do nível d'água até a superfície da terra. Esta zona consiste de três sub-zonas: (Figuras 4.2 (CETESB, 1978 e 4.3, TODD, 1979):

1. Zona da água do solo
2. Zona intermediária (ou zona de vadose)
3. Zona capilar (ou franja capilar).

#### 1. Zona da água do solo

A zona da água do solo é adjacente à superfície e se estende para baixo através da zona das raízes. Sua espessura varia com o tipo de solo e vegetação. A vegetação depende da água nesta zona, pois as raízes necessitam de aeração e água.

A distribuição de umidade na zona da água do solo depende das condições da superfície da terra (flutuações sazonais e diurnas da precipitação, irrigação, temperatura do ar e umidade) e pela presença de um nível d'água raso. Quando o nível d'água é profundo, ele não deve influenciar a distribuição de umidade nesta zona. A água, nesta faixa, move-se para baixo durante a infiltração (precipitação) e para cima por evaporação e transpiração das plantas. Temporariamente, durante um período curto de infiltração excessiva, o solo pode ficar praticamente saturado.

Após um período de infiltração por gravidade, sem fornecimento adicional de água na superfície, a quantidade de água permanecendo no solo é chamada de capacidade de campo. Abaixo da capacidade de campo, o solo contém água capilar na

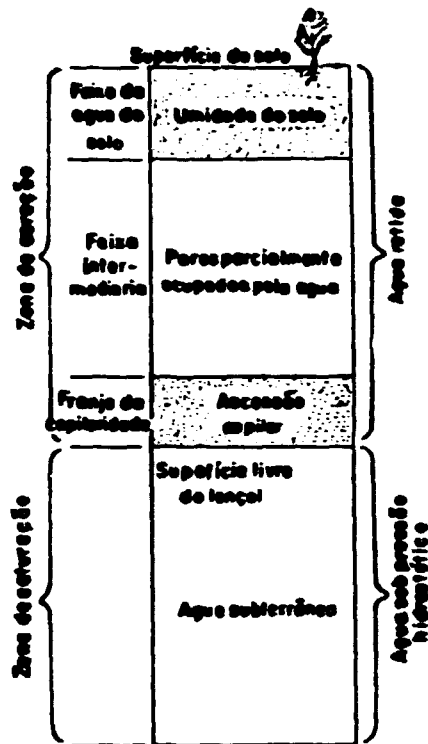


FIGURA 4.2. Divisões da água sub-superficial (CETESB, 1978).

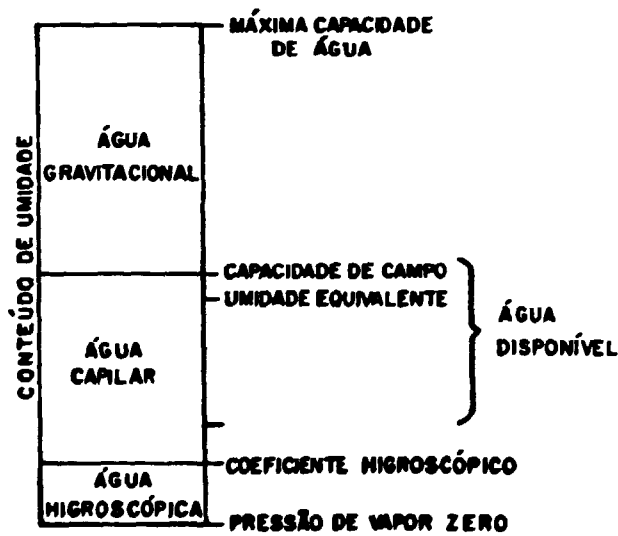


FIGURA 4.3. Diagrama da água do solo mostrando classes e pontos de equilíbrio (TODD, 1959).

forma de filmes contínuos ao redor das partículas de solo e também meniscos entre eles, mantidos por tensão superficial. Nestes filmes, a água se move por ação capilar e é disponível para as plantas.

Um conteúdo de umidade um pouco menor, chamado coeficiente higroscópico (= umidade máxima na qual o solo inicialmente seco irá absorver quando entrar em contacto com uma atmosfera de 50% de umidade relativa a 20°C). A água no solo é chamada água higroscópica. Ela também forma filmes finos de umidade na superfície das partículas de solo, mas as forças adesivas são muito fortes, de tal forma que esta água não está disponível para as plantas (BEAR, 1979).

## 2. Zona intermediária

A zona intermediária está compreendida entre a zona da água do solo e a zona capilar. Sua espessura depende da profundidade do nível d'água.

Esta zona serve principalmente como uma região que liga a zona próxima à superfície da terra àquela próxima do nível d'água, através da qual a água se move verticalmente para baixo. A água parada ou água pelicular, na zona intermediária, é mantida no local por forças higroscópicas e capilares e é equivalente à capacidade de campo na zona da água do solo. A água em excesso é a água gravitacional, que se move para baixo por influência da gravidade (TODD, 1959).

## 3. Franja capilar

Esta zona está compreendida entre a zona intermediária e o nível d'água. Sua espessura depende das propriedades e homogeneidade do solo, principalmente da distribuição do tamanho dos poros. Dentro da franja capilar há uma diminuição gradual do conteúdo de umidade com a altura, acima do nível

d'água. Justamente acima do nível d'água, os poros são praticamente saturados.

Na franja capilar, a pressão é menor que a atmosférica e pode acontecer um fluxo de água tanto vertical quanto horizontal.

#### 4.3. MÉTODOS DE CÁLCULO DE RECARGA

Vários métodos de cálculo de recarga são disponíveis. Embora todos eles tenham um problema ou outro, sua escolha depende principalmente do problema a ser estudado. Fatores como preço, precisão e tempo devem ser considerados na seleção. Eles podem ser agrupados basicamente em dois grupos:

A. Métodos hidráulicos (clássicos)

B. Métodos isotópicos

A. Métodos hidráulicos

Entre os métodos clássicos, os seguintes são mais conhecidos:

1. Método de inventário
2. Método do lisímetro
3. Método de armazenamento

##### 1. Método do inventário

O método do inventário baseia-se numa equação hidrológica empírica (MORTON, 1978):

$$P = E + R + r \quad (4.1)$$

onde:

P = precipitação

E = evapotranspiração

R = escoamento superficial

r = recarga vertical

Este método requer medida de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial durante um ciclo hidrológico. Alguns dados são obtidos por medidas diretas e outros por fórmulas empíricas com computação.

## 2. Método do lisímetro

Um lisímetro é essencialmente uma cuba estanque enterrada, de paredes verticais, aberta em sua parte superior e cheia do terreno que se quer estudar (GARCEZ, 1967).

Os lisímetros preenchidos com solo da área experimental fornecem a maneira mais direta de se medir a recarga e a evapotranspiração (SUKHIJA, 1976). A recarga é medida coletando-se a água percolada a uma certa profundidade com a ajuda de um grande funil. Mas os resultados freqüentemente desviam das condições naturais porque os lisímetros não representam as condições reais do campo e o funil altera o gradiente hidráulico natural. Além disso, eles são caros e não são úteis em aplicação em larga escala.

## 3. Método de armazenamento

O método de armazenamento baseia-se em medidas periódicas da umidade do solo em várias profundidades, detectando-se assim, qualquer mudança na zona não saturada. Essas mudanças são relacionadas com as medidas de potenciais hidráulicos (com tensiômetros). A recarga pode ser deduzida com base em flutuações do nível d'água.

### B. Métodos isotópicos

Os métodos isotópicos são novos, mais sofisticados e portanto trazem uma série de vantagens (praticidade, custo, etc.).

Os métodos isotópicos para cálculo da recarga de aquíferos podem ser divididos em dois grupos:

1. Método de marcação com isótopo ambiental
2. Método de marcação artificial

### 1. Método de marcação com isótopo ambiental

Os conteúdos de trítio, deutério e oxigênio-18 existentes naturalmente na água podem ser utilizados como traçadores.

Com a liberação do trítio na atmosfera a partir de 1952 pela detonação de dispositivos termonucleares, tornando marcada a precipitação, LIBBY, 1953, apontou sua utilidade em pesquisas da água subterrânea. Desde então, várias aplicações têm aparecido, nas quais a aplicação de trítio tem sido investigada. Os trabalhos publicados mostram que o trítio na precipitação fornece uma ferramenta única para se determinar as diferentes características dos aquíferos, que são de importância prática imediata. Uma das aplicações mais promissoras é a determinação direta da recarga de aquíferos (VOGEL et alii, 1972).

Considerando-se um sistema homogêneo, a concentração de trítio na água subterrânea é uma função somente da profundidade. Com a infiltração da água da chuva após 1952, a forma do perfil de trítio x profundidade, de um modo ou de outro refletirá a história da concentração de trítio na recarga da água subterrânea.

O trítio ambiental acumulada na água subterrânea é representado, por:

$$M = \int_0^{z_0} p(z) \cdot C(z) \cdot dz \quad (4.2)$$

onde:

$C(z)$  = concentração de trítio (em U.T.) à profundidade  $z$  (positiva para baixo)

$p(z)$  = porosidade

$z_0$  = profundidade em que o trítio da bomba está confinado.

M é termalizado "deposição aparente de trítio" (em U.T.mH<sub>2</sub>O). A deposição aparente de trítio é a quantidade de trítio que é encontrada na coluna vertical da água subterrânea de secção transversal unitária.

O trítio tem sido, entãc, fornecido pela precipitação (de concentração C\*), desde 1952. Denotando a taxa de recarga da água subterrânea por R (em m.H<sub>2</sub>O) anuais), o balançamento principal entre o fornecimento de trítio e a deposição aparente, é:

$$M(t) = \int_{1952}^t R(t') \cdot C^*(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} dt' \quad (4.3)$$

O fator exponencial leva em consideração o decaimento radioativo do trítio (constante de decaimento  $\lambda$ ) entre o tempo de infiltração  $t'$  e o tempo de observação  $t$  (amostragem). A taxa de recarga da equação 4.3. está sendo considerada como a taxa pela qual a água da precipitação que entra no solo eventualmente alcança o nível d'água. A passagem através da zona não saturada produz uma mistura, mas nenhum fracionamento isotópico (ZIMMERMANN et alli, 1967). Para se obter a taxa de recarga média  $\bar{R}$ , pode-se reescrever a equação 4.3:

$$M(t) = \int_{1952}^t \frac{R(t)}{\bar{R}} \cdot C^*(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} dt \quad (4.3)$$

Deve-se notar que a recarga e a concentração de trítio sofrem variações em relação às estações do ano. Mais críticas que isto, entretanto, são as variações ano a ano na própria taxa de recarga e na concentração de trítio. As fontes de erro deste método vêm principalmente de incertezas experimentais na determinação aparente de trítio, M, e na sua variação por motivos de heterogeneidades naturais da terra.

## 2. Método de marcação artificial

O movimento da umidade num dado plano horizontal é marcado por um traçador isotópico. Normalmente o trítio é usado por que ele pode ser facilmente detectado por um detector líquido de cintilação.

O método de injeção de trítio na estimativa da recarga baseia-se na suposição que a umidade solodo se move para baixo em camadas discretas (ZIMMERMANN et alii, 1967). Qualquer camada fresca de água adicionada à superfície por causa da precipitação ou irrigação, irá percolar, deslocando uma mesma quantidade de água abaixo dela e assim sucessivamente, de tal forma que a última camada da zona não saturada é adicionada à água subterrânea. Este conceito de movimento da água através do solo é termalizado como Modelo de Fluxo em Pistão (ATAKAN et alii, 1974) e foi desenvolvido por ZIMMERMANN et alii, 1967) e MUNNICH (1968). Nesta técnica a umidade a uma certa profundidade é marcada com água tritiada. O traçador se move juntamente com a camada marcada devido a subsequente precipitação ou infiltração; O solo do local de injeção é coletado após um certo intervalo de tempo escolhido e o conteúdo de umidade e concentração do traçador são medidos em amostras de vários intervalos de profundidade (ZIMMERMANN, 1967). O deslocamento da posição do traçador é indicado pelo pico em sua concentração. O conteúdo de umidade do solo entre a profundidade de injeção e a do deslocamento do traçador é a medida da recarga da água subterrânea no intervalo de tempo entre a injeção do trítio e a coleta de amostras.

O solo é, com freqüência, suficientemente homogêneo e o movimento vertical da água é suficientemente lento para permitir uma mistura lateral efetiva entre as porções da água do solo de diferentes velocidades e isto neutraliza a disper-

são do fluxo. Para pequenas distâncias laterais (abaixo de aproximadamente 1mm), a difusão molecular fornece uma troca rápida entre a água que está se movendo e a água estacionária. Diferentes velocidades de água, em grandes distâncias laterais podem causar o movimento da camada marcada da água do solo, embora ainda comportando-se como uma placa impermeável, ela se distorce (dispersão da linha reta) (MUNNICH, 1968).

Da mesma forma que a dispersão produz gradientes laterais do traçador, a mistura lateral (transversal) pela difusão molecular ofusca as variações de curta distância (pequenas "ondas") da placa. A camada marcada se torna mais difusa de tal forma que as "ondas" longas permanecem.

Na prática (BLUME et alli, 1967) pode-se representar a distribuição de concentração, ou temperatura, sujeita a um achatamento pela difusão ou condução térmica, por um conjunto de funções seno ou cosseno, da diminuição do comprimento de onda (séries de Fourier).

As ondas individuais se comportam independentemente umas das outras em relação à vibração. As ondas curtas decaem mais rapidamente (aproximadamente  $1/\lambda^2$ , onde  $\lambda$  = comprimento de onda) do que as longas. Essa distorção das ondas longas (distância da ordem de decímetros) da camada marcada leva a um considerável alargamento do pico do traçador, que é maior do que a que ele teria somente por difusão molecular longitudinal.

Se tomarmos vários núcleos, isto é, aproximadamente 1 metro de distância um do outro, é provável encontrar o pico do traçador em várias profundidades. Para o cálculo da recarga média da água subterrânea, deve-se usar o resultado médio obtido em todos os núcleos. Se não houver movimento lateral da umidade no solo, o fluxo vertical da umidade deve ser o mesmo em todos os pontos mesmo que a condutividade varie lo-

calmente.

Mais importante do que a mistura lateral do traçador por difusão molecular é que a sucção capilar transporta a água de regiões de condutividade mais altas (buracos ou material grosso) para aquelas regiões de condutividade mais baixa (grão fino), a menos que estas regiões já estejam saturadas com água.

#### 4.4. MODELOS

Uma aproximação para a estimativa da recarga anual média é a comparação das formas dos perfis de trítio observados com aqueles calculados de modelos baseados em mecanismos simplificados do movimento da água no perfil do solo. Três modelos de processos de recarga, desenvolvidos por ALLISON & HUGHES, 1974, para o hemisfério sul são indicados na Figura 4.4, modelos estes que explicam fisicamente o processo de infiltração e nos quais é baseado este trabalho.

##### 4.4.1. Modelo I - Fluxo em Pistão

Este modelo é análogo aos modelos clássicos e ao modelo de Evaporação Modificado desenvolvido por SMITH et alii, 1970.

No sul da Austrália, o "deficit" de umidade do solo (SMD) alcança um máximo, em março, no final do verão seco, esta deficiência é preenchida durante o inverno, quando a precipitação (P) excede a evaporação (E).

O modelo assume: (i) que se iniciarmos com um perfil no qual o SMD é máximo, uma quantidade P-E será fornecida ao perfil nos meses em que  $P > E$ , (ii) que a percolação da água para a parte inferior do perfil (isto é, recarga), somente irá acontecer quando o SMD for totalmente preenchido e (iii) que

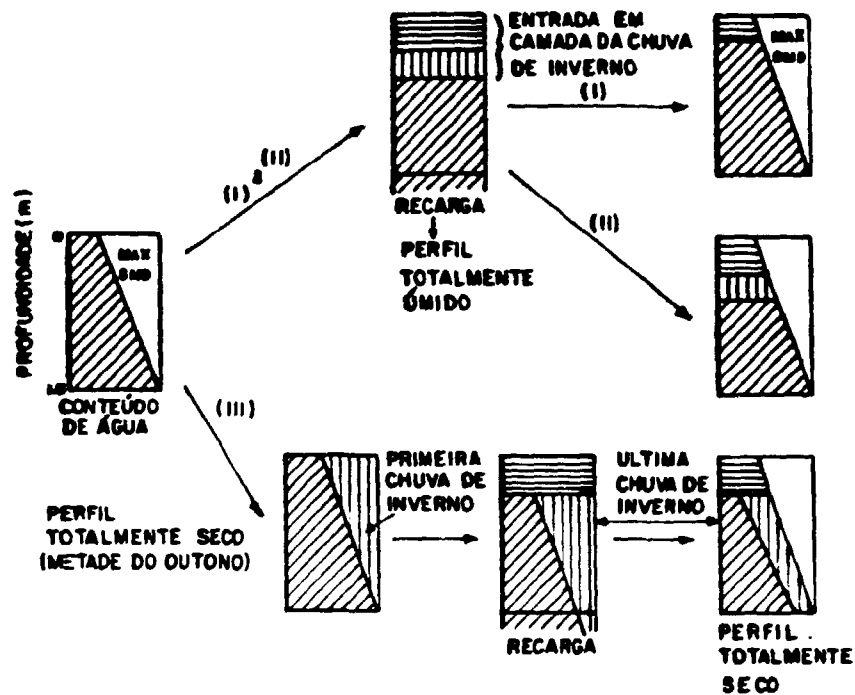


FIGURA 4.4. Representação esquemática dos modelos: Fluxo em Pistão, Fluxo em Pistão Modificado e Entrada Direta (ALLISON & HUGHES, 1974)

nos meses subsequentes quando P-E se torna negativo, a água evaporada terá uma concentração de trítio igual àquela dos meses precedentes à chuva. Perdas de água por evaporação continuarão a acontecer deste modo até que o SMD novamente alcance seu máximo. Este modelo implica que o trítio, no final de março nunca pode ser perdido por evaporação. Implica, também, que a quantidade de água (para baixa concentração de trítio) em quantidade igual à recarga dos anos anteriores, terá se movido para o nível d'água. Qualquer mudança no perfil do trítio desde março do ano anterior será associado com aquela quantidade de água, para uma concentração de trítio da nova chuva de inverno do último ano.

A concentração de trítio desta água é aquela da chuva caindo entre abril e junho desde que a quantidade de recarga anual é sempre menor que P-E para todos estes meses. A concentração média do trítio para estes meses em qualquer ano não é significativamente diferente.

#### 4.4.2. Modelo II - Fluxo em Pistão Modificado

Observações do comportamento da água do solo têm mostrado que em regiões com um clima tipo mediterrâneo, o conteúdo de água de solos argilosos abaixo de aproximadamente 1,5m mostra uma pequena variação num ciclo anual. Então, quando a água percola abaixo da zona das raízes (1,5m), seu trítio pode ser perdido apenas por decaimento.

Para todas as profundidades na zona das raízes, a água (e portanto, o trítio) está sujeita a perdas por evapotranspiração durante o ciclo seco. A quantidade de trítio perdida deste modo é estimada do perfil de trítio no final do verão e da quantidade de água perdida em cada intervalo de profundidade quando o solo está seco para o SMD máximo. Assume-

-se que a condutividade hidráulica do solo é tão baixa que uma redistribuição negligenciável da água do solo por fluxo induzido por gravidade ocorre durante a secagem do perfil do solo.

Em operação, este modelo requer duas entradas ("inputs") de trítio, uma é aquela da nova chuva de inverno que preenche o SMD como no modelo I e outra, a maior, a última concentração de inverno. E, pelo fluxo em Pistão, a água é perdida do topo do perfil de solo quando ocorre a recarga.

#### 4.4.3. Modelo III - Entrada Direta

Em comparação com os modelos I e II, o fluxo em pistão ocorre abaixo de 1,5m. Acima desta profundidade, o SMD é preenchido pela infiltração direta para 1,5m pela próxima chuva de inverno. A última chuva de inverno, então, faz a água se mover através de todo o perfil pelo fluxo em pistão. Então, a água que se move abaixo da zona das raízes tem componentes da chuva do ano corrente e da chuva do ano anterior.

Os últimos dois modelos requerem um conhecimento do perfil do conteúdo de água nas suas condições mais drásticas: a mais úmida e a mais seca.

#### 4.4.4. Modelo HETP (Height Equivalent Theoretical Plates)

O movimento da água do solo pode ser simulado por um simples modelo unidimensional de "multicaixas" como usado em cromatografia. Este modelo HETP (Height Equivalent Theoretical Plates) descreve a zona não saturada como uma série de camadas de solo com um conteúdo de água internamente bem misturado (Caixas ou "placas") (MUNNICH, 1983). A espessura da camada ou altura da placa H controla a dispersão longitudinal

no curso do movimento simulado do traçador. Como ilustrado na Figura 4.4, a estimativa do deslocamento e dispersão do traçador pode ser feita por cálculo numérico (tempo finito e intervalos de deslocamentos) que pode ser feito facilmente com um computador. Inicialmente, deve-se escolher a altura da placa  $H$ , por exemplo: 10cm. Com uma profundidade de solo acessível para observação de  $z_0$  ( $\approx 2m$  para trados manuais usuais) esta camada é feita por  $N=z_0/H$  camadas de solo bem misturadas (por exemplo:  $N=20$ ).

Com um conteúdo de água do solo  $\phi_f$  (=capacidade de campo  $F$ ), assumido como constante durante o processo de infiltração através de todo o perfil de solo, a placa de altura  $H$  contém  $W = 10.F.H$  (mm) de água. No caso de infiltração, uma porção de  $I$ mm de água de precipitação por um intervalo de tempo, entra na caixa superior, se mistura com a água estacionária de conteúdo de traçador  $C_1$  e fornece uma nova concentração de traçador:

$$C'_1 = \frac{I + C_1 W}{I + W} \quad (4.5)$$

Então, a água do solo, carregando  $C'_1$ , entra na próxima caixa, onde o mesmo processo de mistura se repete:

$$C'_2 = \frac{C'_1 I + C_2 W}{I + W} \quad (4.6)$$

e assim por diante até que a última caixa  $N$  seja alcançada. Este movimento para baixo em degrau, de mistura da água de infiltração com a água estacionária de camadas de solo individuais indicam um deslocamento do traçador semelhante a um fluxo em pistão. A dispersão do fluxo é controlada por  $H$  ( $\epsilon$  = porosidade,  $F$  = capacidade de campo, em vol. %).

Todo o processo de mistura é repetido para a próxima infiltração.

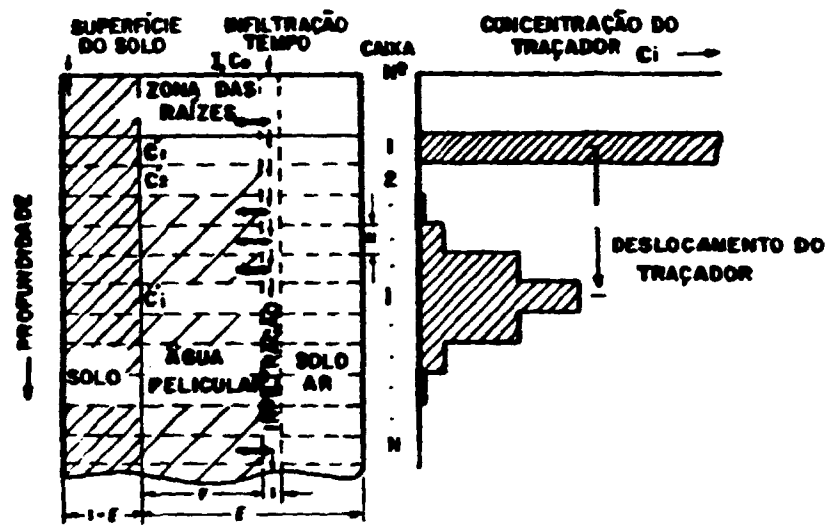


FIGURA 4.5. Modelo de multicaixas (HEPT) do movimento da água no solo (MUNNICH, 1983)

## CAPÍTULO V

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA REFERENTE À METODOLOGIA

A metodologia de marcação com trítio artificial foi inicialmente desenvolvida por ZIMMERMANN et ali, (1966, 1967) e MUNNICH (1968 a e b). O princípio do método consiste na marcação da unidade do solo num dado plano horizontal com um traçador isotópico. O traçador é carregado juntamente com a água em movimento. Sob a condição que a água do solo não se desvia do movimento vertical, a infiltração da água da precipitação leva a um deslocamento para baixo da camada marcada, semelhante a um pistão. Este método é particularmente útil para a estimativa da recarga local sem perturbar as condições naturais.

A técnica inicial de aplicação do traçador foi a irrigação de uma superfície de aproximadamente  $2 \times 2\text{m}^2$  com água tritiada. Esta irrigação foi substituída por uma injeção com uma seringa, que permite a introdução de poucos mililitros de traçador a uma profundidade de até aproximadamente 1m. Este método evita principalmente a perda do traçador por evaporação. As experiências foram realizadas no sul da Alemanha onde foi investigada a distribuição espacial, tanto vertical como horizontal do trítio injetado no solo arenoso e argiloso, com diferentes conteúdos de umidade. Foi notado por eles que a distribuição do traçador é distorcida quando este se move através de regiões de conteúdos de umidade variáveis.

COREY (1968), investigou o efeito do conteúdo de umi

dade do solo, da profundidade de injeção da água tritiada e da vegetação, no conteúdo de trítio do vapor d'água na atmosfera. Mediu o tempo para a água evaporar de um solo arenoso, quando o traçador é colocado entre 0 e 14, 14 a 28 ou 28 a 48cm de profundidade e para conteúdos de umidade de solos de 0,05 a 0,10 g/g. Detectou que o tempo de evaporação aumenta com a velocidade de deslocamento e com a diminuição do conteúdo de água. A água tritiada colocada entre 14 a 28cm de profundidade, não evapora antes de 60h. A água tritiada colocada entre 28 a 42cm de profundidade, não evapora antes de 200h, para 10% de umidade e não evapora antes de 30h para solos com 5% de umidade.

O trabalho pioneiro na Índia usando injeções de trítio foi feito por DATTA et alli (1973) e DATTA (1975), para estimativa da recarga em 45 (quarenta e cinco) locais localizados nas planícies aluvionares Indo Gangetic em Uttar Pradesh ocidental. Três conjuntos de injeções foram feitos em cada local, cada conjunto tendo seis pontos em linha reta. A profundidade de injeção foi 70cm, para evitar a influência das raízes das plantas. Os valores de recarga encontrados para os diferentes locais, variaram de 0 a 60cm de  $H_2O$ , com um valor médio de 21,5cm.

JORDAN et alli (1974) com o intuito de determinar os fatores ambientais que influenciam o movimento do trítio no solo, comparam os resultados obtidos com trítio num campo experimental, em Chicago, Illinois, com um modelo matemático. Assumiu-se, que o solo consiste de 40 camadas de 1cm de espessura. O conteúdo de trítio foi descrito por 40 equações diferenciais lineares de primeira ordem, com coeficientes variáveis, descontínuos. Os coeficientes sendo funções da evapotranspiração, difusão da água no solo, fluxo da água por gravidade e do histórico de 48h de chuva. Concluiu-se que a tro-

ca e a dispersão inicial rápida, são fatores que são importantes na determinação da distribuição do trítio em solos.

DATTA & GOEL (1977), determinaram a recarga em 21 pontos no estado de Panjab (Índia) usando trítio como traçador. Clima árido e semi-árido prevalece nesta área. Encontrou-se que a recarga vertical corresponde a aproximadamente 18% da chuva média e a aproximadamente 12% da precipitação total (chuva + irrigação).

GOEL et alli (1977) estudaram o movimento da umidade do solo por causa da precipitação e irrigação suplementar, na zona não saturada, por marcação com trítio artificial em 26 locais no estado de Haryana (Índia), onde prevalece o clima semi-árido. Neste trabalho a injeção foi feita em conjuntos de cinco pontos distanciados 10cm e dispostos em forma de cruz. Obteve-se para estes locais, uma recarga média de 19cm e uma recarga fracional de 15%. Grandes variações em valores de recarga foram notados. O fator mais significativo afetando a recarga fracional foi o conteúdo de argila do solo.

BHANDARI et alli (1978), estimaram a velocidade da água subterrânea em aquíferos próximos ao local de teste nuclear Pekhran, na região árida de Rajasthan (Índia), pelo método do poço único, utilizando trítio artificial como traçador, onde aproximadamente 20mCi de trítio foram injetados num poço. Após um ano foi detectado uma atividade de 70 $\mu$ Ci, que equivale a um fator de 70 vezes, na diluição do traçador e foi encontrado um fator de 2,5 nos anos seguintes. Estes valores sugerem um movimento da água subterrânea extremamente lento, aproximadamente 0,5m por ano.

CHANDRA (1978), estudou o movimento vertical do trítio num meio não saturado, para cálculo da recarga de aquíferos na planície Gangetic, na bacia Hindon - Krisni, em Uttar Pradesh ocidental (Índia). O trabalho de injeção foi feito no

inverno (dezembro), com amostragens no verão (junho) e no inverno (março). Foram obtidos valores de recarga variando de 0,24cm a 4,32cm, estes valores de recarga variam mesmo numa pequena área, a despeito da precipitação ser a mesma em toda a área.

DATTA & GUPTA (1978), discutiram os valores de recarga obtidos por BAHADUR et alli (1977) onde os cálculos foram obtidos apenas no período das monções. Como na maioria dos locais a posição do pico do traçador normalmente encontra-se imediatamente abaixo da profundidade de injeção e o movimento para cima, do traçador, é predominante, o valor da recarga real deve ser menor que o indicado.

DATTA et alli (1979, 1980), fizeram um estudo comparativo das taxas de recarga em partes das planícies Indo-Gangetic e planícies aluvionares Sabarmati pode ser atribuído a uma evapotranspiração maior e à diferenças nos parâmetros hidrometeorológicos, tais como: distribuição de chuva, temperatura etc. Um estudo comparativo tem mostrado que é possível se desenvolver relações empíricas para estimar a recarga de aquíferos para cada região na qual as características do solo e fatores hidrometeorológicos possam ser considerados como uniformes. Desde que estes fatores variam significativamente de bacia para bacia, uma extrapolação de uma dada região para outra região, pode levar a estimativas errôneas da recarga. O desenvolvimento de uma fórmula que incorpore as variáveis que controlam a recarga de aquíferos é muito difícil e é desejável tratar cada região individualmente.

ATHAVALE et alli (1980) estimaram a recarga de aquíferos freáticos em sete formações geológicas diferentes da vacia Maner inferior, Andhra Pradesh que faz parte do Vale Godavari Rift (Índia), região semi-árida, usando o método do trítio artificial, cobrindo uma área de aproximadamente  $1575\text{km}^2$

e relacionaram os valores da recarga com as flutuações do nível d'água local e o conteúdo de areia dos solos. As experiências feitas por eles indicam também que a profundidade de injeção do trítio, não é crítica na estimativa dos valores de recarga, se a área é destituída de vegetação agreste, de arbustos e de plantas. De suas experiências, eles concluíram que, em geral, a umidade que passa abaixo da zona das raízes (aproximadamente 70cm de profundidade), não é afetada durante o período quente, desde que o nível d'água seja suficientemente profundo.

DATTA et alli (1980), mediram a taxa de movimento da umidade do solo na bacia Sabarmati (Índia) e os resultados indicam que a recarga de aquíferos é limitada a 5 - 7% do "input" de água (precipitação + irrigação). Eles indicam que em todas as regiões com solos argilosos e aqueles que possuem um nível d'água raso, mostram uma deficiência na recarga. Sugerem também que para se confirmar ou comparar a estimativa da recarga, é desejável uma coleta de dados de dois ou mais ciclos hidrológicos consecutivos.

NIGAM et alli (1980), injetaram trítio em vários locais do distrito de Jalaum, no mês de junho de 1979, para estudo da recarga e fluxo de rios. O distrito de Jalaum é uma parte da região Bundelkhand de Uttar Pradesh e cai na região subtropical caracterizada por verões quentes e prolongados seguido por uma estação chuvosa e inverno frio. As amostras para análise de trítio foram coletadas após as chuvas, no mês de setembro de 1979. Eles compararam estes resultados com os encontrados pelo método de flutuação do nível d'água, e os valores de recarga obtidos pelos dois métodos concordaram razoavelmente bem.

GODSE et alli (1980), fizeram um estudo para a determinação dos parâmetros hidrológicos usando traçadores ati-

vos no local de disposição de rejeitos radioativos de Tarapur (Índia). Eles indicam que entre os vários parâmetros hidrológicos, tais como condições geológicas superficiais e sub-superficiais e drenagem sub-superficial, a medida da recarga da precipitação e os estudos de movimento da água subterrânea, são de vital importância do ponto de vista de gerenciamento de rejeitos radioativos. O estudo foi feito sobre uma área de 40 hectares incluindo 10 hectares do local de disposição de rejeitos, utilizando o trítio como traçador. Os valores de recarga encontrados em três locais desta área, foram: 4,46cm, 5,01cm e 4,58cm. Eles indicam também que o trítio é o traçador mais conveniente por causa de sua propriedade de fácil mistura com a água e de seu movimento livre. Além disso, a reação do trítio com o solo, é negligenciável.

ALI et alli (1980), Índia, estudaram o movimento da umidade do solo injetando trítio no solo e estudando seu movimento, irrigando-se água na superfície. Além disso, utilizaram a própria água tritiada para irrigar o solo e estudar sua infiltração. Isto foi feito para confirmação do método proposto por MUNNICH et alli (1968) para cálculo de recarga. Foi encontrado por eles que este método é aproximadamente correto. Para este estudo foram marcados dois locais, o primeiro, de 122cm x 124cm, e o segundo, de 100cm de diâmetro. Eles indicam que o fluxo da água é devido à força de gravidade, mas há resistência do ar preso nas partículas do solo.

TANWAR (1980) estimou a recarga em 25 locais em Haryana, Índia, utilizando conjuntos de injeção de trítio com 5 pontos em forma de cruz. Neste estudo, o deslocamento do traçador em 18 meses, variou de 40 a 180 cm.

CHANDRA & POLI (1980) estimaram a recarga no local de disposição de rejeitos radioativos no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, por injeção de trítio

artificial a 70cm de profundidade. Este local é caracterizado por ter um clima tropical. Obteve-se uma recarga de 19cm no período de maio de 1979 a maio de 1980.

DATTA et alli (1980) apresentaram um modelo conceitual de transporte de água na zona não saturada. O transporte da água foi visualizado em forma de pulsos de placas se infiltrando através de uma série de células de mistura conectadas, subdividindo o perfil do solo. Para cada célula foi aplicada a equação de balanço de massa, para intervalos de tempo discretos. Estas simulações reproduziram razoavelmente bem os resultados obtidos com o experimento de trítio nas planícies Indo-Gangetic no norte da Índia.

SAXENA & DRESSIE (1983), estimaram a recarga de aquíferos e o movimento da umidade em formações arenosas utilizando oxigênio -  $^{18}\text{O}$  natural e perfil de trítio injetado na zona não saturada. As taxas de movimento da umidade do solo estimadas por estes dois métodos foram comparadas e estão relativamente próximas. O estudo foi realizado no lado ocidental de Uppsala, Suécia, onde o trítio foi injetado numa área de 2m x 2m, antes do degelo da neve. Eles indicam que o uso simultâneo das duas técnicas mostrou que as variações sazonais de  $^{18}\text{O}$  na precipitação podem ser utilizadas no estudo do movimento da umidade do solo e recarga. Uma estimativa precisa da recarga é possível quando a umidade depletada em  $^{18}\text{O}$  contribuída por períodos sucessivos de degelo, é encontrada na zona não saturada. A escolha do trítio como traçador (que não sofre efeitos de fracionamento isotópico) confirma a validade dos resultados obtidos pelo método  $^{18}\text{O}$  e também fornece uma informação independente sobre o movimento da umidade e recarga.

ATHAVALE et alli (1983) determinaram a recarga de aquíferos freáticos na formação de basalto Deccan Trap, por

causa das precipitações de 1980 nas bacias de KULADI e Godavari - Purna, por injeção de trítio. O trítio foi injetado em junho, antes das monções, a uma profundidade de 60cm. As perfilações de solo foram realizadas após as monções e no final de um ciclo hidrológico. Os valores de recarga para 19 locais na bacia Kukadi variaram de 135 a -8mm, enquanto que os 24 locais na bacia de Godavari - Purna, variaram de 208 a -28mm, fornecendo valores médios de 46 a 56mm, respectivamente. O "input" anual calculado para as reservas de águas subterrâneas para as duas bacias foi de 31,9 e 35,4 milhões de  $m^3$ , respectivamente. Os valores de recarga e os dados de flutuações de nível d'água concordaram qualitativamente. O efeito de evaporação nos meses de verão seco, foram calculados por comparação dos valores de recarga encontrados após as monções de 1980 e antes das monções de 1981.

MÜNNICH (1983) discute o modelo de fluxo em pistão e descreve o movimento da água por um modelo de multi caixas, unidimensional. Este modelo descreve a zona não saturada como uma série de camadas de solo com conteúdo interno de água bem misturado.

BAHADUR et alli (1984) fizeram suas experiências em campos tratados com NaCl para estudar o modelo de distribuição da umidade e movimento em relação a produtividade da planta. A técnica de marcação com trítio forneceu uma recarga média artificial de 89mm e 13mm de água nos solos com areia para controle e para os tratados com NaCl, respectivamente.

GUPTA & SHARMA (1984) estimaram a recarga na bacia de Sabarmati, Índia ocidental. Discutem a estimativa da recarga média por área, obtida através de várias estações, no campo. Observaram uma considerável variação na recarga em locais vizinhos, tendo aparentemente condições similares de solo e clima. A partir dos dados de trítio e dos dados obtidos por

métodos clássicos, a bacia foi dividida em três zonas de recarga. Um valor médio de 14% da precipitação se infiltra anualmente nas partes aluvionares da bacia Sabarmati.

SHARMA (1984) estudou o mecanismo da recarga de aquíferos e sua variabilidade em regiões semi-áridas usando trítio e isótopos estáveis. Estes estudos indicaram que a recarga de aquíferos em regiões semi-áridas é um fenômeno complexo dependendo, não somente da quantidade e intensidade de chuva, mas também do clima e textura do solo. A pesquisa foi realizada no deserto Thar, Rajasthan, região árida, e os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos para Ahmedabad, uma região com precipitação três vezes maior que o deserto Thar, mas ainda na região semi-árida. Os valores encontrados para a recarga varia de 1,66 a 2,57cm. Os estudos indicam que mesmo numa região com precipitação muito baixa, a recarga pode ser suficientemente substancial, em torno de 7 a 15%.

FODOR-CZAKY et alli (1985), para investigar a possibilidade de disposição de rejeitos sólidos diretamente no solo, estudaram o movimento da água tritiada no solo de Pós-póksilagy, Hungria na Instalação de Processamento e Armazenamento de Rejeito Radioativo, para as profundidades de 2,0 a 2,9m. Para caracterizar o movimento da umidade do solo foi escolhida uma quantidade independente do tempo, a distância de migração, dividida pela quantidade de água irrigada. Foi encontrado que este valor diminui de 0,3 (inicial) para 0,2cm/l com o aumento do conteúdo de argila no solo. Um modelo matemático foi desenvolvido para interpretar os resultados experimentais.

SHARMA e GUPTA (1985) empregaram um modelo conceitual simples para entendimento do mecanismo do movimento da umidade do solo. Este modelo envolve a estimativa de excesso

de precipitação para cada mês, levando em consideração os dados de armazenamento de umidade do solo e evapotranspiração. Os resultados obtidos com este modelo concordaram com os valores experimentais obtidos pelo método do trítio artificial.

ROVIINSKII et alli (1987) estudaram a taxa de desativação de plantas de solos contaminados com trítio artificial e estabeleceram correlações entre a densidade de contaminação de um local e a concentração de trítio na camada de ar próxima à superfície da terra e na vegetação. Eles encontraram que a concentração do óxido de trítio na camada de ar próxima à superfície da terra, é dada pela concentração de trítio da umidade higroscópica das camadas superiores de solo e depende principalmente das condições meteorológicas (temperatura, umidade do ar, velocidade do vento, precipitação). Na vegetação, o trítio está presente na umidade das plantas e tecidos orgânicos. A concentração de trítio na umidade das plantas depende da densidade de contaminação das camadas superiores de solo. A razão das concentrações de trítio em tecidos orgânicos e na água livre das plantas, muda de 0,04 para o começo do período de vegetação, para 0,3 no final do período.

SHARMA & GUPTA (1987) enfatizam a importância do estudo do movimento da umidade do solo para conhecimento e estimativa da recarga de aquíferos. Indicam também a dificuldade de utilização de métodos clássicos para a estimativa da recarga, já que os dados hidrológicos de uma região nem sempre são disponíveis. Deste modo, tem aumentado a utilização de traçadores artificiais e ambientais na determinação da recarga. Um modelo simplificado de escoamento - evapotranspiração, foi desenvolvido por eles para estimativa da recarga regional, baseados em estudos de trítio. Desde que os dados hidrológicos para o deserto Thar, não estão disponíveis, os resultados de um estudo similar de marcação com trítio em Ahmedabad, fo-

ram utilizados para aplicação do modelo.

BENGTSSON et alii (1987) utilizaram  $^{18}\text{O}$  e trítio injetado artificialmente para estudar a percolação da água no solo em um depósito fluvio-glacial de Uppsala Esker, Suécia. Determinou-se uma velocidade média de 2,5m/ano para a infiltração da água no solo.

## CAPÍTULO VI

### METODOLOGIA

#### 6.1. ÁGUA TRITIADA

Nos experimentos a serem descritos utilizou-se o trítio artificial sob a forma de água tritiada com concentrações variando de  $3,7 \times 10^4$  a  $7,4 \times 10^4$  Bq/ml (1 a  $2 \mu\text{Ci/ml}$ ). A concentração foi escolhida com base na concentração máxima permíssível, no limite de detecção do aparelho utilizado e nas características do local em estudo.

O trítio artificial foi usado como traçador, pela disponibilidade e pelo fato de não haver necessidade de enriquecimento isotópico. Além disso, com as concentrações utilizadas não há risco de interferência do conteúdo de trítio existente naturalmente na água do solo (concentrações de trítio ambiental, ver Capítulo III, item 3.2).

Toda manipulação da água tritiada é feita em laboratório com sistema de exaustão isolado do resto do prédio.

O manuseio é feito cuidadosamente utilizando-se luvas de proteção para evitar o contacto com a pele.

O transporte é feito em frasco de polietileno bem vedado, etiquetado com o valor da concentração e acondicionado em caixa, evitando assim qualquer evaporação.

A detecção do trítio é feita pelo método dos detectores líquidos de cintilação.

## 6.2. LIMITE DE DETECÇÃO EM GERAL

Ao medir-se a taxa de contagem de uma amostra radioativa (S), o resultado é a soma das contribuições das radiações de fundo (B) e da amostra (A). Portanto, a taxa de contagem líquida da amostra é dada por (S - B) e a atividade absoluta, A, será (OIKAWA, 1978):

$$A = \frac{S - B}{E} \quad (6.1)$$

onde:

S = taxa de contagem bruta da amostra

B = taxa de contagem da radiação de fundo

E = eficiência do sistema de detecção.

O erro estatístico em termos de desvio padrão, associado à taxa de contagem líquida, será:

$$A = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{\frac{S}{t_S} + \frac{B}{t_B}} \quad (6.2)$$

sendo:

$\sigma_S$  = desvio padrão da taxa de contagem total

$\sigma_B$  = desvio padrão da taxa de radiação de fundo

$t_S$  = tempo de medida da amostra

$t_B$  = tempo de contagem da radiação de fundo

A melhor condição para a precisão dos resultados é obtido quando a atividade líquida é muito maior que o erro associado à medição, ou seja:

$$\frac{S - B}{\sqrt{\frac{S}{t_S} + \frac{B}{t_B}}} \gg 1 \quad (6.3)$$

Quando a taxa de contagem da amostra é da mesma ordem de grandeza da taxa de contagem da radiação de fundo e os seus respectivos tempos de medição forem iguais, o erro associado ao cálculo de A, será, dado por:

$$\sigma_A = \sqrt{2 \frac{B}{t}} = 2\sigma_B \quad (6.4)$$

Normalmente, considera-se este limite de detecção como  $2\sigma_A$  e portanto o limite mínimo de detecção a ser usado, é:

$$A_{\min} = \frac{2\sigma_A}{E} = \frac{1}{E} \cdot 2\sqrt{2} \sigma_B \quad (6.5)$$

A contagem de fundo, nas condições de medição utilizadas é de aproximadamente 30cpm. O intervalo de tempo durante o qual as amostras e a radiação de fundo são medidos, é de 10 minutos e a eficiência de medição, de 18%, aproximadamente.

Substituindo esses valores na equação 6.5, a atividade mínima que pode ser detectada, dentro do nível de confiança de 95%, é de 0,045Bq ( $1,22 \times 10^{-5}$   $\mu$ Ci)

### 6.3. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE TRAÇADOR A SER UTILIZADO

O trítio injetado no solo é diluído com o tempo por difusão molecular, portanto deve-se calcular as quantidades mínimas ou concentrações de trítio que ainda podem ser identificadas como traçador após um certo período de tempo. Isto, logicamente, depende do modo com que o trítio é injetado. Em princípio, o traçador pode ser aplicado ao solo, uniformemente, ou num plano horizontal ou numa linha reta ou somente num ponto individual. Uma simples injeção puntual irá logicamente necessitar de uma quantidade mínima de traçador, mas de uma concentração relativamente alta (BLUME et alii, 1967).

A distribuição gaussiana da concentração de traçador em  $n=1, 2$  e  $3$  dimensões em uma extensão espacial mínima no início (distribuição plana, linha, ponto) é representada por:

$$C = C_{\max} \exp(-r^2/2\sigma^2) \quad (6.6)$$

onde o quadrado da distância  $r$  do centro da distribuição é da do por:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad n = 1, 2, 3 \quad (6.7)$$

e o desvio padrão médio quadrático é  $\sigma^2 = 2Dt$  em todos estes casos ( $D =$  constante de difusão e  $t =$  tempo).  $C_{\max}$  pode também ser representado por:

$$C_{\max} = \frac{M}{b^n} \quad n = 1, 2, 3 \quad (6.8)$$

onde  $M =$  quantidade de traçador envolvido e  $b = \sigma\sqrt{2\pi}$  é a largura em qualquer tempo de uma distribuição retangular equivalente do traçador, tendo a mesma concentração máxima e contendo a mesma quantidade total de traçador da equação gaussiana 6.6. Assumindo os seguintes parâmetros:

- (a) Tempo máximo  $t$  após o qual o traçador ainda pode ser detectado = 1 ano.
- (b) Fração de umidade volumétrica = 33 vol.%
- (c) Sensibilidade de detecção do espectrômetro de cintilação: 120Bq/1 ( $10^3$  U.T.  $\approx 3,2 \times 10^{-3}$   $\mu$ Ci/1)
- (d) Difusão isotrópica somente por difusão molecular ( $D=1,5 \times 10^{-5}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ ), portanto,  $\sigma \approx \sqrt{2Dt} = 3\text{dm}$  após um ano
- (e) Virtualmente, nenhuma perda do traçador por decaimento radioativo.

Chega-se para uma injeção puntual a um valor de aproximadamente  $0,19 \times 10^4$  Bq/ml ( $0,05 \mu\text{Ci/ml}$ ) sendo mais baixos os valores para injeção plana e em linha.

De acordo com os regulamentos de segurança deve-se manter a concentração do traçador tão baixa quanto possível. Por outro lado, a quantidade a ser injetada também é limitada para não alterar a distribuição natural de umidade do solo. Outro problema também é uma possível perturbação no trítio ambiental.

As experiências mostram que é desejável se usar pelo menos quantidades 10 vezes mais altas ( $1,9 \times 10^4$  Bq/ml ( $0,5 \mu\text{Ci/ml}$ )). Isto acontece porque deve-se levar em conta as perdas por evaporação, transpiração das plantas e movimento horizontal. Por outro lado, deve ser notado que uma sensibilidade de detecção mais alta não adianta desde que o limite de detecção assumido é aproximadamente aquele do trítio ambiental. Deste modo, por garantia optamos em utilizar uma concentração de  $\approx 3,7 \times 10^4$  Bq/ml ( $1 \mu\text{Ci/ml}$ ).

#### 6.4. INJEÇÃO

Baseando-se nos métodos de injeção de traçador existentes, procurou-se determinar uma forma de injeção mais conveniente aos interesses do trabalho.

As injeções de trítio artificial são feitas a uma profundidade bem abaixo da zona de influência das raízes (50 a 90cm), a fim de minimizar a interferência da evapotranspiração na determinação da recarga e, de preferência, em lugares planos e longe de árvores com raízes profundas.

São feitas em cinco pontos a uma distância de 10cm em forma de cruz. Deste modo, o deslocamento ou difusão da nuvem de trítio deve ser mais uniforme ao redor do ponto de injeção.

Em geral, são feitos cinco conjuntos de injeções, cada um contendo cinco pontos. Isto garante a possibilidade de se fazer 4 - 5 amostragens de solo para diferentes intervalos de tempo sem afetar o solo natural e as condições ao redor do conjunto ainda não amostrado.

Inicialmente, os conjuntos de injeção eram feitos a uma distância de aproximadamente 1 metro entre cada um deles. Posteriormente essa distância foi aumentada (2 - 5m) para se evitar problemas de interferência de um conjunto para outro em caso de haver algum movimento horizontal da umidade por caminhos preferenciais.

A operação da injeção é a seguinte: inicialmente são colocadas cinco barras no solo de tal forma que abra um buraco de 70cm de profundidade (ou outra profundidade desejada) e 7mm de diâmetro. As barras são retiradas e inseridos os tubos de injeção de latão, posteriormente substituídos por aço inox, por serem mais rígidos (de diâmetro externo 3mm). São injetados vagarosamente 2,5ml de água tritiada dentro de cada buraco com uma seringa. Após as injeções, os furos são preenchidos com solo. Marcadores são colocados nos pontos de injeção para servir como indicação para subseqüentes localizações desses pontos. A área é mantida completamente sem perturbação.

A operação de injeção aparentemente simples pode ser complicada dependendo do tipo de solo e do local em estudo, tendo assim havido necessidade de modificações no decorrer das experiências.

Esta operação de injeção pode ser dificultada quando o solo está muito compactado, podendo em alguns casos, entupir a saída do tubo. Em algumas experiências foi necessário a utilização de uma bomba para inflar câmaras de pneu de bicicleta para pressurizar o tubo de injeção para poder ser introduzido o traçador.

Além disso, houve necessidade de se trocar os tubos de injeção de latão por aço inox por serem mais rígidos e portanto mais fáceis de serem manuseados principalmente na introdução e retirada do solo. Como a injeção é feita a uma determinada profundidade, não deve haver contaminação da parte superior à profundidade de injeção. Portanto, a retirada deve ser feita o mais cuidadosamente possível. Mas, na prática, é muito difícil se evitar pelo menos alguma contaminação.

A Figura 6.1 é uma representação esquemática da injeção de água tritiada como traçador.

#### 6.5. AMOSTRAGEM

Normalmente, as amostras de solo são retiradas após 3, 6, 9 e 12 meses da injeção, completando assim um ciclo de chuva.

As amostras de solo são tomadas com um trado manual de 3" de diâmetro em intervalos de 10 em 10cm até a profundidade desejada. Quantidades de solo adequadas são armazenadas em frascos bem vedados e estes frascos são levados ao laboratório para estimativa do conteúdo de trítio e de umidade.

Normalmente as perfilagens de solo são feitas em intervalos de 0,1 a 1,0m. Neste trabalho mantivemos o intervalo de 10cm para melhor localização do pico do trítio.

O trabalho de amostragem deve ser feito cuidadosamente para evitar a contaminação das camadas mais profundas com restos de solo que podem desprender-se do trado ou serem liberados por atrito durante a sua colocação e retirada do furo. No entanto, é quase que impossível evitar-se alguma contaminação.

Para melhorar a amostragem, foi utilizado também um trado com um motor e um guia. Este trado diminui os problemas

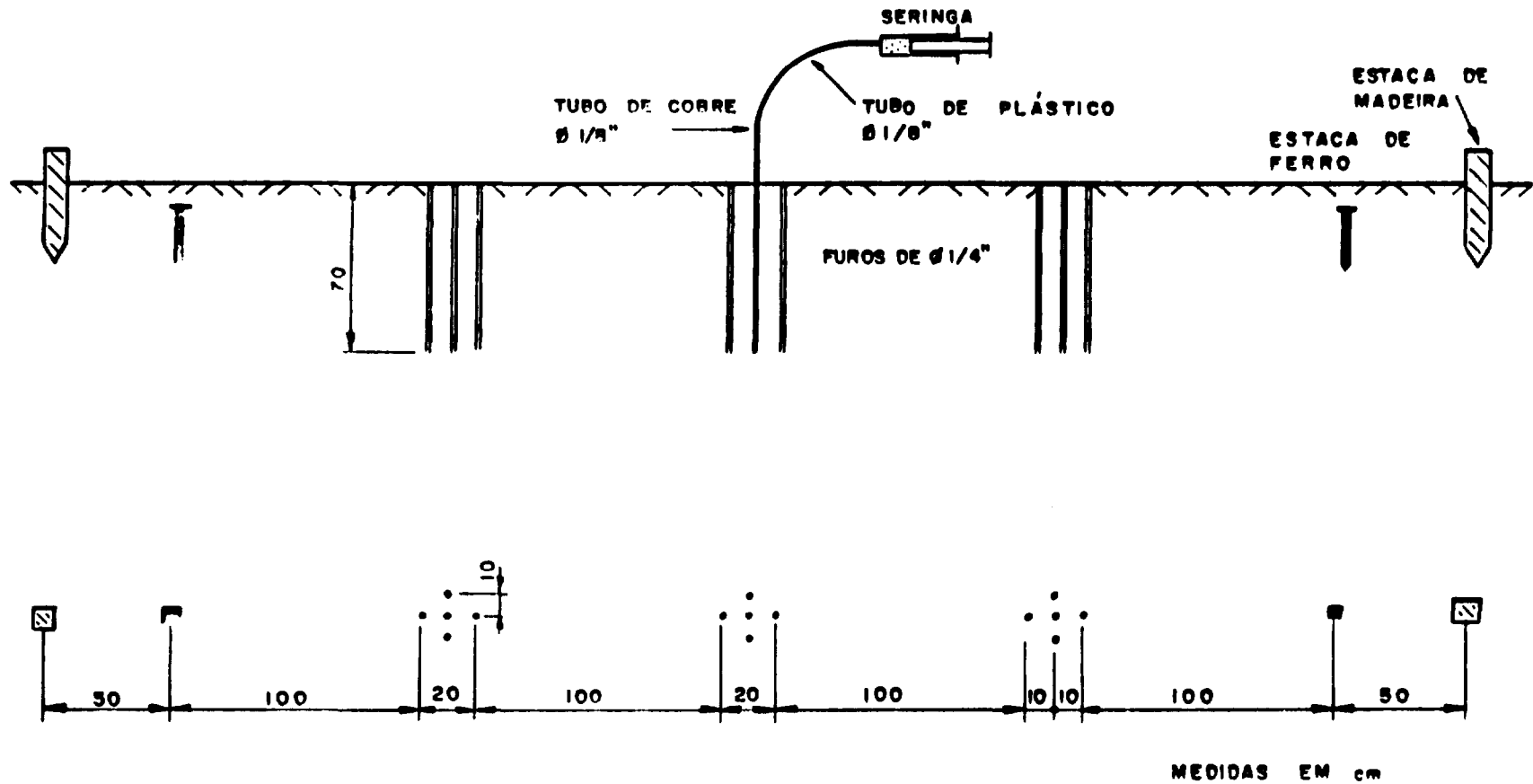


FIGURA 6.1. Representação esquemática da injeção de água tritiada no solo

de contaminação na subida e na descida e também minimiza a possibilidade de se entortar o buraco.

O furo feito com o trado deve ser perfeitamente vertical, qualquer inclinação altera totalmente a marcação da profundidade.

Portanto, uma vez iniciado o furo, ele não pode ser entortado, pois perde-se totalmente este ponto de injeção.

#### 6.6. MEDIDA DE DENSIDADE E UMIDADE DO SOLO

A medida de densidade total é feita no próprio campo. Pesa-se todo o solo retirado e determina-se o volume enchendo-se o buraco com volumes conhecidos de areia de granulção fina, calculando-se assim, um valor médio do peso específico do solo. Isto é feito admitindo-se uma pequena variação do peso específico até a profundidade desejada.

O conteúdo de umidade é obtido pesando-se as amostras antes e depois da secagem em uma estufa a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , segundo a norma ASTM. Designação D - 2216 - 71, nos laboratórios do Departamento de Aplicações de Radioisótopos e Radiações na Engenharia e na Indústria (TE/IPEN/CNEN). A umidade é dada em porcentagem.

#### 6.7. DESTILAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO

Para determinação do conteúdo de trítio, montou-se um sistema de vácuo, para destilação das amostra de solo.

Para a extração da umidade, as amostras são destiladas a vácuo mecânico. As amostras são aquecidas com mantas aquecedoras de temperaturas reguláveis. A umidade destilada é coletada nos condensadores que são resfriados por uma mistura de gelo seco e acetona, ou, em alguns casos, uma mistura de nitrogênio líquido e álcool (a uma temperatura de  $\approx -70^{\circ}\text{C}$ . A

Figura 6.2 mostra o sistema de vácuo utilizado.

Com a finalidade de se evitar erros por causa do fra<sub>u</sub>cionamento isotópico procura-se retirar praticamente toda a umidade do solo, por que a água tritiada tem uma pressão de vapor menor que a água ordinária e portanto se a destilação não for completa, a água remanescente pode ser enriquecida em trítio e o condensado, depletado.

## 6.8. DETECCÃO DE TRÍTIO PELO MÉTODO DOS DETECTORES LÍQUIDOS DE CINTILAÇÃO

### 6.8.1. Mecanismo do processo de cintilação líquida

A contagem por cintilação líquida envolve uma mistura da amostra com um material cintilante (cintilador) que serve como detector. A principal vantagem é a geometria  $4\pi$ , que resulta em altas eficiências de medição. A grande aplicação destes contadores é para emissores beta de baixa energia.

O material radioativo é dissolvido numa solução cintiladora. A amostra que é contada, consiste então da substância radioativa, de um sistema solvente e de um soluto cintilador.

A energia da partícula primária é transferida ao solvente e tem o efeito de ionizar, dissociar e excitar as moléculas do solvente. Entretanto, somente uma fração de aproximadamente 5% da energia total absorvida das partículas beta é convertida em quantas de luz. O resto da energia é convertido em calor ou é usada para induzir mudanças químicas.

O próximo passo envolve a transferência da energia do solvente excitado para o soluto primário (cintilador). Isto acontece em  $\approx 10^{-9}$  segundos. O retorno das moléculas ao seu estado eletrônico fundamental é por emissão de fótons na re-

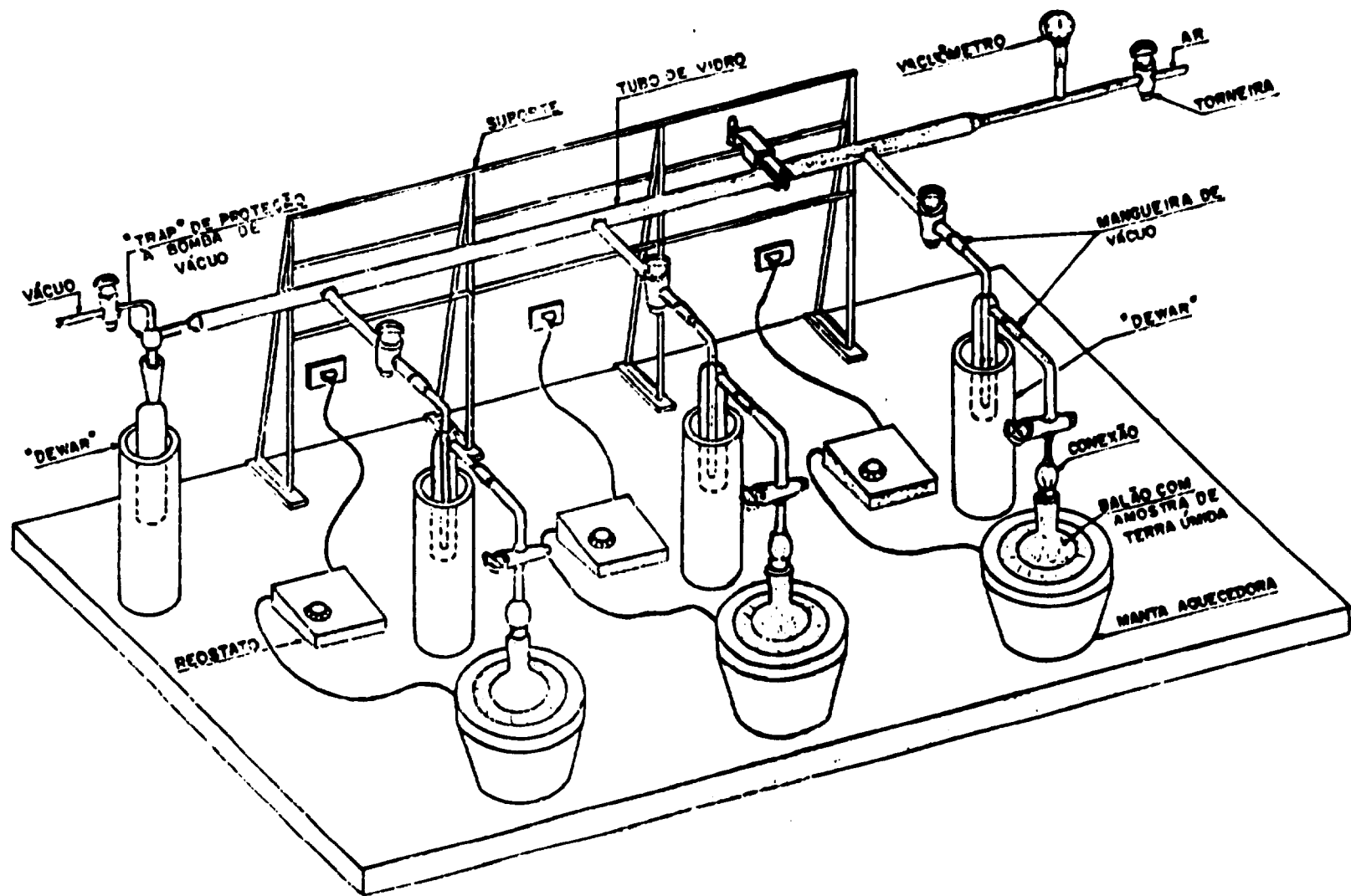


FIGURA 6.2. Sistema de destilação de solo utilizado neste trabalho

gião visível e ultravioleta. A frequência ou comprimento de onda da luz é expressa em Angstroms. A saída de luz é uma característica do cintilador usado.

Algumas vezes é necessário se usar um soluto secundário para absorver os quantas de luz do soluto primário e reemití-los num outro comprimento de onda. Por esta razão é conhecido como um deslocador espectral ou um deslocador de comprimento de onda. O soluto secundário é incluído na preparação para introduzir o espectro de emissão da amostra dentro do intervalo de resposta espectral da fotomultiplicadora.

A quantidade de luz gerada no cintilador é também o tamanho do pulso elétrico na saída da fotomultiplicadora, é proporcional à energia da partícula beta contada. Isto significa que a amplitude do pulso irá diminuir se ocorrer qualquer uma das seguintes condições:

- a) se uma parte da energia da partícula for perdida ou absorvida antes de entrar em contacto com o cintilador,
- b) se o material presente na amostra reduz a eficiência da transferência de energia,
- c) se a luz emitida é absorvida no caminho em direção à fotomultiplicadora.

Interferência deste tipo é conhecida como "quenching". Pode-se definir "quenching" como qualquer processo relacionado a físico, químico, ou constituintes de cor da amostra, que irá atenuar, ou interferir com a transferência de energia em todo o sistema de contagem.

Na Figura 6.3 é representado esquematicamente o processo de cintilação (SAMPA, 1979).

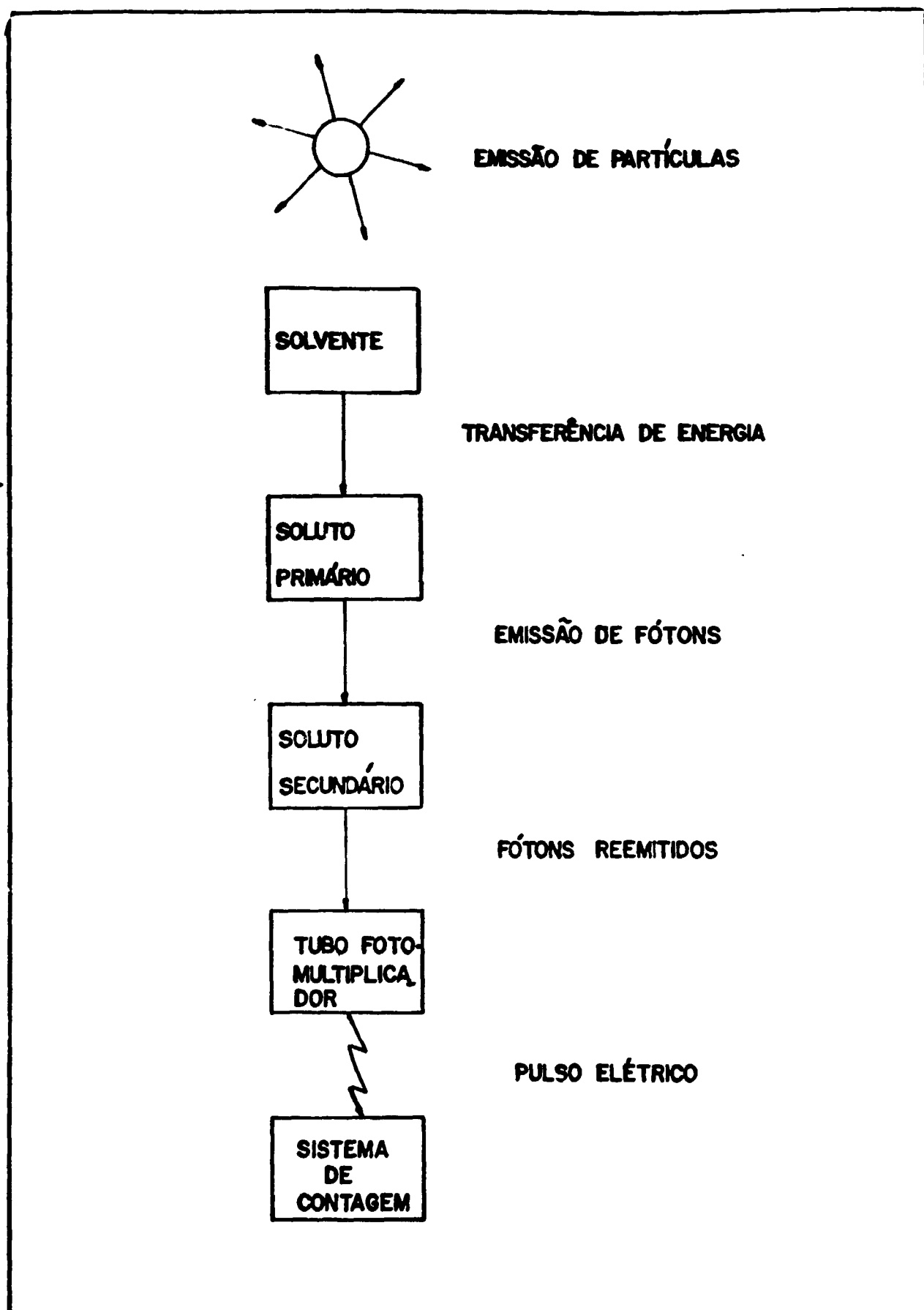


FIGURA 6.3. Processo de cintilação líquida (SAMPA, 1979)

### 6.8.2. Espectrômetro de cintilador líquido

O espectrômetro de cintilador líquido empregado para a determinação do conteúdo de trítio foi o LKB - Wallac, modelo 81.000 comercial. Possui três canais analisadores de altura de pulsos, com contagem simultânea, e cada canal contém 33 discriminadores, ajustados logaritmicamente cobrindo um intervalo de energia de 1keV a 2000keV. Possui um trocador automático de amostras que comanda um sistema impressor de dados e uma unidade de refrigeração que permite variar a temperatura entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e a temperatura ambiente.

As unidades que compõem o espectrômetro de cintilador líquido LKB Wallac 81.000 utilizado para as medidas neste trabalho são as seguintes; (Figura 6.4, Manual, LKB Wallac).

1) Fonte de alta tensão

2) Tubos fotomultiplicadores, constituídos por três partes principais:

a) Fotocátodo: geralmente revestido por uma liga césio antimônio ou prata - magnésio - césio ou outros similares; converte o fóton recebido em um número proporcional de fotoelétrons. O número de fotoelétrons vai depender da energia dos fótons e de sua quantidade e da transparência e composição do fotocátodo. Os elétrons são acelerados para os dinodos.

b) Dinodos: recebem os fotoelétrons emitidos pelo fotocátodo e, por impacto, produzem outros elétrons secundários que atingem os outros dinodos, multiplicando-se assim o número de elétrons,

c) Anodo: coleta os elétrons provenientes dos dinodos e converte a carga total em um pulso de amplitude diretamente proporcional ao número de elétrons coletados.

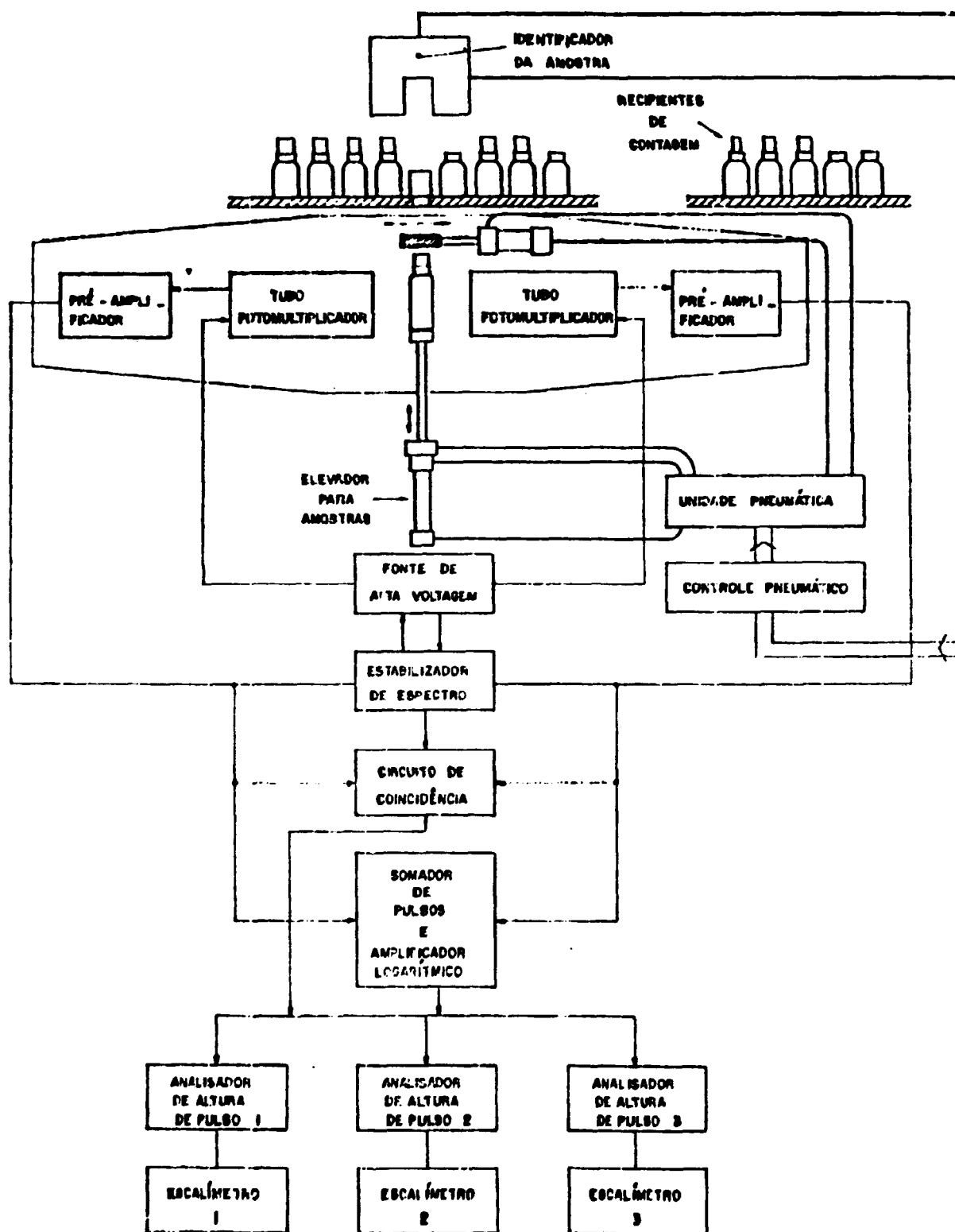


FIGURA 6.4. Diagrama de blocos do espectrômetro de cintilador líquido (Manual - LKB Wallac)

- 3) Unidade de coincidência. Este módulo permite que sejam contados os pulsos que saem simultaneamente das duas fotomultiplicadoras, dentro de um intervalo de tempo de 3 a  $8 \times 10^{-8}$  seg. Isto reduz o ruído eletrônico.
- 4) Somador de pulsos. Adiciona os pulsos provenientes das duas fotomultiplicadoras e os transfere para o amplificador.
- 5) Amplificador logarítmico. Amplifica logaritmicamente os pulsos que saem do somador de pulsos.
- 6) Analísadores de altura de pulsos. Seleciona apenas os pulsos compreendidos entre duas alturas pré-fixadas (janela). Os pulsos que ficam fora do intervalo selecionado não são contados.
- 7) Escalímetros. Contam os pulsos que passam através dos discriminadores.

Este espectrômetro permite analisar automaticamente 200 amostras.

### 6.8.3. Soluções cintiladoras

Os detectores líquidos de cintilação são basicamente soluções formadas por solventes e solutos orgânicos.

O solvente deve ser capaz de dissolver os solutos fluorescentes e a amostra radioativa, formando uma solução homogênea, com ou sem ajuda de agentes estabilizantes, ser eficiente na transferência de energia do emissor radioativo para as moléculas do soluto fluorescente e não ser tóxico.

Utilizam-se como solventes: xileno, tolueno, benzeno, dioxano, ciclohexano e outros compostos. Em alguns casos há necessidade de se usar um solvente secundário para melhorar a solubilidade e homogeneidade.

Os solutos também são classificados em primários e secundários com base nas suas funções no processo de cintilação.

O soluto primário (cintilador) deve ser eficiente na conversão de energia de excitação a fótons, deve emitir fótons dentro da resposta espectral da fotomultiplicadora, deve ser solúvel e estável nos solventes usados e permanecer em solução a temperaturas mais baixas, que são usadas neste tipo de contagem.

Os solutos mais utilizados são: PPO (2-5 - difenil oxazol), TP (p-terfenil), PBD (2-fenil-5-bifenil-oxadiazol), Butil, PBD (2-(4'-t-butil-fenil)-5-(4"-difenil-1,3,4-oxadiazol).

O soluto secundário (deslocador de comprimento de onda), tem a função de absorver a luz proveniente do soluto primário e reemití-la num comprimento de onda maior, já que nem sempre os fótons emitidos pelo soluto primário coincide com o de máxima resposta eletrônica nos fotocátodos dos tubos fotomultiplicadores.

Os solutos secundários mais comuns, são: POPOP (1,4-bis-2-(5-fenil-oxazolil)-benzeno; Dimetil-POPOP (1,4-di-2-(4-metil-5-feniloxazolil)-benzeno; bis-MSB(-p-di-(0-metilestiril)-benzeno e PBBO (2-(4'-difenil)-6-fenilbenzoxazol).

Neste trabalho utilizou-se o "Aguasol-2" como solução cintiladora. O "Aguasol-2" é a denominação comercial da New England Nuclear, com capacidade de incorporar grandes volumes de água (50%) mantendo ao mesmo tempo, eficiências de contagem relativamente elevadas.

#### 6.8.4. Recipiente de medição

Os recipientes de medição devem ser transparentes à luz produzida no processo de cintilação, devem conter pouca ou nenhuma atividade residual, devem ser resistentes ao ataque por solventes e aditivos, devem ser impermeáveis aos solventes voláteis, devem ter baixo custo e devem apresentar uma baixa radiação de fundo.

Os tipos de recipientes normalmente usados estão relacionados na Tabela 6.1..

Os solutos cintiladores normalmente empregados emitem fótons de energia correspondentes a comprimentos de onda de 300 a 500nm, portanto é necessário que o recipiente seja transparente nessa região. O vidro comum não tem uma transmissão alta nesse intervalo de comprimentos de onda.

Neste trabalho utilizaram-se frascos de vidro de 25 ml de capacidade, com baixo teor de potássio da Packard Instrument Company, Inc.

#### 6.8.5. Relação água-"coquetel" de cintilação

Para a escolha da relação água tritiada/coquetel de cintilação ("Aguasol-2") a ser usada, realizaram-se duas experiências.

Inicialmente foram preparadas amostras de mesma atividade de HTO e com volume de "Aguasol-2" constante (10ml) e volumes de água variáveis. A Figura 6.5 representa os resultados obtidos e o aspecto do coquetel.

Posteriormente realizou-se uma série de medições para amostras com quantidades crescentes de água, mantendo-se a mesma atividade de trítio e totalizando um volume de 20ml. Os resultados obtidos e o aspecto geral das amostras estão indi-

---

TABELA 6.1. Tipos de recipientes de medição (SAMPA, 1979)

Tipo	Vantagem	Desvantagem
Vidro (borossilicato ou alcalino)	Custo baixo	Radiação de fundo alta, absorção perto da região do U.V.
Vidro com baixo teor de potássio	Baixa radiação de fundo proveniente do baixo teor de $^{40}\text{K}$	Alto custo, absorção perto do U.V.
Quartzo	Transmissão alta na região do U.V.	Alto custo
Polietileno	Baixa radiação de fundo, baixo custo e eficiência alta	Permeável aos solventes orgânicos
Nylon	Baixa radiação de fundo	Permeável aos solventes orgânicos e de custo alto
Teflon	Baixa radiação de fundo	Alto custo

cados na Figura 6.6.

Quanto maior a quantidade de amostra de água tritida a ser contada, maior será a atividade. Por outro lado, como pode ser visto pelas figuras 6.5 e 6.6, a água é um agente supressor de fótons e portanto aumentando-se a quantidade de

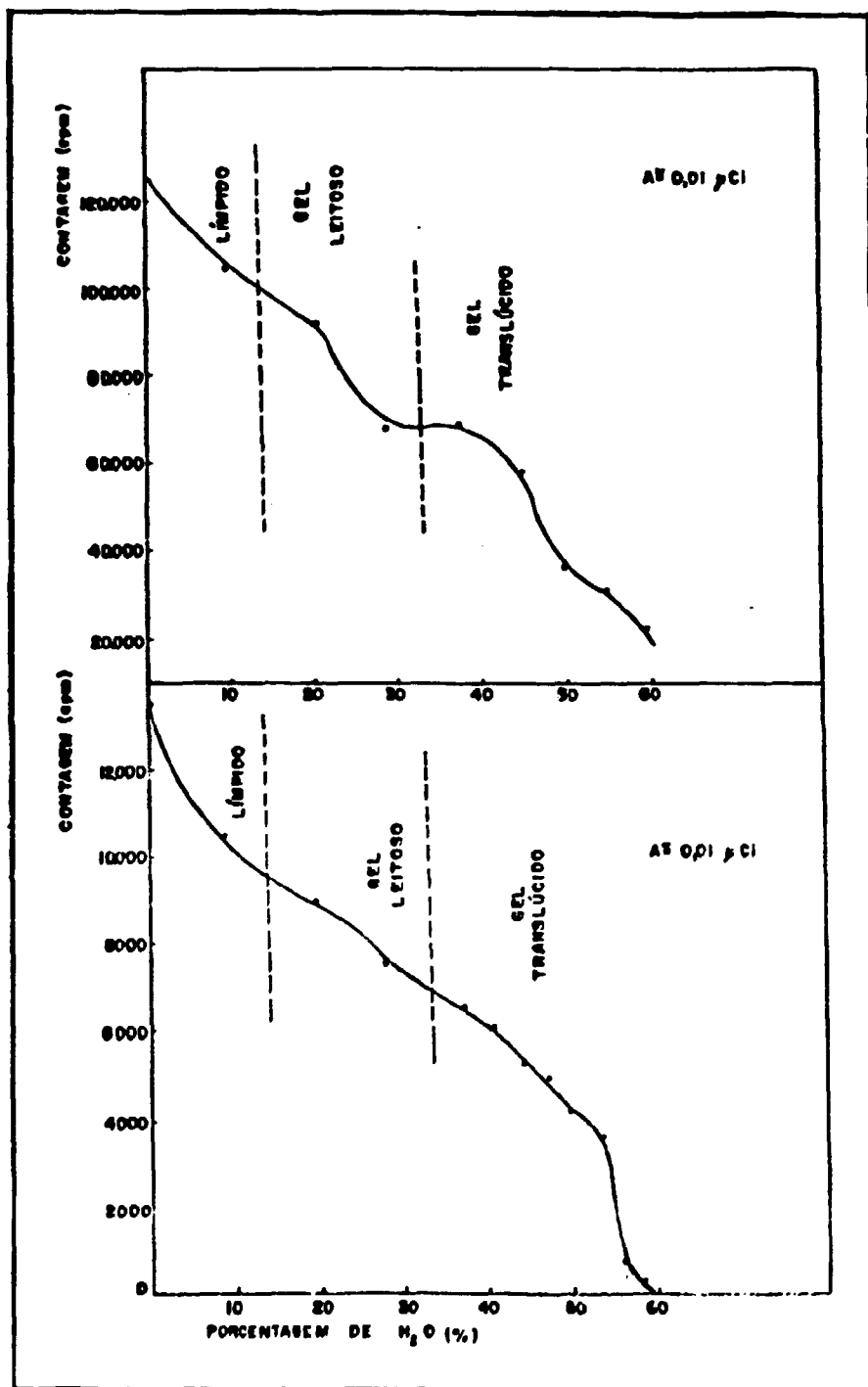


FIGURA 6.5. Contagem em função da relação água/aquasol para uma atividade. A constante e volume de H<sub>2</sub>O variável. Dados obtidos experimentalmente no esp. LKB - Wallac.

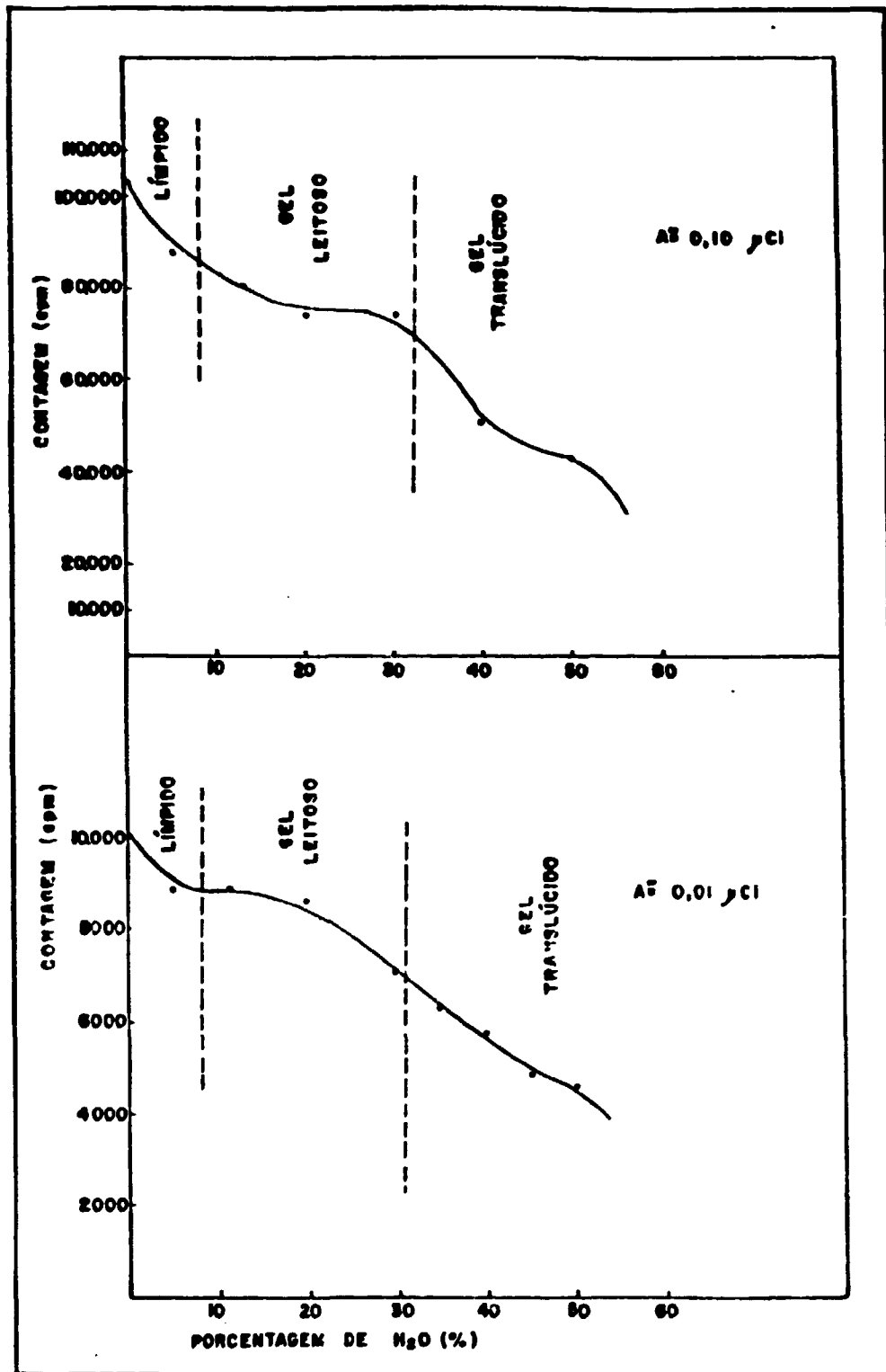


FIGURA 6.6. Contagem em função da relação água/aquasol para um volume total constante ( $V=20\text{ml}$ ). Dados obtidos experimentalmente no espect. LKB-Wallac.

água no recipiente de contagem diminui a eficiência de contagem.

Com a finalidade de se garantir uma maior sensibilidade, optou-se por usar uma relação 1:1 (50%), já que se trata de medida de amostras aquosas de pouca ou nenhuma cor. Apesar da perda na eficiência, garante-se uma atividade mais alta, já que são medidas amostras até um ano após a injeção de trítio no solo.

#### 6.8.6. Espectro do trítio e a janela de trabalho

O espectro do trítio e da radiação de fundo foram determinados pela medição de um padrão de trítio de 233064 dpm (08/79) e de água destilada, ambos preparados com 10ml de "Aguasol-2".

O tempo de contagem para o padrão foi de 1 minuto e para a radiação de fundo, de 10 minutos.

Os resultados obtidos são indicados na Tabela 6.2 e o espectro resultante, na Figura 6.7.

#### 6.8.7. Eficiência de contagem

A eficiência de contagem é a razão da taxa de contagem observada (cpm) para a taxa de desintegração real da amostra (em dpm). A eficiência é freqüentemente dada em porcentagem. Portanto, a eficiência, E, será:

$$E = \frac{\text{cpm}}{\text{dpm}} \times 100 (\%) \quad (6.9)$$

Num cintilador líquido, a eficiência depende das propriedades do instrumento de contagem, do projeto da câmara de detecção, da eficiência quântica das fotomultiplicadoras, dos circuitos de coincidência, da geometria da amostra e eficiência

TABELA 6.2. Espectro do trítio e da radiação de fundo do aparelho LKB Wallac

Posição do discriminador	Intervalo de energia (kev)	Contagem do padrão (cpm)	Contagem da radiação de fundo (cpm)
1	1,00 - 1,26	989	0,8
2	1,26 - 1,58	1405	0,8
3	1,58 - 2,00	3141	0,9
4	2,00 - 2,52	6096	2,0
5	2,57 - 3,17	4814	2,2
6	3,17 - 4,00	6695	2,7
7	4,00 - 5,04	9227	3,4
8	5,04 - 6,35	4991	3,1
9	6,35 - 8,00	2711	3,0
10	8,00 - 10,00	1099	2,8
11	10,00 - 12,60	328	2,1
12	12,60 - 15,80	54	1,3
13	15,80 - 20,00	7	1,1

cia de cintilação.

Para um mesmo instrumento de contagem, todos esses parâmetros permanecem constantes, exceto a eficiência de cintilação e a geometria da amostra.

Quando se mantém a mesma geometria de contagem e o mesmo recipiente, a eficiência de contagem dependerá somente da composição da solução.

Para a medida da eficiência adotou-se a técnica do padrão interno (PANE, 1978). Após a medição da amostra, ~~uma~~

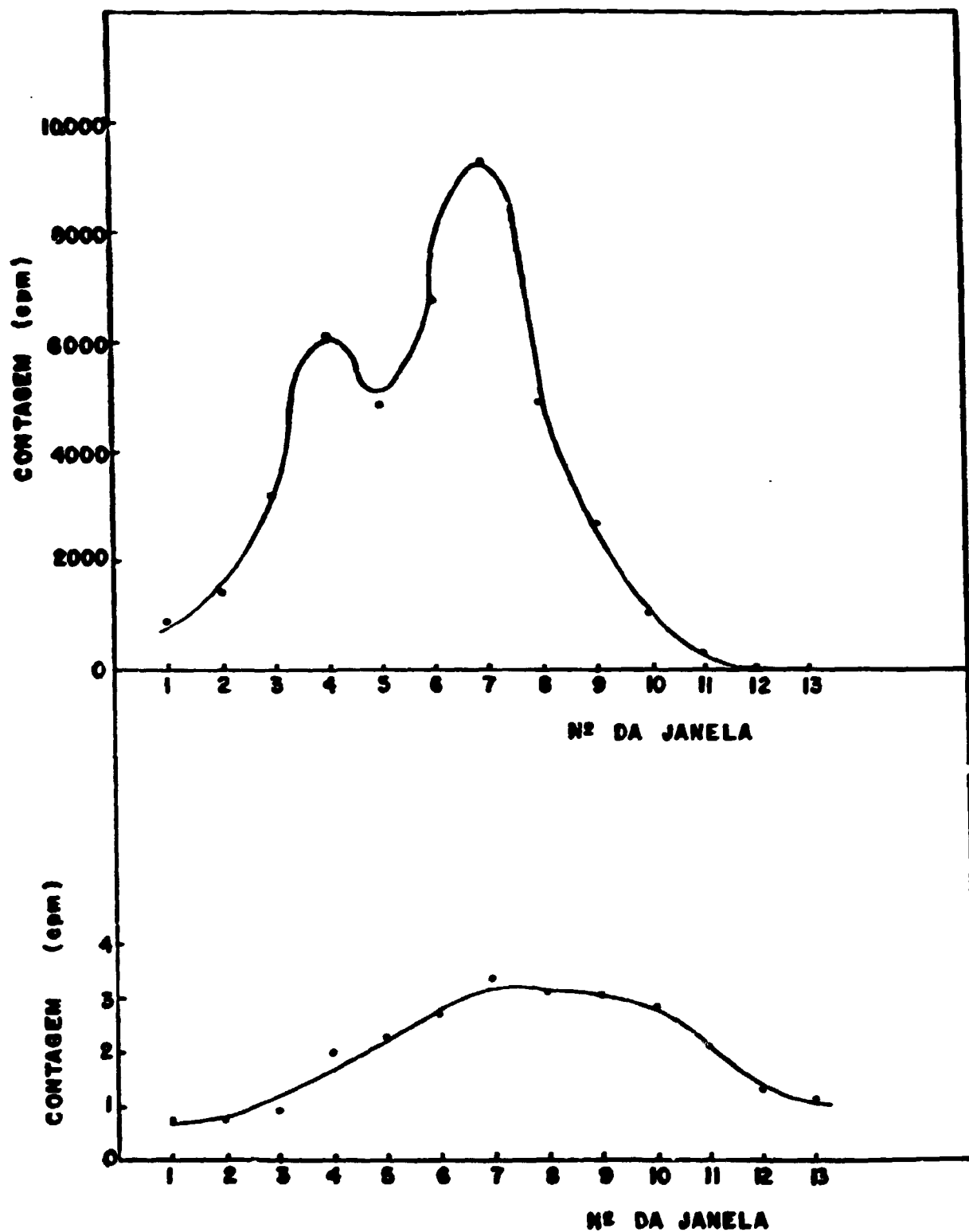


FIGURA 6.7. Espectros do títio e da radiação de fundo, do es  
pectrômetro de cintilador líquido LKB Wallac

quantidade de um padrão de trítio (atividade precisamente conhecida) é adicionada à amostra. A amostra é então recontada e a eficiência de medição é calculada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{A_{a+p} \text{ (cpm)} - A_a \text{ (cpm)}}{A_p \text{ (dpm)}} \quad (6.10)$$

onde:

$A_{a+p}$  = taxa de contagem após a adição do padrão

$A_a$  = taxa de contagem da amostra

$A_p$  = atividade absoluta do padrão adicionado

Com as amostras preparadas com 10ml de "Aguasol-2" e 10ml de padrão + amostra, obteve-se uma eficiência de  $\approx 18\%$  para o espectro todo do trítio (1-13).

#### 6.8.8. Janela de trabalho

A eficiência relativa de um contador líquido de cintilação é indicada pela figura de mérito, que é definida pela relação:

$$F = \frac{E^2}{B} \quad (5.11)$$

onde:

F = figura de mérito

E = eficiência de medição (%)

B = contagem da radiação de fundo (cpm)

Quanto maior a figura de mérito, menor será o tempo de contagem para obter uma precisão estatística desejável.

As figuras de mérito para as diversas janelas de contagem foram calculadas pela medida de um padrão de água tritiada e da radiação de fundo para as diversas janelas da con-

tagem. Os valores da figura de mérito para as diversas janelas de trabalho estão indicados na Tabela 6.3.

O valor máximo da figura de mérito corresponde à janela entre 1,00 e 6,35keV (1 a 8), na qual a eficiência de medição é de 15,98%.

Para a contagem das amostras de água tritiada utilizam-se as janelas de (1 a 8) e (1 a 7) que apresentaram as melhores figuras de mérito e de (1 a 13) que permite a contagem de todas as partículas beta emitidas pelo trítio.

TABELA 6.3. Valores da figura de mérito para diversas janelas de trabalho do cintilador líquido LKB Wallac

Janela	Intervalo de energia (keV)	Contagem do padrão (cpm)	Contagem da radiação de fundo (cpm)	Eficiência (%)	Figura de Mérito
1 - 3	1,00 - 2,00	5679	2,5	2,44	2,4
1 - 4	1,00 - 2,52	11830	5,0	5,08	5,2
1 - 5	1,00 - 3,17	16446	8,9	7,06	5,6
1 - 6	1,00 - 4,00	23126	11,4	9,92	8,6
1 - 7	1,00 - 5,04	32344	14,9	13,88	12,9
1 - 8	1,00 - 6,35	37236	18,5	15,98	13,8
1 - 9	1,00 - 8,00	40063	23,6	17,18	12,5
1 - 10	1,00 - 10,00	41423	25,5	17,77	12,4
1 - 11	1,00 - 12,60	41820	28,2	17,94	11,4
1 - 12	1,00 - 15,80	41870	30,2	17,96	10,7
1 - 13	1,00 - 20,00	42138	31,7	18,08	10,3

### 6.8.9. Preparação das amostras

As amostras foram preparadas com 10ml de solução cintiladora ("Aguasol - 2") e 10ml de água tritiada. Após vigorosa agitação o recipiente de contagem é colocado no sistema de contagem, que, para melhorar a eficiência de medição está a 10°C.

As amostras são mantidas no cintilador pelo menos por uma hora antes de serem iniciadas as contagens, para refrigeração e decaimento da fosforescência. As amostras de água tritiada são contadas por 10 minutos.

### 6.8.10. Reprodutibilidade dos resultados

#### 1. Reprodutibilidade das medições no espectrômetro

Para verificar o grau de reprodutibilidade das medidas no espectrômetro, preparou-se uma amostra com 10ml de "Aguasol - 2" e 10ml de água tritiada e efetuaram-se 43 medições de 10min cada uma, a 10°C.

Ao se efetuar uma série de contagens de uma mesma amostra, com o mesmo sistema, a variância do conjunto de medidas deve ser da mesma ordem de variância da média das contagens, se o aparelho não apresentar nenhuma flutuação anormal na sua resposta.

Efetuuou-se uma análise estatística dos resultados, usando-se a distribuição "F" (NALIMOV, 1963), que compara as variâncias do conjunto de medidas e da média das contagens, mediante a relação:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (6.12)$$

onde o numerador representa a maior dessas variâncias.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- valor médio:  $\bar{X} = 41645,7$
- desvio padrão da amostra:  $S = 89,2$
- variância da amostra:  $S^2 = 7965,7$
- coeficiente de variação ( $V = S/\bar{X} \times 100$ ) :  $V=0,2\%$
- desvio padrão do valor médio:  $S = 204,0$
- F experimental =  $\frac{204,0^2}{89,0^2} = 5,23$

O valor de F experimental é igual a 5,23. O valor de F tabelado num nível de confiança de 97,5% com 42 graus de liberdade para a variância menor e 1 grau de liberdade para a variância maior ( $F_{0,025}(1, 42)$ ) está compreendido entre os valores:

$$F_{0,025}(1, 40) = 5,42$$

$$F_{0,025}(1, 60) = 5,29$$

Como o valor de F experimental é menor que o valor de F tabelado, as variâncias são consideradas equivalentes, o que permite afirmar que o sistema de contagens fornece resultados reprodutíveis.

## 2. Reprodutibilidade na preparação das amostras

Com a finalidade de verificar a reprodutibilidade na preparação das amostras, prepararam-se 30 coquetéis exatamente iguais com 10ml de água tritiada e 10ml de "Aguasol-2" medindo-se 10min cada uma. Efetuou-se a análise estatística dos resultados e aplicou-se o teste "F".

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- valor médio:  $\bar{X} = 4556,0$
- desvio padrão da amostra:  $S = 318,5$
- variância da amostra:  $S^2 = 101487,2$

- coeficiente de variação:  $V = 6,9\%$
- desvio padrão do valor médio:  $S = 67,5$
- F experimental =  $\frac{318,5^2}{67,5^2} = 22,3$

O valor de F tabelado num nível de confiança de 97,5% com 29 graus de liberdade para a variância maior e 1 grau de liberdade para a variância menor, está compreendido entre os valores:

$$F_{0,025}(20, 1) = 993,1$$

$$F_{0,025}(30, 1) = 1001$$

Como o valor de F experimental é menor que o valor de F tabelado, conclui-se que, no nível adotado, as variâncias são equivalentes, o que permite concluir que o método de preparação de amostra é reprodutível.

Para testar a reprodutibilidade do método comparou-se a variância desse conjunto de medidas com a variância de uma única amostra (cujos resultados estão indicados no item anterior). O resultado obtido para F foi o seguinte:

$$F = \frac{318,5^2}{204.0^2} = 2,44$$

Como o valor de F experimental é menor que o tabelado para um nível de confiança de 97,5% com 29 graus de liberdade para a variância maior e 1 grau de liberdade para a variância menor, pode-se concluir que o método é reprodutível.

#### 6.9. CÁLCULO DA RECARGA

A estimativa da recarga foi feita mediante a técnica de marcação da unidade do solo com água tritiada.

O método de injeção de trítio para a estimativa da recarga baseia-se na suposição de que a umidade do solo se move para baixo em camadas discretas. Qualquer camada fresca de água adicionada à superfície por causa da precipitação ou irrigação irá percolar, deslocando uma mesma quantidade de água abaixo dela e assim sucessivamente, de tal forma que a última camada da zona não saturada é adicionada à água subterrânea. Este conceito de movimento da água através do solo é termalizado como Modelo de Fluxo em Pistão e foi desenvolvido por ZIMERMANN et alli. (Os modelos são discutidos no Capítulo IV).

Nesta técnica, a umidade a uma certa profundidade é marcada com água tritiada. O traçador se move juntamente com a umidade do solo devido à subsequente precipitação ou evaporação. O deslocamento do traçador é indicado pelo pico em sua concentração ou pelo centro de gravidade do perfil de trítio.

O pico pode ser alargado por causa de muitos fatores, tais como, difusão molecular, irregularidades e variações microscópicas da velocidade. O centro de gravidade do perfil e/ou centro de gravidade, corresponde à posição média da camada marcada. A distribuição teórica do trítio e o perfil esperado são indicados na Figura 6.8.

O centro de gravidade da curva do perfil de trítio pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$CG = \frac{\sum_{j=1}^n Y_j \Delta x \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n Y_j \cdot \Delta x} \quad (6.13)$$

O conteúdo de umidade da coluna de solo entre a profundidade de injeção e a de deslocamento do traçador é a média da recarga do aquíferos no intervalo de tempo entre a injeção do trítio e a coleta de amostras de solo. O cálculo da recarga, em cm, pode ser feito segundo a dedução: (DATTA, 1973) seja:

$X$  = deslocamento do pico do trítio ou centro de gravidade (cm);

$h$  = conteúdo médio de umidade do solo entre a profundidade de injeção e o pico do trítio ou centro de gravidade (a umidade é o peso da água por unidade de peso de solo seco) (%);

$D$  = densidade média da massa do solo

$$D = \frac{\text{peso de solo úmido}}{\text{volume da massa do solo}} = \frac{\text{peso de solo seco } (1+h)}{\text{volume da massa de solo}} \quad (6.14)$$

$$h = \frac{\text{peso da água}}{\text{peso do solo seco}} = \frac{\text{peso da água } (1+h)}{D \cdot \text{volume da massa de solo}} \quad (6.15)$$

$$\text{peso da água} = \frac{D \cdot h \cdot \text{volume da massa de solo}}{(1+h)} \quad (6.16)$$

$$\text{peso da água por unidade de área (recarga)} = \frac{D \cdot h \cdot X}{(1+h)} \quad (6.17)$$

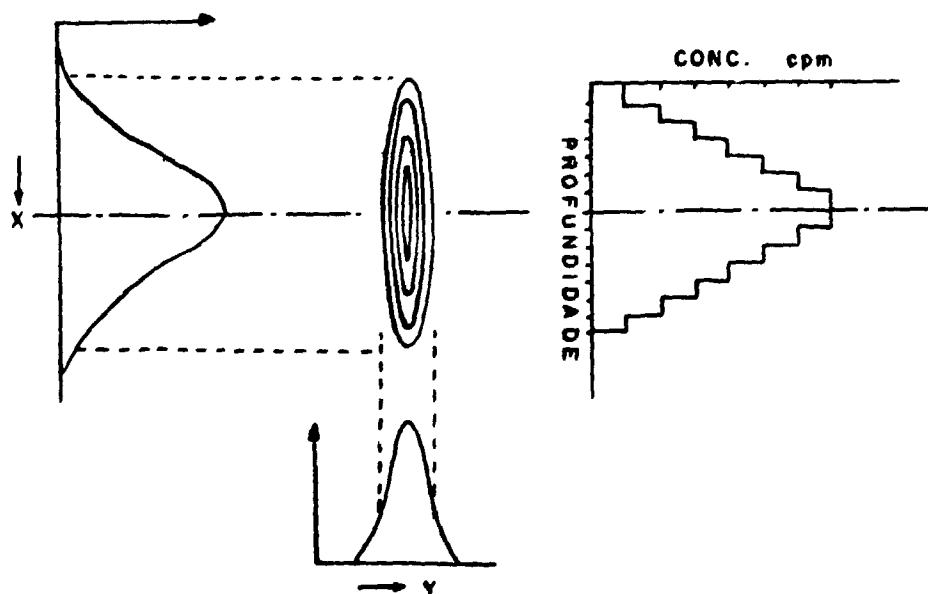


FIGURA 6.8 - Distribuição do trítio x perfil esperado

## CAPÍTULO VII

### APLICAÇÕES

O estudo da recarga e movimento da umidade do solo na zona não saturada teve como finalidade as seguintes aplicações:

#### 7.1. AValiação DE LOCAIS PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS

Uma aplicação importante da técnica de marcação da umidade do solo é na avaliação de locais para disposição de rejeitos radioativos no solo. Um armazenamento seguro é determinado pelas características geohidrológicas do solo, as quais influenciam grandemente a migração de materiais radioativos, porque estes se espalham no ambiente pela infiltração da água.

O movimento da água marcada com HTO já foi estudada no solo de Püspöszilagy, Hungria (CZANYI, 1985), com a finalidade de investigar a possibilidade de disposição de rejeitos radioativos sólidos, diretamente no solo.

Neste trabalho foi utilizada a injeção de trítio artificial para determinação da recarga em dois locais no IPEN: no antigo local e na área atual de disposição de rejeitos radioativos (sítio). Os resultados obtidos são indicados no Capítulo VIII.

## 7.2. AVALIAÇÃO DA RECARGA E UMIDADE EM ZONA SEMI-ÁRIDA

O estudo de recarga de aquíferos é extremamente importante em regiões áridas e semi-áridas, já que os reservatórios de água subterrânea são a maior fonte de fornecimento de água nestas regiões.

A técnica de maração com trítio para a determinação da recarga de aquíferos tem sido aplicada principalmente nas regiões áridas e semi-áridas na Índia, fornecendo resultados valiosos para as avaliações de recursos hídricos da região.

No nordeste brasileiro, principalmente no "Polígono das Secas", o volume, quantidade e a qualidade da água têm uma importância muito maior que em outras regiões do país tornando necessário o conhecimento dos aquíferos da região.

No Rio Grande do Norte, como parte de um programa conjunto com o IPT e o CENA de avaliação de recursos hídricos aplicando técnicas isotópicas na formação "Barreiras", foram avaliados os seguintes locais: 1) Fazenda da Pituba, 2) Rua Presidente Castelo Branco (Pedro Velho), 3) Fazenda Paquetá (Goianinha), 4) Campo Limpo, 5) Estrada para Timbó, 6) Estrada para São José do Mipibu, 7) Local próximo ao poço IPT 978/440, 8) Posto de pesquisa da Marinha e 9) Ao lado do cemitério de Extremoz.

Este trabalho faz parte de um programa maior de Estudo hidrogeológico regional detalhado do estado do Rio Grande do Norte, realizado pelo IPT, a pedido da Secretaria da Indústria e Comércio do Governo do Estado do Rio Grande do Norte.

Os resultados obtidos são indicados no Capítulo IX.

### 7.3. AVALIAÇÃO DA RECARGA E UMIDADE EM TERRENOS SUB-TROPICAIS ÚMIDOS

O número crescente de casos de poluição das águas subterrâneas em todo o mundo torna essencial o estudo da zona não saturada, pois ela é o caminho de infiltração da maioria dos poluentes da atmosfera e a locação de várias reações químicas.

Com a finalidade de estudar a infiltração da precipitação na zona não saturada foram realizadas injeções de trítio artificial em dois locais: na Estação Experimental para Estudo da Dinâmica e da Evolução da Composição Química da Água na Zona não Saturada (Viveiro - USP) e em laterita, uma alteração do dunito, localizada em Cajati - Jacupiranga, no Vale do Ribeira.

Os resultados obtidos são indicados no Capítulo X.

**CAPÍTULO VIII**  
**AValiação de Locais para Disposição de Rejeitos**  
**RADIOATIVOS**

**8.1. INTRODUÇÃO**

A disposição de rejeitos radioativos no solo tem sido usada desde o início das pesquisas nucleares, na década de quarenta. A expansão da indústria nuclear vem acreditando amplamente no enterro de rejeitos e espera-se que continue assim no futuro.

Dada a necessidade de regulamentações, com o avanço da tecnologia nuclear as agências de proteção radiológica iniciaram um amplo campo de pesquisa neste área, desde 1972. (MEYER, 1981). Várias foram as agências que desenvolveram critérios para o selecionamento de sítios, entre elas:

- Environmental Protection Agency - EPA - SSC (PAPADOULOS, 1975),
- United States Geological Survey - USGS (EPA, 1974),
- Western Federal Region Council (EPA, 1978)
- International Atomic Energy Agency - IAEA (SS nº 53, 1981),
- Nuclear Regulatory Commission - RNC (NWTs, 1981).

Por causa do programa nuclear brasileiro, que envolve o Ciclo do Combustível, há um grande volume de rejeitos previsto para os próximos anos, o que exige o desenvolvimento de tecnologia para seleção e avaliação de sítios provisórios e permanentes para a disposição de rejeitos no Brasil (MARCELINO, 1983), para que não haja risco de haver contaminação ina-

ceitável ao meio ambiente e ao homem.

## 8.2. TIPOS E ACONDICIONAMENTO DE RESÍDUOS RADIOATIVOS

O resíduo radioativo de várias partes do ciclo do combustível nuclear apresenta uma ampla variedade de formas físicas e químicas e uma grande variação de atividade específica.

Em quantidades menores, os resíduos radioativos vêm da produção de radioisótopos e de seu uso na medicina, indústria e pesquisa. As considerações sobre estes resíduos são análogas às de combustíveis nucleares. (SAFETY SERIES nº 54,1981).

As características gerais de resíduos radioativos em relação à disposição são indicadas na Tabela 8.1.

## 8.3. SELEÇÃO DE SÍTIOS

Havendo necessidade da existência de um repositório, deve-se selecionar um sítio baseando-se em três princípios. (SAFETY SERIES nº 53, 1981)

a) O repositório deve estar localizado em terras do governo para garantir um controle total de sua propriedade.

b) A seleção do sítio deve ser feita com a ajuda de técnicos de diferentes especialidades, incluindo geologia, proteção radiológica, engenharia e administração da terra.

c) Uma agência deve ter a responsabilidade máxima pela organização e seleção do sítio. Entretanto, freqüentemente pode ser necessário um grupo interdisciplinar para executar este trabalho por causa do grande número de interesses, especialidades técnicas e responsabilidades envolvidas.

Apesar dos inúmeros critérios e avaliações existentes é de concordância geral assegurar que o local suas opera-

ções e possíveis acidentes, não provoquem contaminações, atuais ou futuras que ultrapassem os limites máximos permissíveis (ICRP nº 26, 1977) determinados para a segurança do homem e do meio ambiente.

TABELA 8.1. Características gerais das categorias de resíduos radioativos em relação à disposição (SS nº 54, 1981)

Categoria do rejeito	Características importantes*
1. Alto nível, meia vida longa	alto $\beta/\gamma$ $\alpha$ significativa alta toxicidade alto calor gerado
2 Nível intermediário meia vida longa	$\beta / \gamma$ intermediário $\alpha$ significativa radiotoxicidade intermediária baixo calor gerado
3. Nível baixo, meia vida longa	$\beta / \gamma$ baixo $\alpha$ significativa radiotox. baixa/intermediária Geração de calor insignificante
4. Nível intermediário meia vida curta	$\beta / \gamma$ intermediário $\alpha$ insignificante radiotoxicidade intermediária baixo calor gerado
5. Nível baixo, meia vida curta	baixo $\beta/\gamma$ $\alpha$ insignificante baixa radiotoxicidade calor gerado insignificante

\* As características são qualitativas e podem variar em alguns casos. "Insignificante" indica que a característica geralmente pode ser ignorada para propósito de disposição.

O NRC (MORGAN, 1956) estabelece como objetivos de operação, o seguinte:

1) Proteger a saúde e segurança do público, trabalhadores e do meio ambiente, durante um longo período (300 a 500 anos);

2) Proteger o intruso inadvertido em potencial, no projeto e nas operações de um repositório, incluindo barreiras eficientes;

3) Assegurar a saúde e a segurança das pessoas durante o período de operação (30 anos) e efetuar o fechamento apropriado do sítio ao final deste período;

4) Minimizar a necessidade de manutenção e inspeção por um longo período, assegurando a estabilidade do sítio após o seu fechamento.

Um dos princípios fundamentais para a disposição de rejeitos no solo é que as características hidrogeológicas naturais do sítio sejam suficientes para confinar os radionuclídeos até que eles decaiam a níveis aceitáveis.

No Brasil a disposição de rejeitos é realizada segundo as normas internacionais de radioproteção.

#### 8.4. CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS

As considerações mais importantes são a disponibilidade, localização e movimento da água, as propriedades do meio e processos que possam romper o repositório, introduzir água no rejeito, expor o resíduo, ou de alguma forma retorná-lo ao meio ambiente e ao homem. A Tabela 8.2 mostra essas considerações em ordem de importância relativa (SAFETY SERIES nº 53, 1981).

As águas subterrâneas em circulação constituem a principal ameaça real para o armazenamento de rejeitos coloca

TABELA 8.2. Considerações hidrológicas na seleção de sítios  
(SS nº 53, 1981)

<u>Revisão da literatura/mapeamento</u>	
Geologia	
Topografia	
Precipitação	
Evaporação/evapotranspiração	
Água superficial mais próxima	
Ponto de descarga ou de uso da água mais próximo	
<u>Reconhecimento do campo</u>	
<u>Preliminar</u>	<u>Intermediário</u>
Tipo do meio para disposição	- Falhas e juntas
Direção preferencial do vento	- Local de disposição
Relevo	- Capacidade de sorção
Altitude	- Espessura
Inundações	- Propriedades de Engenharia
Terremotos	- Permeabilidade
Erosão	- Porosidade efetiva
Profundidade do nível da água	- Estrutura
Profundidade da rocha fraturada	- Gradiente hidráulico
	- Histórico hidrológico
	- Complexidade hidrológica
	- Fornecimento adequado da água
	- Monitoração
	- Balanço hídrico
<u>Análise detalhada do sítio</u>	
Distribuição tridimensional	
Meio de depósito e geologia do local (incluindo aquífero confinado)	
química da água	
estratigrafia	
Capacidade de troca iônica	
conteúdo de umidade da zona não saturada	
tensão do solo úmido	
transmissibilidade	
flutuação natural do nível d'água	
dados sobre as vazões dos rios mais próximos, incluindo os subterrâneos	
Mapeamento do nível da água	
Medidas possíveis para a manipulação da água subterrânea	

dos em formações geológicas. Então, a natureza e as características das formações aquíferas próximas ao repositório, bem como as rochas hospedeiras, são elementos críticos para a avaliação de locais.

Em muitas áreas, principalmente em zonas áridas, a água subterrânea é extremamente importante já que ela constitui a principal fonte de água para as municipalidades, indústrias e agricultura. Assim, qualquer atitude que possa acarretar a contaminação dessas águas poderá, naturalmente, ser recebida desfavoravelmente pelo público.

#### 8.5. ÁREAS DE ESTUDOS

As duas áreas de estudo situam-se na Bacia de São Paulo, na cidade de São Paulo, Campus da USP - IPEN - CNEN/SP.

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), está localizado na cidade Universitária, Butantã, que se situa na região oeste da cidade de São Paulo, marginalizada pelo rio Pinheiros.

O bairro do Jaguaré, Cidade Universitária e áreas limitrofes do Butantã apresentam basicamente a seguinte coluna estratigráfica (RELATÓRIO HSE-1, 1972).

a) Sedimentos aluvionares, quaternários geralmente argilosos com variações de até 10 m de profundidade.

b) Sedimentos da Bacia de São Paulo, terciário, fluvio-lacustres e fluviais. A espessura varia entre 40 a 150m, tornando-se menos espessa movendo-se em direção a oeste.

c) Embasamento cristalino, pré-cambriano, gnaisses, ocorrência de fendilamentos e fraturas entre 70 a 120 e 250m de profundidade.

O lençol freático das camadas sedimentares provenientes das infiltrações pluviométricas, situa-se entre 10m a 15m

de profundidade.

O clima da região é tropical temperado com um período seco no inverno e um período de chuva no verão com uma umidade relativa do ar de aproximadamente 80% e temperatura média de 19°C.

## 8.6. ANTIGO LOCAL DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DO IPEN

### 8.6.1. Dados gerais sobre a área de estudo

O antigo local de disposição de rejeitos radioativos do IPEN está situado na parte ocidental do Instituto e está numa altitude entre 735m e 750m. Este repositório é do tipo sub-superficial (vales ou trincheiras).

A topografia do terreno tem um declive para noroeste em direção ao curso do velho rio Jaguaré que está a aproximadamente 450m de distância do local de depósito. Este local é caracterizado por um solo de aterro. O nível da água subterrânea está a aproximadamente 10m - 15m da superfície.

O solo é destituído de vegetação significativa e a área local sofre erosão após um período de chuva pesada.

### 8.6.2. Trabalho experimental

Neste local, o trítio, na forma de água tritiada, de concentração de aproximadamente  $3,7 \times 10^4$  Bq/ml ( $1 \mu\text{Ci/ml}$ ), foi injetado a 70cm de profundidade. Foram realizados 5 (cinco) conjuntos de injeção, distanciados 1m um do outro, cada conjunto contendo cinco pontos a uma distância de 10cm cada um, em forma de cruz. Em cada buraco foi injetado vagarosamente, 2,5ml de água tritiada totalizando  $46,25 \times 10^4$  Bq ( $12,5 \mu\text{Ci}$ ) em cada con-

junto.

A injeção de trítio foi feita em 24 de maio de 1979 e as amostragens foram realizadas nas datas indicadas na Tabela 8.3.

A amostragem do solo foi feita com um trado manual de 3 polegadas de diâmetro.

TABELA 8.3. Datas das amostragens de solo

Número do conjunto	Data da amostragem	tempo após a injeção
1	24/07/79	2 meses
2	24/08/79	3 meses
3	28/11/79	6 meses
4	25/02/80	9 meses
5	28/05/80	12 meses

A densidade global do solo foi medida no próprio campo, pesando-se todo o solo retirado e enchendo-se o furo com quantidades conhecidas de areia de granulometria fina, para determinação do volume.

As Figuras 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5 mostram os perfis de trítio e de umidade respectivamente para 2, 3, 6, 9 e 12 meses após a injeção.

A partir dos perfis de trítio e de umidade, calculou-se a recarga. Os resultados obtidos para densidade, centro de gravidade e recarga são indicados na Tabela 8.4.

A Figura 8.6 mostra o movimento da umidade do solo em relação à precipitação e à evaporação no período estudado.

Considerando-se que o nível d'água está a  $\approx 10$ m de profundidade e o deslocamento médio do trítio foi de 79cm em um ano, pode-se considerar que, em média, a precipitação leva

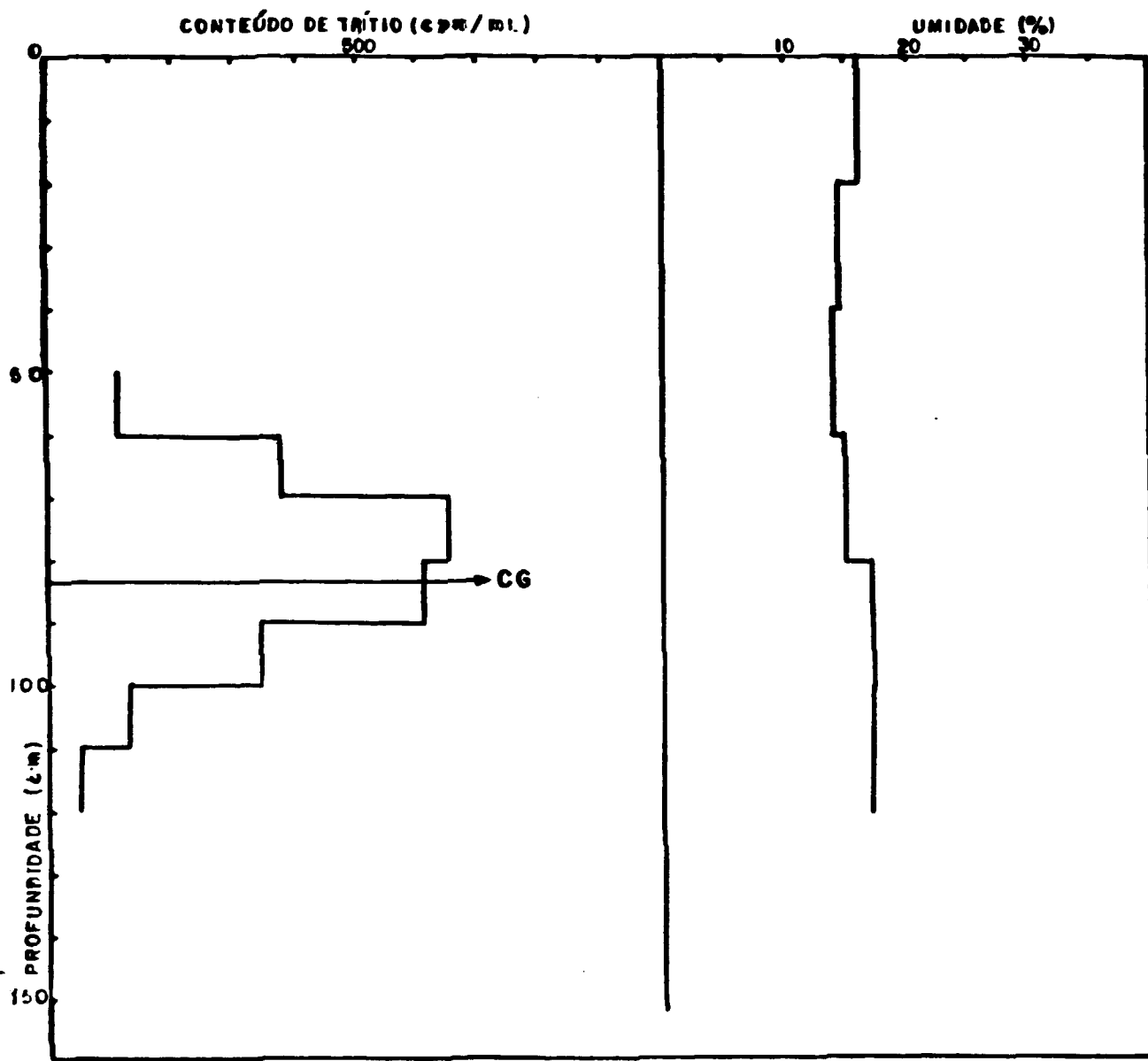


FIGURA 8.1. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 2 meses - Data da amostragem: 24/07/79

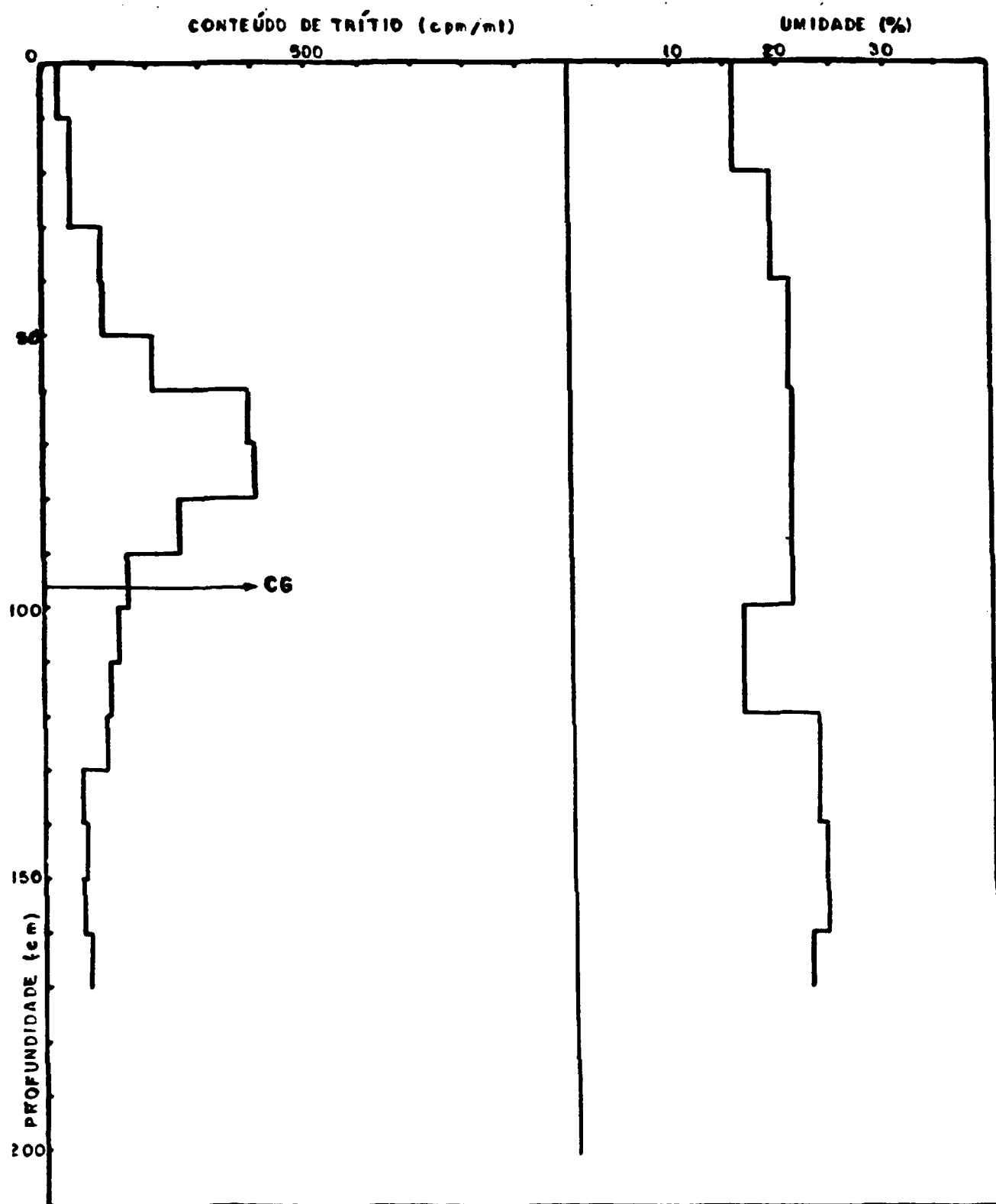


FIGURA 8.2. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 3 meses

Data da amostragem: 24/08/79

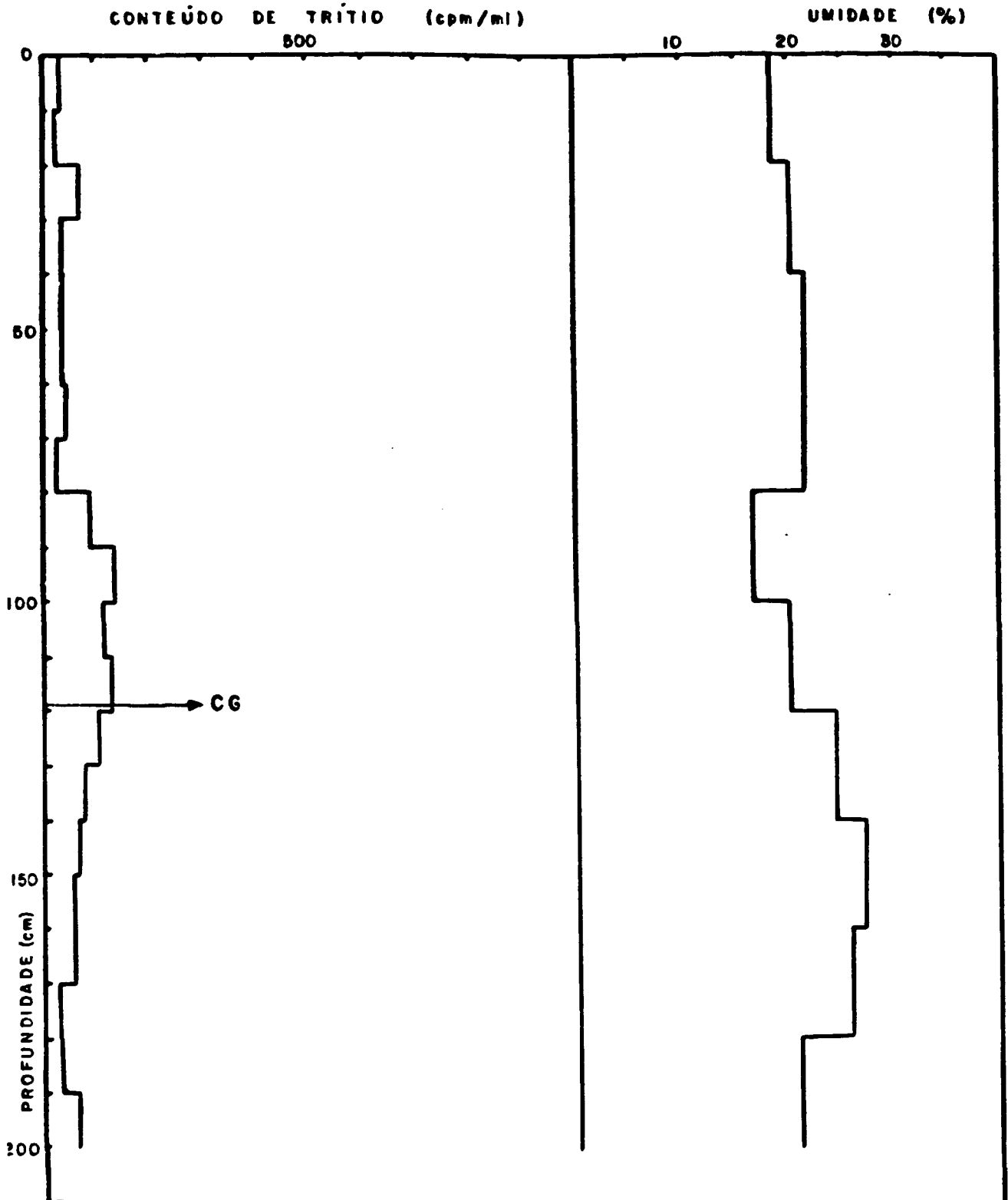


FIGURA 8.3. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 6 meses

Data da Amostragem: 28/11/79

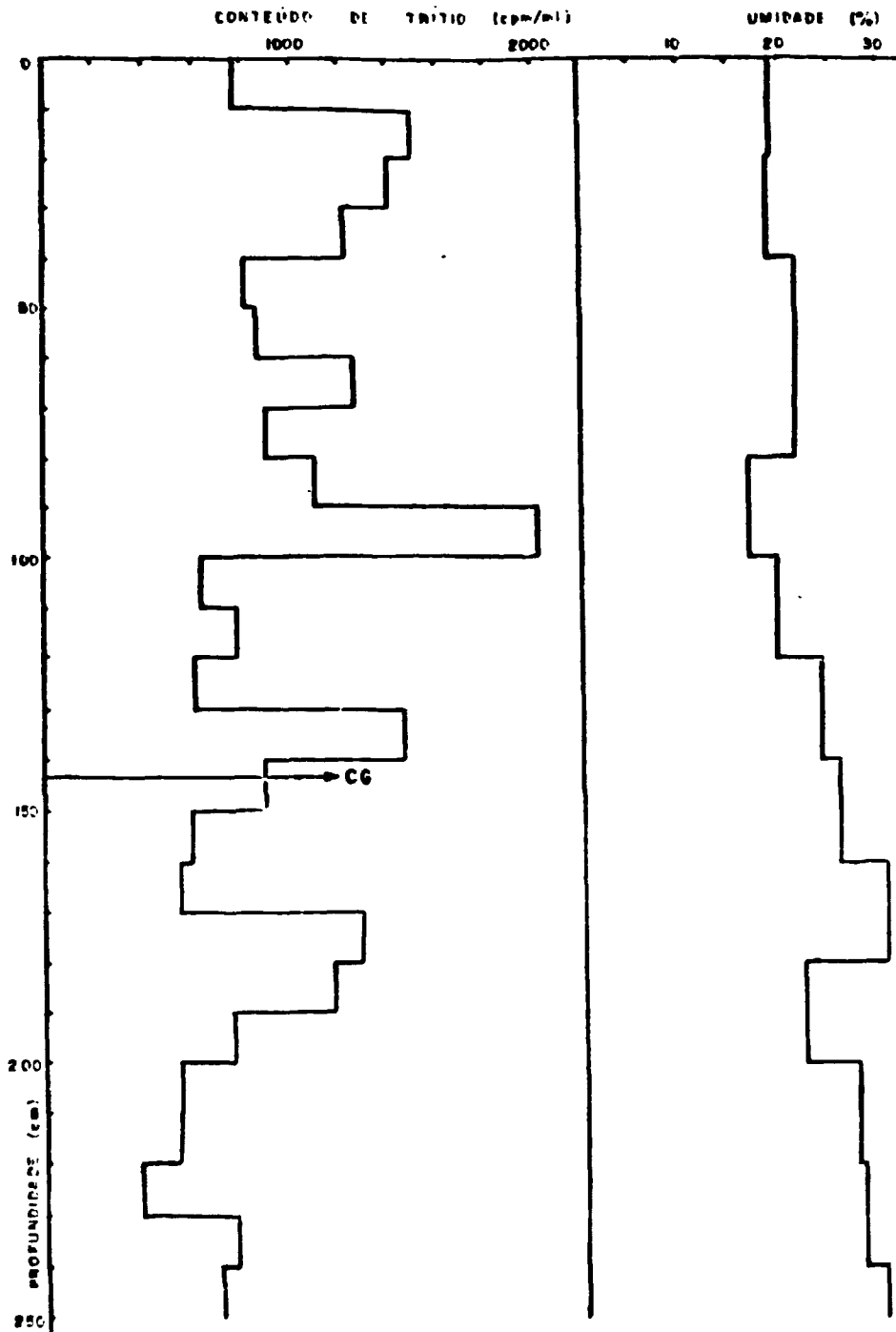


FIGURA 8.4. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 9 meses

Data de amostragem: 25/02/80

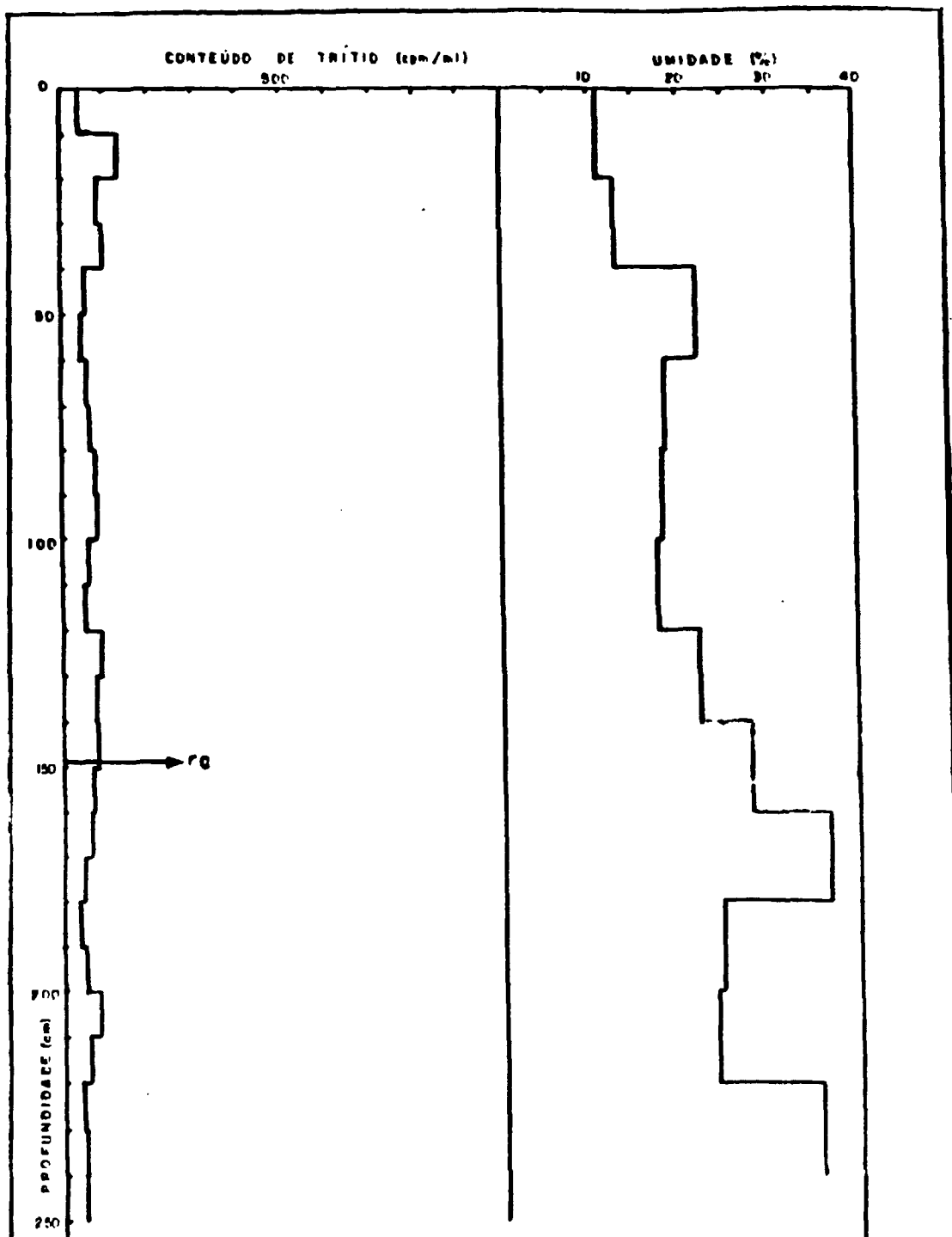


FIGURA 8.5. Conteúdo de trítio e perfil de umidade após 12 meses

Data de amostragem: 28/05/80

TABELA 8.4. Dados do movimento da umidade do solo e recarga do aquífero para o antigo local de depósito de resíduo radioativo no IPEN (maio/79 - maio/80)  
Data da injeção do trítio: 24/05/79

Data da Amostragem	Deslocamento do trítio (cm)	Centro de Gravidade (CG)	Densidade total do solo (g/cm <sup>3</sup> )	Conteúdo de umidade médio do solo % em peso (70cm - CG)	Recarga (cm)	Precipit. (mm) (CTH - 1979 1980)	taxa de infiltração	evaporação (mm)
24/07/79	13,5	83,5	1,72	15,9	3,19	143,5	22,2%	252,6
24/08/79	26,0	96,0	1,73	21,0	7,81	213,8	36,5%	351,4
28/11/79	49,0	119,0	1,92	19,3	15,22	681,8	22,3%	690,4
25/02/80	73,5	143,5	1,76	21,4	22,79	1304,9	17,5%	1101,1
28/05/80	79,0	149,0	1,73	20,9	23,59	1549,5	15,2	1340,7

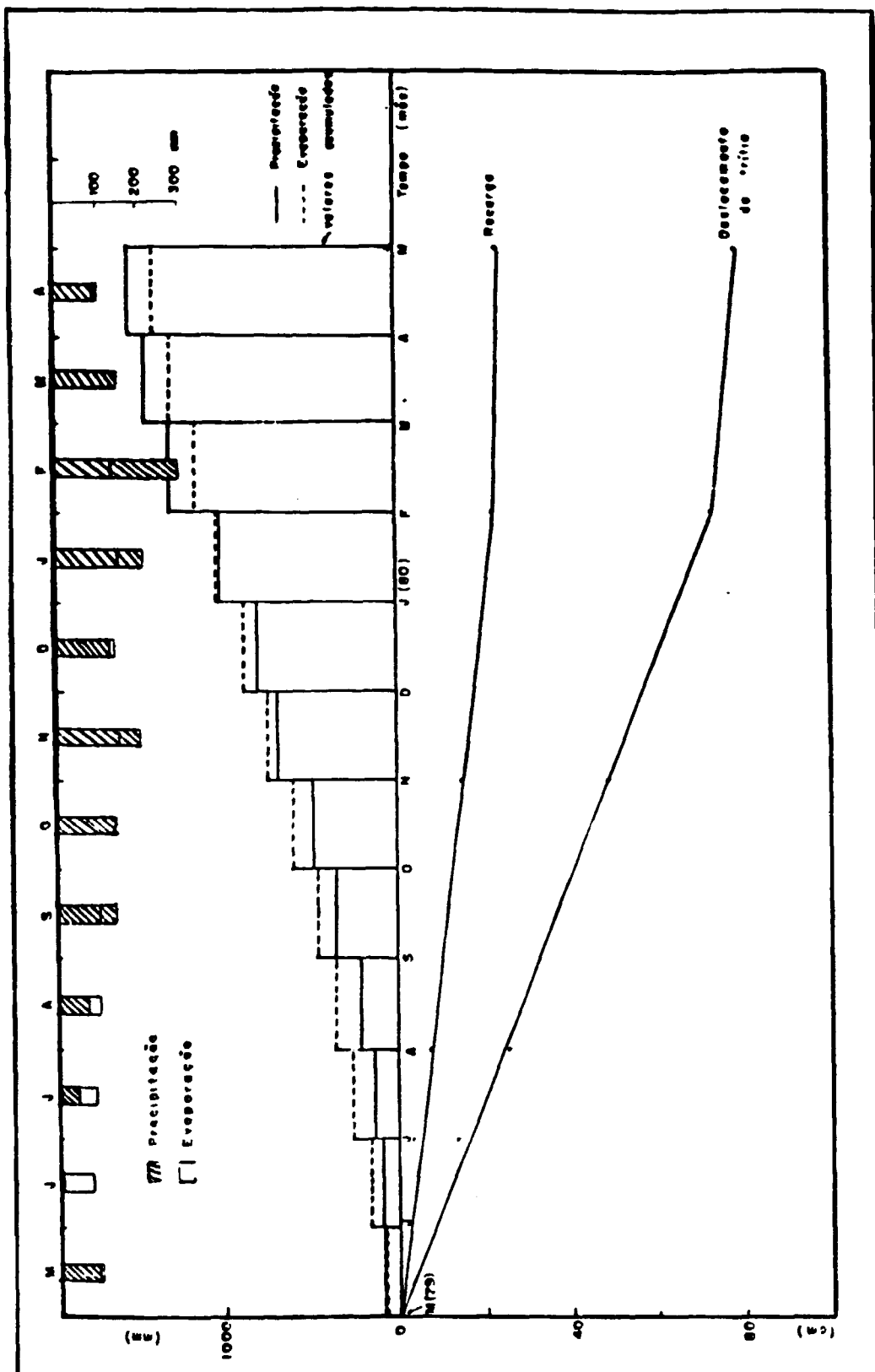


FIGURA 8.6. Dados do movimento da umidade do solo em relação à precipitação e à evaporação

### 8.6.3. Discussão dos resultados

O movimento da umidade do solo e modelo de recarga são controlados pelos seguintes fatores:

- frequência e intensidade de chuva,
- evaporação/evapotranspiração,
- tipo de solo e sua permeabilidade.

Os meses de maior intensidade de chuva são janeiro e fevereiro. Estes são os meses onde a precipitação compensa a deficiência de umidade do solo causada pela evaporação/evapotranspiração.

A injeção de trítio (a 70cm de profundidade) foi realizada em maio. Este é o período onde o excesso de umidade do solo, estabelecido em janeiro e fevereiro, começa a passar por gravidade, a profundidade de 70cm. Isto explica a taxa relativamente mais rápida do movimento da umidade do solo (isto é, deslocamento do trítio de maio a fevereiro).

Depois de fevereiro, a evaporação começa a competir com a precipitação e finalmente a supera nos meses de junho, julho e agosto. Em junho, começa a crescer a deficiência de umidade do solo e o fluxo de umidade das camadas mais superficiais para as camadas mais profundas fica mais lento podendo parar ou mesmo inverter a direção dependendo da profundidade e gradiente de umidade.

Isto pode explicar também o pequeno aumento nos valores encontrados para recarga de fevereiro a maio de 1980.

A superfície do solo na área de investigação consiste de areia e argila. As camadas de 80 a 110cm de profundidade são mais arenosas e por isso mais permeáveis. A ocorrência de argila é predominante no intervalo de 140cm a 190cm de profundidade. Abaixo disso encontra-se uma camada comparativamente mais permeável de areia e argila.

A taxa de infiltração da precipitação neste local é de aproximadamente 15% da precipitação (1549,5mm).

Este sítio, considerado tecnicamente seguro, foi utilizado até 1978, quando teve sua capacidade de armazenamento praticamente esgotada, havendo portanto a necessidade de um outro repositório.

Para construção do novo sítio, a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, optou por um investimento maior em favor da segurança, sendo projetado portanto um repositório do tipo superficial, para estocagem provisória do rejeito radioativo.

## 8.7. SÍTIO ATUAL DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS DO IPEN

### 8.7.1. Dados gerais sobre a área de estudo

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN - CNEN/SP) iniciou em 1981 a construção de uma pequena instalação para estocar e prensar os rejeitos radioativos sólidos de baixa a média atividade gerados no instituto.

A área do local é de  $1500\text{m}^2$ , com 30m de largura e 50m de comprimento. Contém uma área coberta de aproximadamente  $900\text{m}^2$ , onde está instalada uma prensa (10t) e uma área destinada à construção de 12 plataformas de concreto de  $27\text{m}^2$  cada uma. O local é totalmente cercado com telas de arame farpado de 2m de altura (MARCELINO, 1983).

O sítio está localizado ao lado do Departamento de Proteção Radiológica (NP) do IPEN a aproximadamente 1860m do rio Pinheiros (Figura 8.7, MARCELINO, 1983). O sítio encontra-se a uma altitude cerca de 778m, numa encosta de colina onde está assentado o instituto. Esta e outras colinas delineiam o terreno de várzea típico da região com altitudes máximas que ra

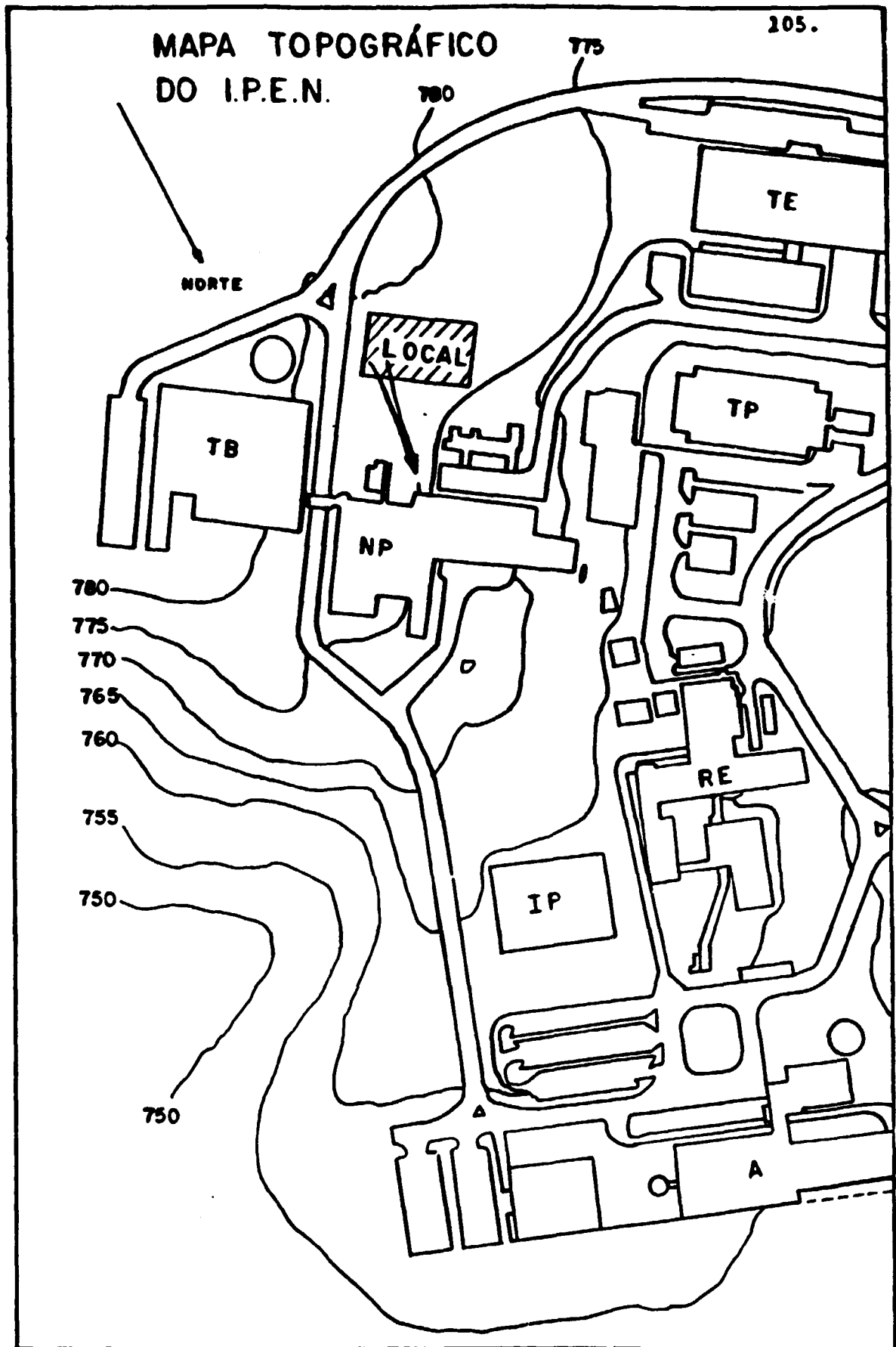


FIGURA 8.7. Localização do sítio para disposição de rejeitos radioativos (MARCELINO, 1963)

ramente ultrapassam 800m.

### 8.7.2. Trabalho experimental

Neste sítio foi feita uma injeção de trítio artificial em 26/08/81 a 70cm de profundidade. Foram feitos cinco conjuntos de injeção cada um contendo cinco pontos em forma de cruz. Cada conjunto a 1m de distância um do outro. A injeção foi feita em linha reta paralela à cerca do sítio. Marcadores foram colocados no local para futura identificação.

A concentração da água tritiada foi de  $3,7 \times 10^4$  Bq/ml ( $1 \mu\text{Ci/ml}$ ). Em cada ponto de injeção foi introduzido 2,5ml de traçador, totalizando  $46,25 \times 10^4$  Bq ( $12,5 \mu\text{Ci}$ ) em cada conjunto de injeção.

Foram feitas amostragens 3, 6, 9 e 12 meses após a injeção totalizando 158 amostras analisadas.

As amostragens foram realizadas com um trado manual de 3" de diâmetro. As amostras de solo foram colocadas em frascos bem tampados e levados ao laboratório para determinação do conteúdo de trítio e de umidade.

As Figuras 8.8, 8.9, 8.10 e 8.11 mostram o perfil de trítio e de umidade após 3, 6, 9 e 12 meses após a injeção, respectivamente. Do perfil de trítio, calculou-se o centro de gravidade da curva.

A densidade média do solo foi medida no próprio local. Todo o solo retirado foi pesado e o buraco foi preenchido com areia de granulação fina para determinação do volume.

Finalmente, calculou-se a recarga do aquífero, sendo esta de 63,5cm para um ciclo de chuva.

A Figura 8.12 mostra a análise de sondagem do solo do local (IPT, 1985).

A Tabela 8.5 apresenta os resultados obtidos para o

centro de gravidade, densidade e recarga e a Figura 8.13 mostra o deslocamento do trítio e a recarga para o período de um ano.

O deslocamento do trítio foi de 227cm em um ano, considerando-se que o nível d'água está  $\approx 10$ m de profundidade, a água da chuva deverá demorar  $\approx 4,4$  anos para alcançar o aquífero.

### 8.7.3. Discussão dos resultados

Durante o período de agosto de 1981 a agosto de 1982 a infiltração da chuva atingiu aproximadamente 300cm, o que representa uma recarga da água subterrânea da ordem de 64cm, neste local.

Os dados da amostragem após 6 meses da injeção não são confiáveis por problemas de contaminação acidental do laboratório. Mesmo assim, os dados intermediários (3, 6 e 7 meses após a injeção) não são muito importantes em termos de análise final da avaliação do local. O último resultado que corresponde a um ano, isto, um ciclo de chuva, é o mais significativo.

A injeção de trítio foi realizada em agosto, praticamente no final do inverno, correspondente ao período seco, com a evaporação muito maior que a precipitação, onde o solo deve estar abaixo de sua capacidade de campo.

Como pode ser visto pela Figura 8.12, o solo é argiloso nas camadas superiores e mais arenoso a partir de 2,45m de profundidade. O centro de gravidade do perfil de trítio após nove meses da injeção foi de aproximadamente 230cm e após um ano o centro de gravidade foi de aproximadamente 300cm. Nota-se que o trítio alcançando a camada arenosa, infiltrou-se mais rapidamente.

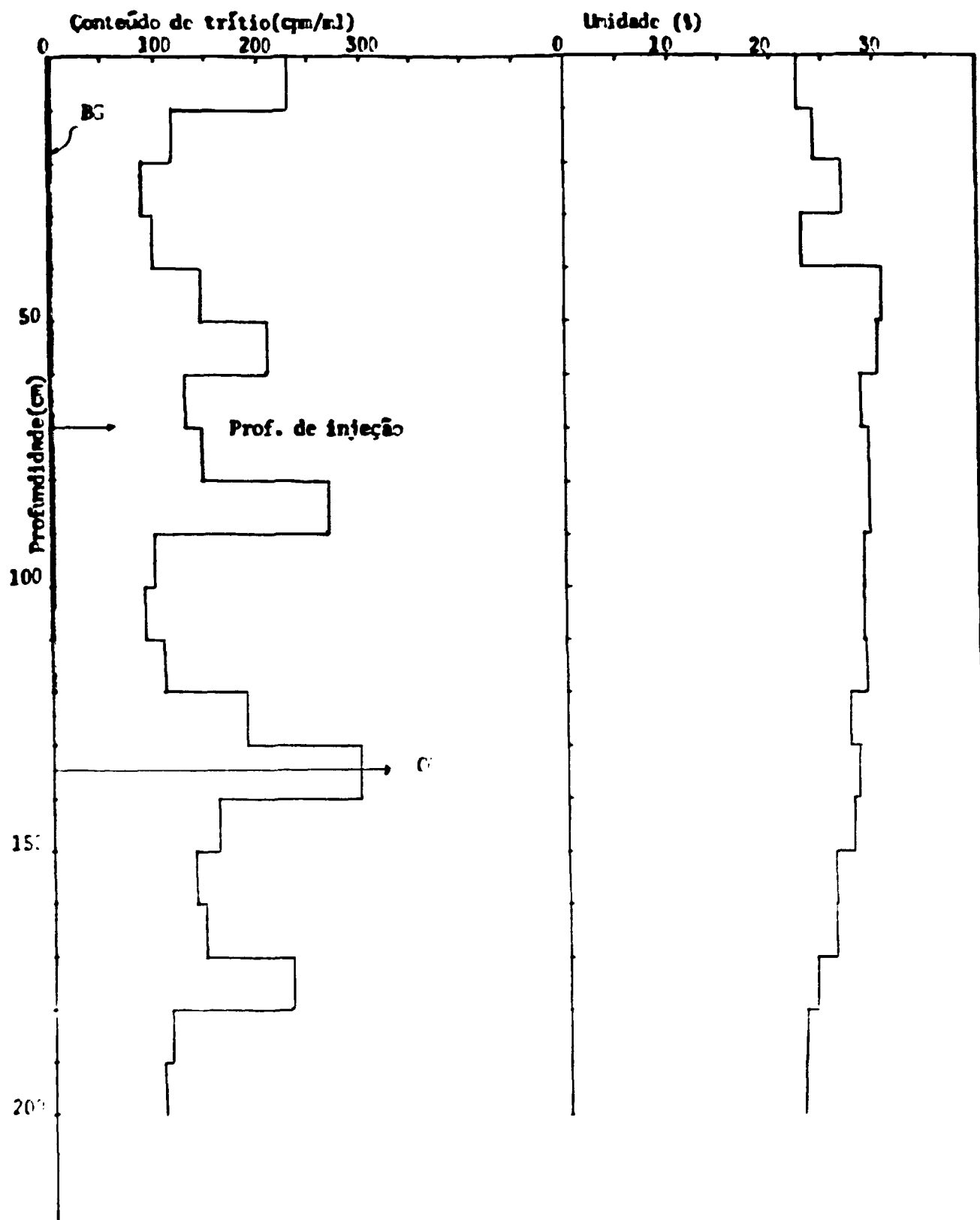


FIGURA 8.8. Perfil do trítio e da umidade após três (3) meses da injeção

Data da amostragem: 30/11/81

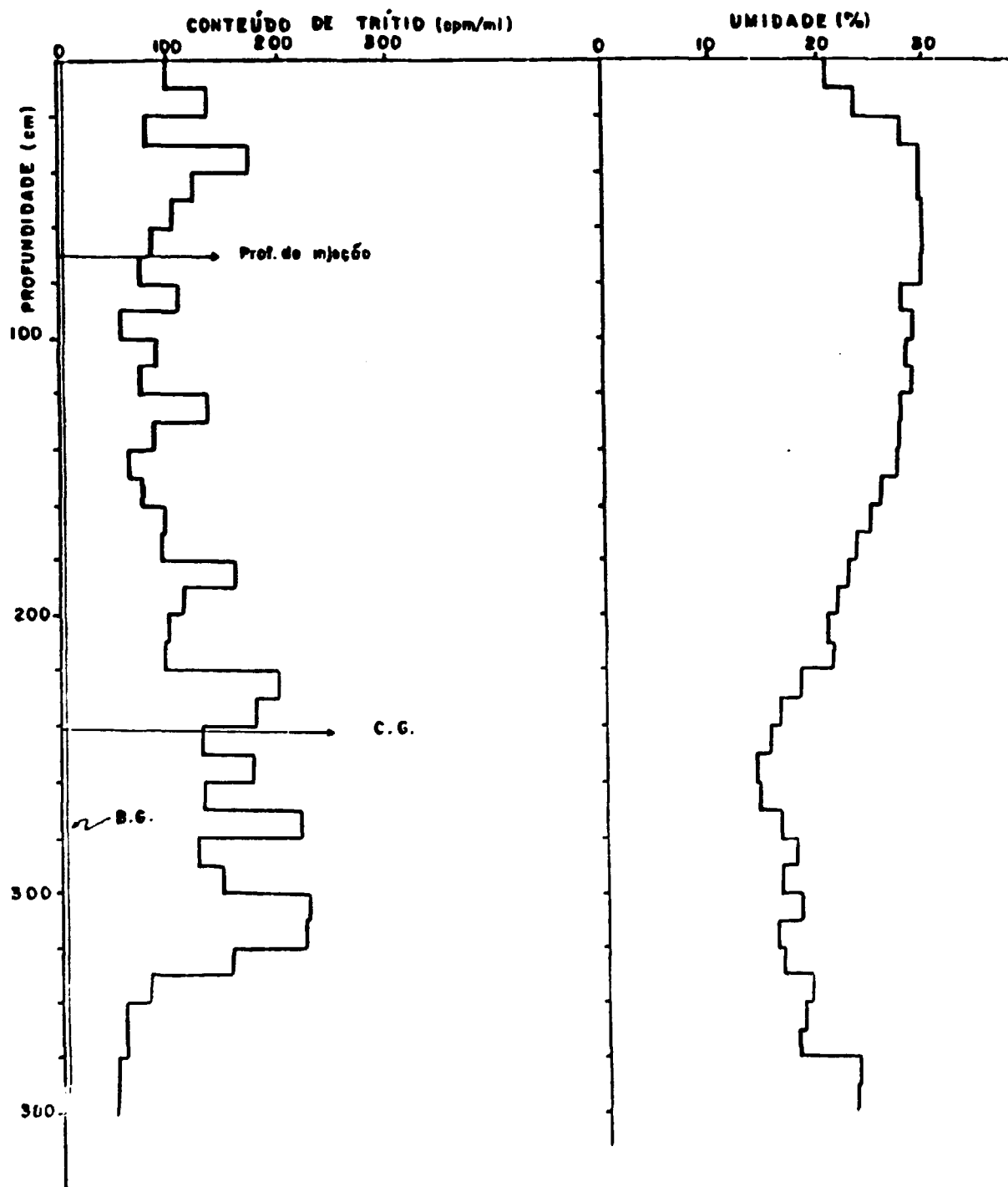


FIGURA 8.9. Perfil do trítio e da umidade após (6) seis meses da injeção

Data da injeção: 26/06/81

Data da amostragem: 03/03/82

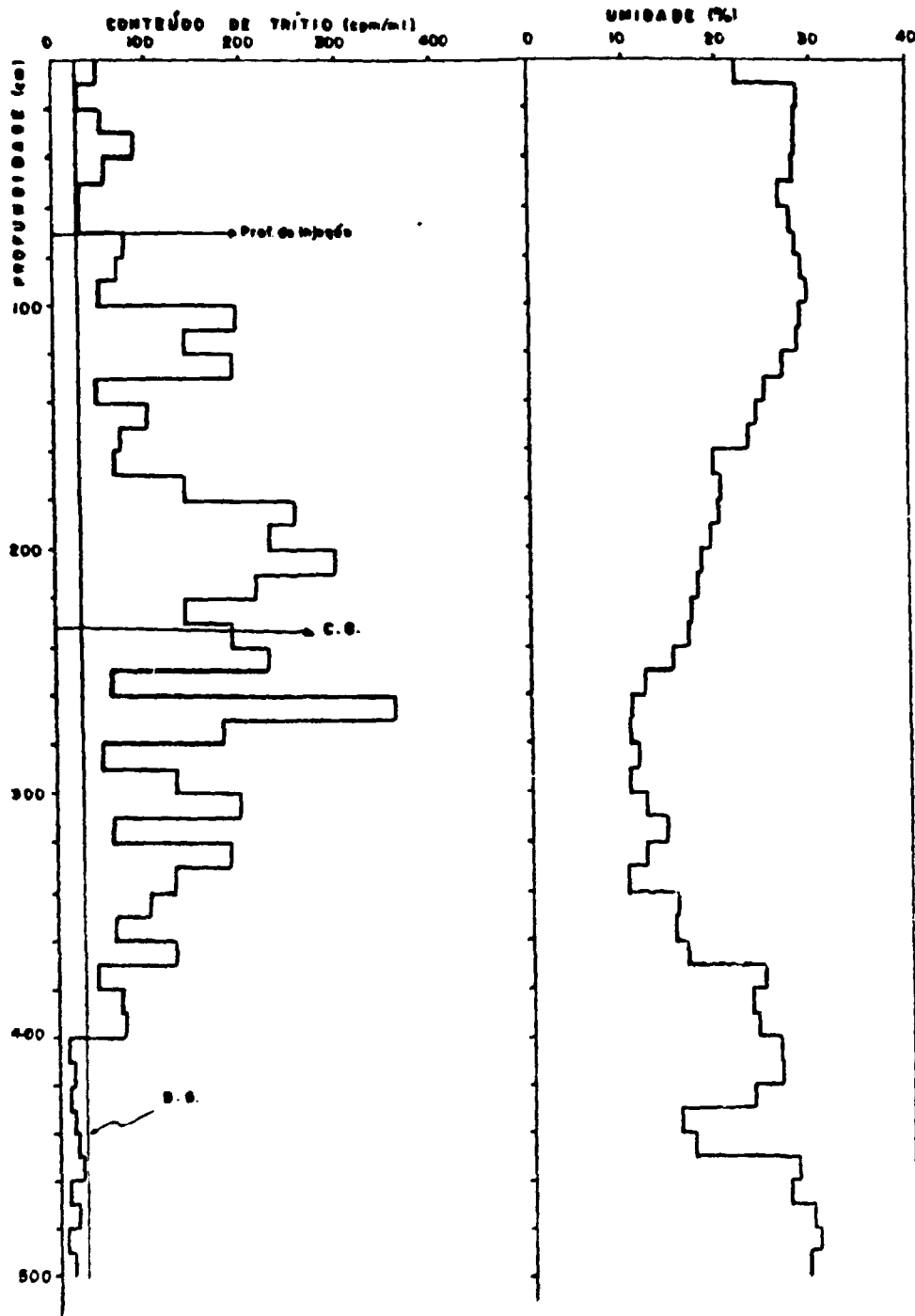


FIGURA 8.10. Perfil de trítio e de umidade após 9 (nove) meses da injeção

Data da injeção: 08/06/81

Data da amostragem: 08/07/82

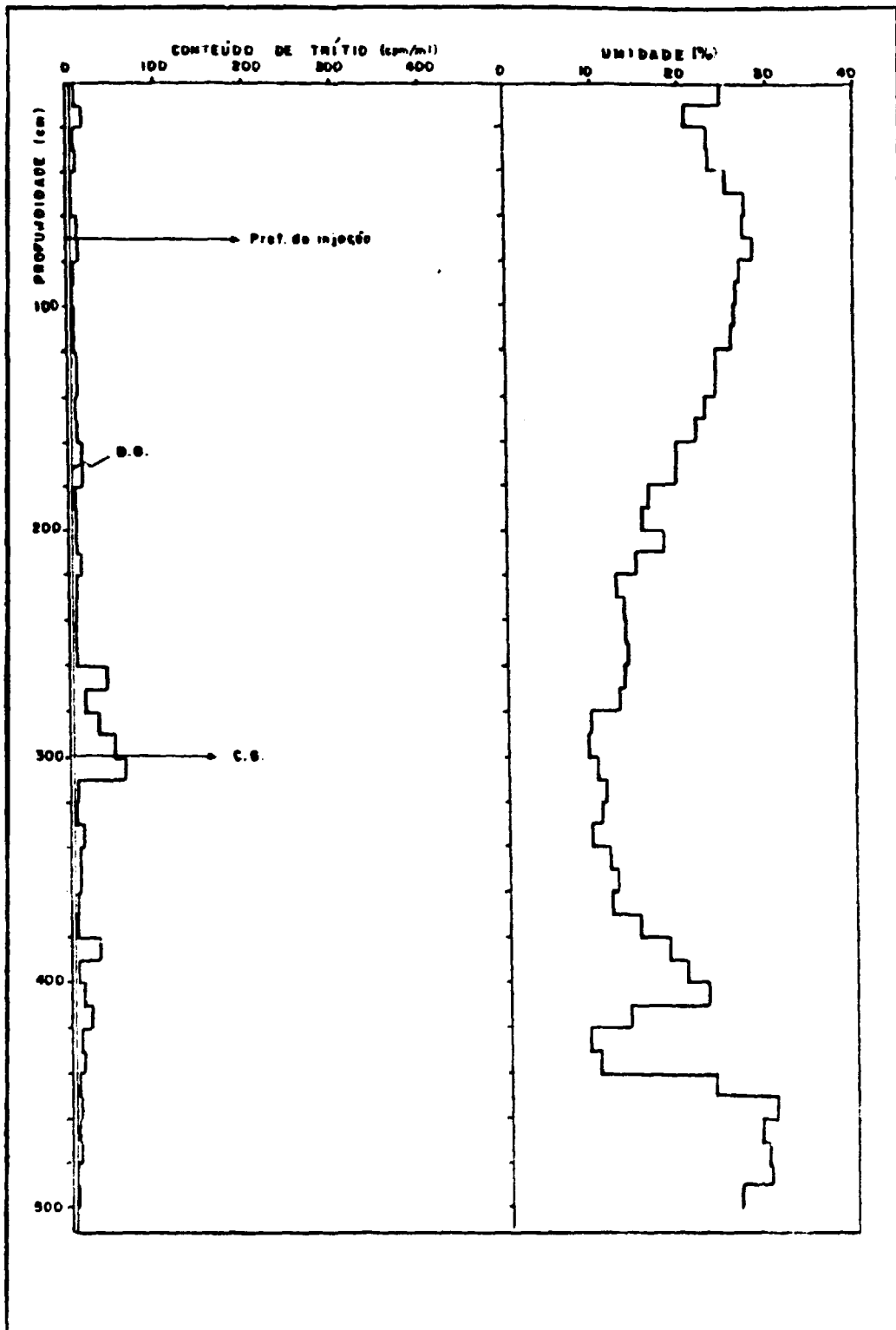


FIGURA 8.11. Perfil de trítio e de umidade após 12 (doze) meses da injeção

Data da injeção: 26/08/81

Data da amostragem: 27/08/82

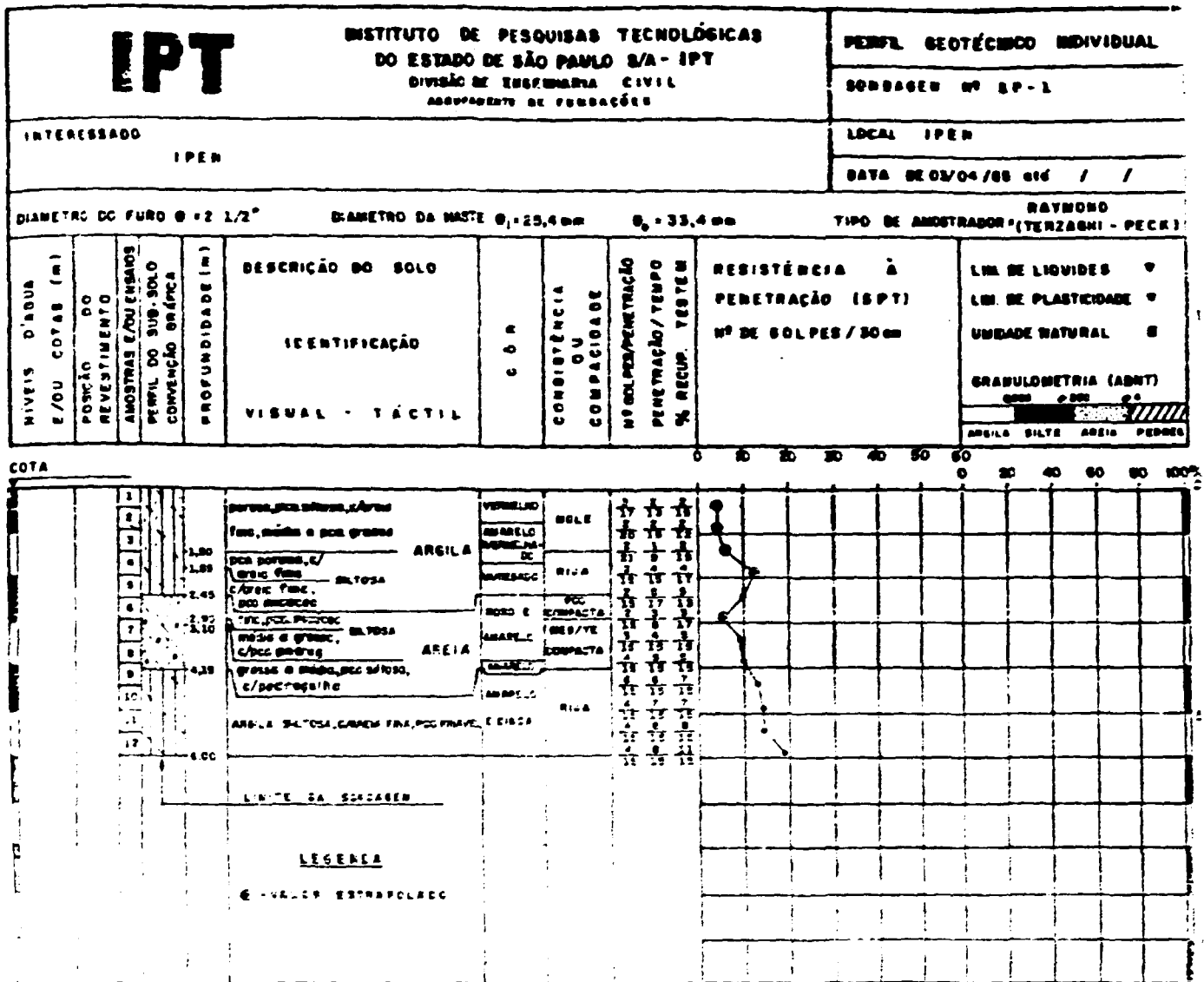


FIGURA 8.12. Análise de sondagem (IPT, 1985)

TABELA 8.5. Dados do movimento da umidade do solo e da recarga após 3, 6, 9 e 12 meses

Data da injeção: 26/08/81

Tempo de injeção	Tempo após a injeção (meses)	Data da amostragem	Centro de gravidade do perfil do trítio (CG) do (cm)*	Deslocamento x (cm)	Conteúdo de umidade (por cento de injeção (CG) % em peso)	Densidade global do solo D (g/cm <sup>3</sup> )	Recarga (cm)	Precipitação mínima (mm) (CTH, 1981, 1982)	Evaporação (mm) (CTH, 1981, 1982)	Taxa de infiltração
1	3	30/11/81	134,9	64,9	28,67	1,42	20,5	351,4	388,8	58,3
2	6	03/03/82	241,2	171,2	23,62	1,78	58,2	1039,5	806,3	56,0
3	9	03/06/82	232,8	162,8	22,80	1,78	53,8	1292,0	1078,2	41,6
4	12	27/08/82	297,1	227,1	18,65	1,78	63,5	1626,4	1321,2	39,2

\*Calculado a partir da profundidade da injeção (70 cm)

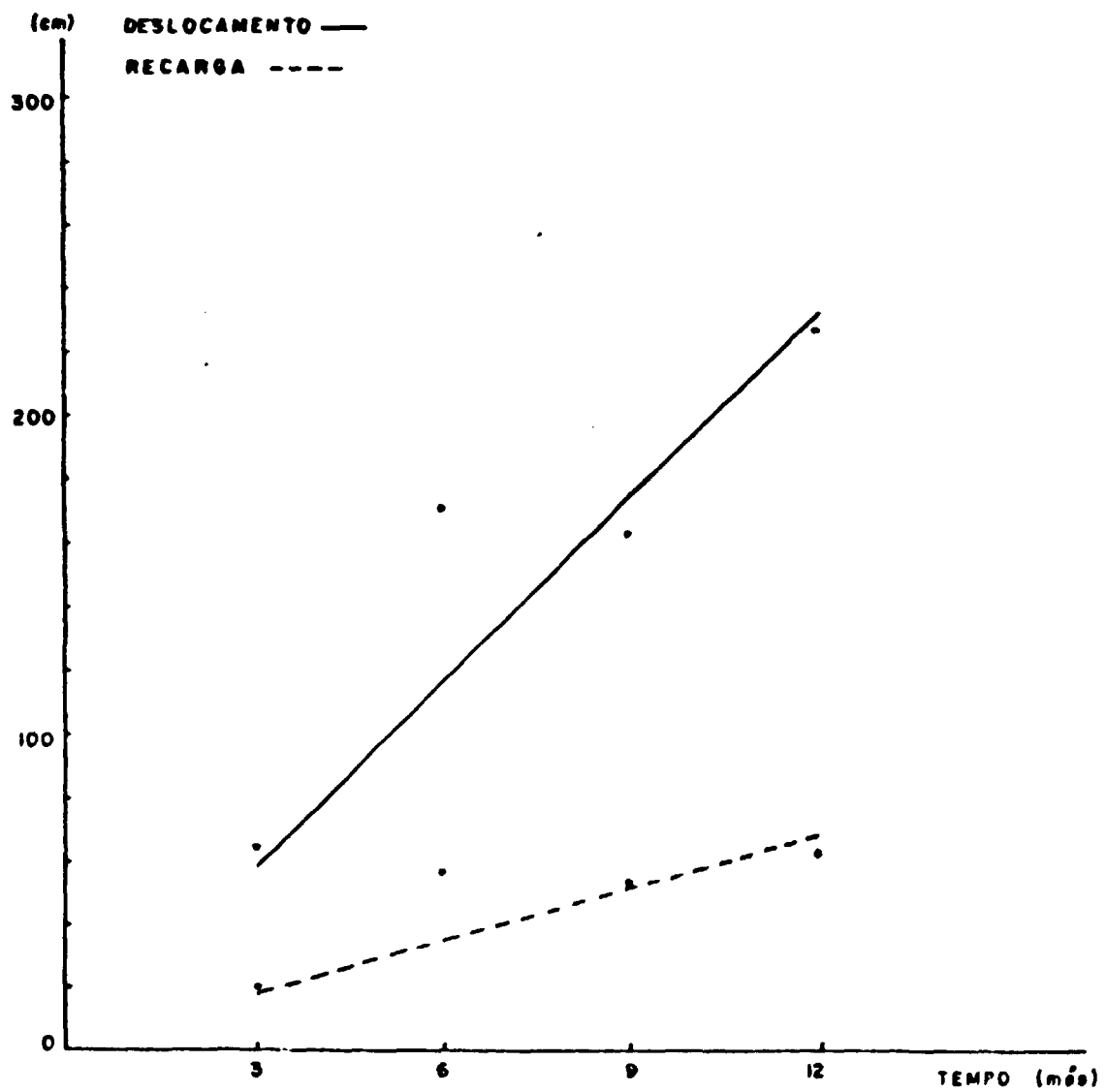


FIGURA 8.13. Deslocamento do trítio e recarga da água subterrânea durante o período de um ano

Esta camada argilosa inicial, pode reter uma contaminação acidental por alguns anos. A camada arenosa somente a 3,00 de profundidade pode prejudicar esta retenção.

#### 8.8. CONCLUSÕES

Os dois locais para disposição de rejeitos radioativos do IPEN cumprem as Normas Internacionais de Radioproteção.

Com os valores obtidos para a recarga nos dois sítios, nota-se que a taxa de infiltração da precipitação no antigo local (15%) é menor do que no sítio atual (39%).

Apesar dos dois sítios estarem situados próximos um do outro, o antigo local está situado numa área de aterro, tendo portanto características de solo diferentes do sítio atual.

## CAPÍTULO IX

AVALIAÇÃO DA RECARGA E UMIDADE EM ZONA SEMI-ÁRIDA9.1. DADOS GERAIS SOBRE A ÁREA DE ESTUDO

No nordeste brasileiro, a água constitui-se num mineral estratégico cujo volume disponível e qualidade impõem modelos de desenvolvimento, que não são válidos para outras regiões do país. A água, é portanto, no âmbito do "Polígono das Secas", e em especial, no estado do Rio Grande do Norte, a condicionamente mais importante, talvez um fator limitante em qualquer projeto que aí se implante (IPT, 1982).

O estado do Rio Grande do Norte, totalmente inserido no "Polígono das Secas" da região nordestina, tem seus limites compreendidos entre os meridianos  $43^{\circ}57'W$  e  $38^{\circ}35'W$  e os paralelos  $4^{\circ}52'S$  e  $6^{\circ}58'S$  (Figura 9.1, IPT, 1982).

Neste estado, como parte de um programa conjunto com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), de avaliação de recursos hídricos na "Formação Barreiras", foram avaliados os seguintes locais pertencentes à Bacia da Costa Leste: 1. Fazenda da Pituba, 2. Rua Presidente Castelo Branco, 3. Fazenda Paquetá (Goianinha), 4. Campo Limpo, 5. Estrada para Timbó, 6. Estrada para São José do Mipibú, 7. Local próximo ao poço IPT 978/440, 8. Posto de Pesquisa da Marinha e 9. Ao lado do cemitério de Extremoz.

O aquífero Barreiras se constitui no principal e praticamente no único manancial de água de boa qualidade disponível na região costeira oriental do Rio Grande do Norte (IPT, 1982).

### Bacia da Costa Leste

A bacia da Costa Leste, corresponde ao domínio da ocorrência de sedimentos terciários, na porção oriental do estado do Rio Grande do Norte, estendendo-se entre os paralelos 5°10' e 6°30' de latitude sul e os meridianos 35°00' e 35°30' de longitude oeste de Greenwich (Figura 9.2, IPT, 1982). A região é cortada principalmente pela rodovia Br-101 e pelas rodovias secundárias que constituem ramificações desta.

Na porção terrestre possui uma largura média de 25km e cerca de 150km de comprimento, estendendo-se desde a proximidade da cidade de Touros até a divisa com o estado da Paraíba, a sul. Ocupa uma superfície de cerca de 4870km<sup>2</sup>, na qual estão inseridas as cidades de Natal, Touros, Maxaranguape, Ceará Mirim, Extremoz, São Gonçalo do Amarante, Macaíba, Eduardo Gomes, Monte Alegre, São José do Mipibú, Nísia Floresta, Senador Georgino, Avelino, Arês, Tibau do Sul, Goianinha, Vila Flor, Canguarateda e Baía Formosa.

#### Aspéctos climáticos

A área de domínio da bacia da Costa Leste está sob a influência dos climas quente - úmido e semi-árido quente com predominância do primeiro principalmente na região de Natal.

A pluviometria anual da área é da ordem de 1212mm, com um valor mínimo de 872,2mm (Touros) e um máximo de 1562mm (Natal). O período mais chuvoso (Tabela 9.1, IPT, 1982) se estende de março a julho e os meses de menores precipitações são de outubro a novembro.

A umidade relativa apresenta médias anuais de 78,1% e 78,8%. As máximas entre 81% e 84% ocorrem no período abril-julho e as mínimas entre 74% e 75%, em outubro - janeiro.

Os meses de maior e menor evaporação diária são outubro e junho com 216 e 114mm mensais, respectivamente, ou se

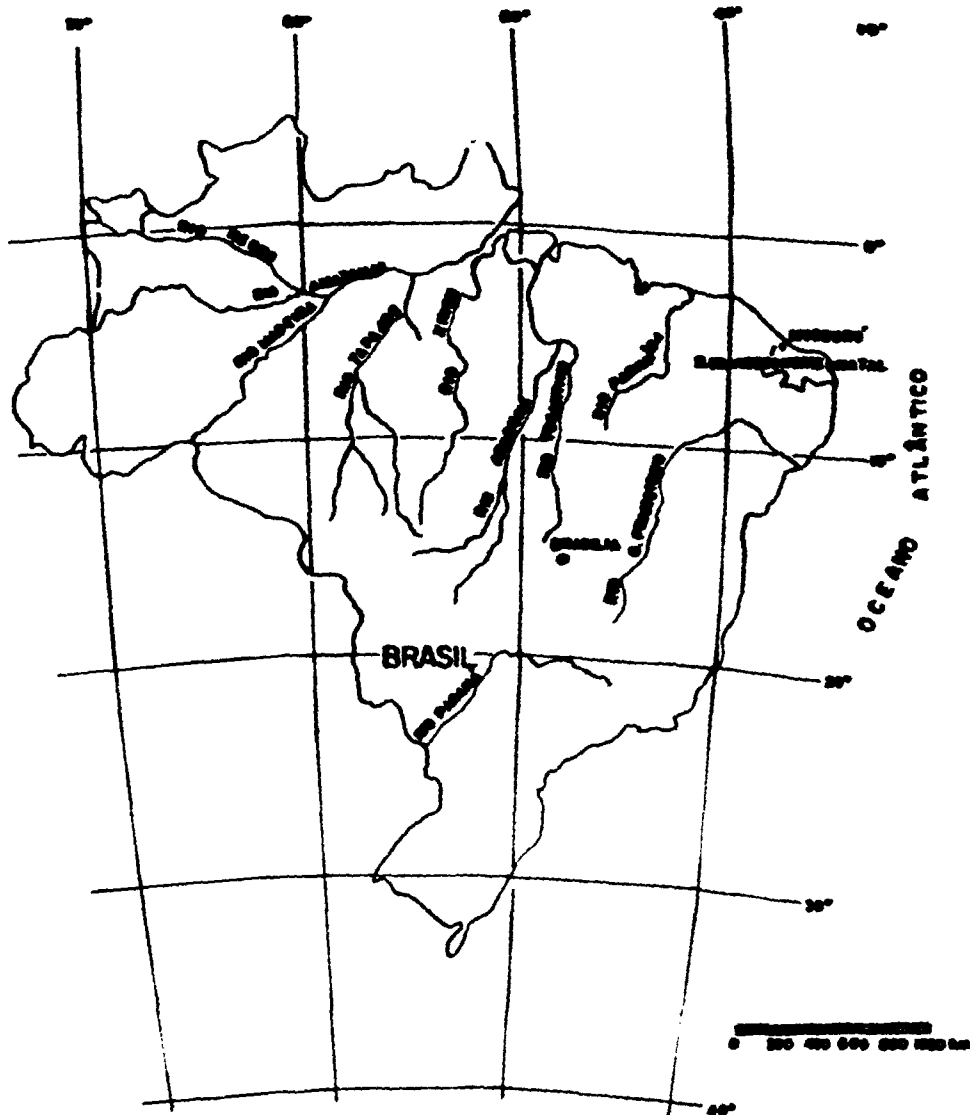


FIGURA 9.1. Mapa de localização do estado do Rio Grande do Norte (IPT, 1982)

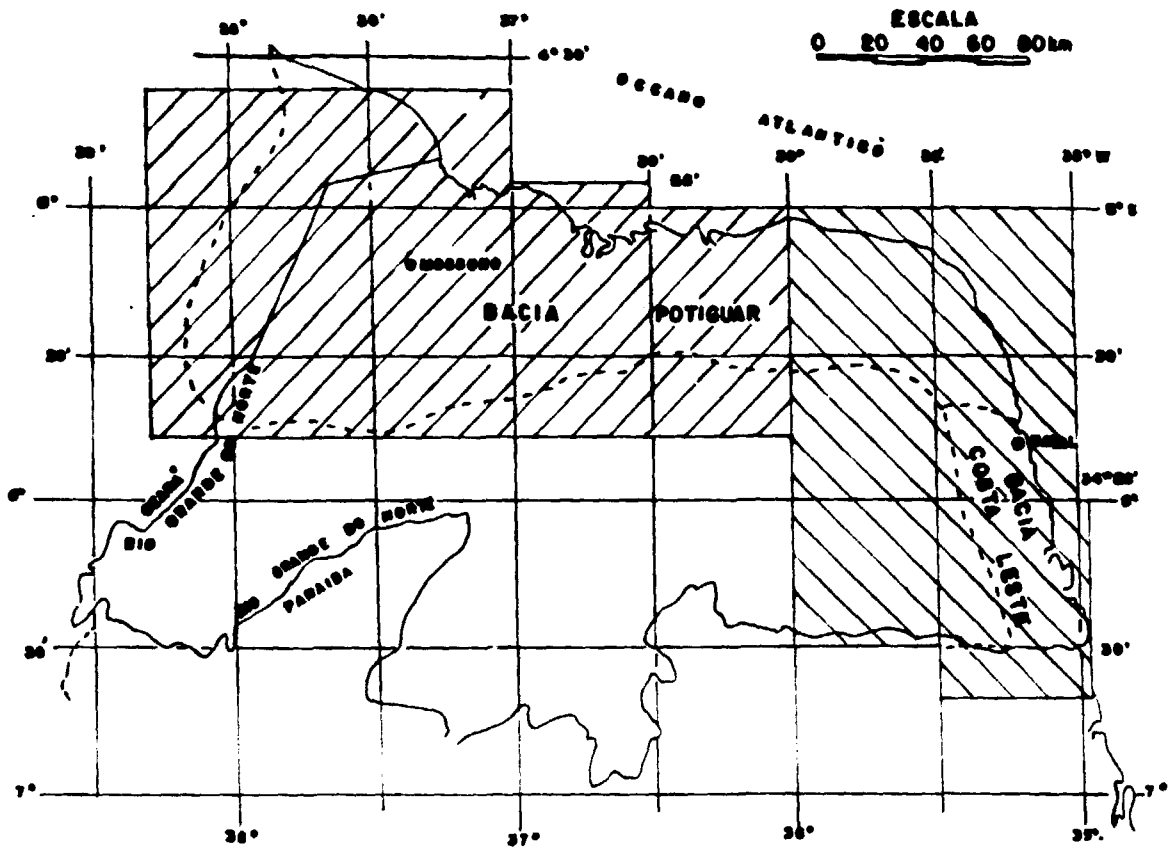


FIGURA 9.2. Localização da bacia da Costa Leste no estado do Rio Grande do Norte (IPT, 1982)

TABELA 9.1. Pluviometria e temperatura médias anuais na Bacia da Costa Leste (1911/79)  
(IPT/1982)

ESTAÇÃO	Período de Observação	MENSAL												ANUAL		
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MED.	MÁX.	MIN.
Natal	1911 a 1978	58,6	109,3	206,2	249,6	239,3	264,7	209,1	111,0	51,1	17,9	15,8	25,0	1562,6	3510,9	570,1
S.J.Mipibu	1911 a 1978	59,8	96,3	164,9	191,1	177,1	201,1	171,0	79,7	38,8	15,3	20,7	32,0	1252,2	3390,0	473,9
Macaíba	1911 a 1962	46,5	88,1	145,5	163,8	157,4	155,3	110,5	62,0	26,3	11,9	14,8	23,7	1011,3	1853,4	479,2
Goianinha	1963 a 1978	57,6	98,0	151,8	219,6	157,5	195,3	193,4	86,2	52,8	17,1	18,2	22,2	1259,5	2161,4	704,2
Ceará-Mirim	1911 a 1968	49,8	87,1	152,6	189,5	157,3	165,1	128,2	65,4	31,2	15,0	11,1	23,3	1072,3	2098,3	398,5
Canguaretama	1911 a 1968	62,3	98,7	168,6	206,2	195,6	219,3	159,6	88,6	51,9	22,1	25,9	35,0	1342,5	2759,5	340,0
S.Gonçalo do Amarante	1911 a 1932	72,6	144,2	202,0	215,0	180,6	201,5	153,1	74,4	40,7	17,1	18,4	26,1	1360,0	1966,0	533,3
Iouros (Canabrava)	1962 a 1979	46,1	75,2	146,9	162,3	119,0	122,4	96,6	37,2	22,5	4,3	4,5	11,5	1760,2	872,2	465,3

Temperaturas mensais médias (C<sup>o</sup>) - (Atlas clim. do Brasil - M.A.)

Região Costeira Ocidental  
entre Natal e Canguaterra

28 27 27 26 26 25 24 24 26 27 27 28

ja, 7,2 e 3,8mm por dia.

### Geologia

A bacia da Costa Leste, no estado do Rio Grande do Norte, é um domínio de sedimentos cenozóicos, denominado Grupo Barreiras. Três formações compõem este grupo, que da base para o topo, são:

1. Formação Serra dos Martins, datada do terciário inferior,
2. Formação Guararapes, de idade pliocênica, e
3. Formação Macaíba, do terciário superior (Tabela 9.2, MABES SONI et alli, 1972).

Sobrepostos aos sedimentos do Grupo Barreiras, estão presentes sedimentos quaternários, dunas, sedimentos de praia e aluviões. As dunas ocorrem paralelamente à linha da costa e as aluviões restringem-se aos valores dos principais rios.

### 9.2. TRABALHO EXPERIMENTAL

A injeção de trítio artificial no sub-solo, realizada no mês de junho de 1980, foi executada em nove locais representativos da Formação Barreiras. Estes locais foram selecionados dentro de uma faixa que obedeceu os seguintes critérios:

- Topografia plana, para permitir a infiltração da água da chuva no sub-solo. Em áreas acidentadas há um maior escoamento artificial.

- Vegetação escassa ou ausente, para evitar a influência das raízes das plantas, onde pode ocorrer a perda da água tritiada por evapotranspiração.

- Acesso fácil para permitir o transporte dos materiais.

TABELA 9.2. Coluna estratigráfica da Bacia da Costa Leste (IPT, 1982)

IDADE	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS		LITOLOGIA
Quaternário	Sedimentos recentes (dunas e aluviões)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- areias finas e homogêneas</li> <li>- areias finas e grosseiras</li> <li>- conglomerados e argilas</li> </ul>
	Grupo Barreiras	discordância	
		Formação Macaíba	<ul style="list-style-type: none"> <li>- areias argilosas e argilas</li> <li>cores variegadas</li> </ul>
Terciário		discordância	
		Formação Guararapes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- areias finas e médias, com</li> <li>intercalação argilosas</li> </ul>
		discordância	
		Formação Serra do Matins	<ul style="list-style-type: none"> <li>- areias claras, finas a médias,</li> <li>duras</li> </ul>
		discordâncias	
Cretácea	Grupo Apodi (?)	Formação Açu (?)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- arenitos</li> </ul>
		Formação Jandaíra (?)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- calcários</li> </ul>
		discordâncias	
EMBASAMENTO CRISTALINO			

A Figura 9.3, ilustra a localização da área.

O método de injeção executado em cada local, consistiu basicamente em introduzir, inicialmente, uma barra de ferro com 7mm de diâmetro a uma profundidade de 70 a 90cm, em 5 pontos espaçados de 10cm e distribuídos em forma de cruz. Retiram-se as barras e foram inseridas, posteriormente, em cada tubo com 2mm de diâmetro através do qual foi injetada uma solução de 2,5ml de água tritiada de concentração  $3,7 \times 10^4$  Bq/ml ( $1 \mu\text{Ci/ml}$ ).

Foram feitos em cada local dois grupos de injeção contendo cada um os 5 pontos de injeção. Cada grupo, distanciados entre si de 1m, correspondeu a um período de amostragem de solo após 6 e 12 meses.

A coleta de amostras de solo compreendeu 2 campanhas realizadas, uma em dezembro de 1980 e outra em junho de 1981.

Para proceder à amostragem foi utilizado um trado manual de 75mm de diâmetro, retiradas amostras de solo em intervalos de 10cm e, posteriormente, acondicionadas em frascos de polietileno de 500ml. Determinou-se, também no local da coleta, o peso específico global do solo.

O trabalho de amostragem foi feito cuidadosamente para evitar a contaminação das camadas mais profundas com os restos de solo que podem desprender-se do trado durante sua colocação e retirada do buraco. No entanto, não foi possível evitar alguma contaminação.

Na primeira fase de amostragem foi possível efetuar a coleta de solo em apenas 5 locais com profundidades de 2,4 a 3,2m. Na segunda, foram amostrados 6 locais com profundidades até 5,5m. Nas tabelas 9.3 e 9.4 estão descritos os locais da coleta durante a primeira e a segunda campanha.

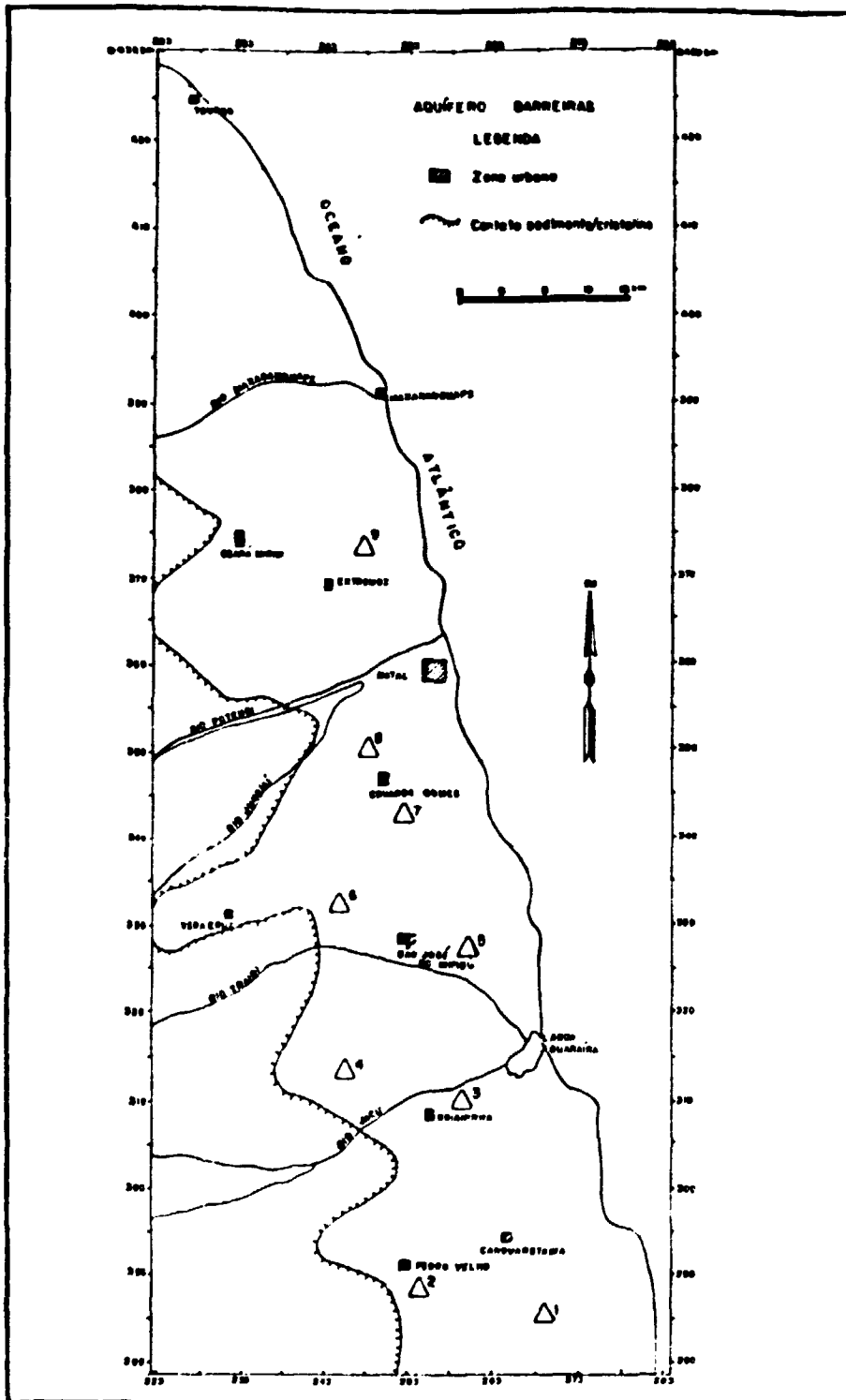


FIGURA 9.3. Localização dos pontos de injeção  
 (SANTOS, 1984)

TABELA 9.3. Primeira amostragem (6 meses após a injeção)

Local/nº	Profundidade da amostragem (m)	Observações
1. Fazenda Pituba	-	- não foram coletadas as amostras por causa da alta compacidade da camada de argila
2. Rua Presidente Castelo Branco (Pedro Velho)	-	- não foram coletadas amostras em virtude da perda das marcações que permitiam identificar os pontos de injeção
3. Fazenda Paquetã (Goianinha)	-	- não foram coletadas as amostras porque o solo estava muito seco e compactado.
4. Campo limpo	0,60 a 3,00	-
5. Estrada para Timbô	-	- não foram coletadas amostras em virtude da perda das marcações dos pontos de injeção, por um trator passado no local.
6. Estrada para São José do Mipibú	0,30 a 3,20	-
7. Área próxima ao poço IPT 978/440	0,00 a 3,20	-
8. Posto de Pesquisa da Marinha	0,00 a 3,20	-
9. Área ao lado do Cemitério Extremos	0,30 a 2,40	-

TABELA 9.4. Segunda amostragem (12 meses após a injeção)

Local/nº	Profundidade da amostragem (m)	Observações
1. Fazenda Pituba	-	- não foram coletadas as amostras por causa da alta compactidade da camada de argila.
2. Rua Presidente Castelo Branco (Pedro Velho)	-	- não foram coletadas amostras em virtude da perda das marcações que permitiam identificar os pontos de injeção.
3. Fazenda Paquetã (Goianinha)	2,20	- As amostras foram coletadas somente até esta profundidade em virtude do material ser predominantemente argiloso implicando em pouca infiltração da água da precipitação.
4. Campo Limpo	0,30 a 5,50	-
5. São José do Mipibu	0,00 a 5,50	-
6. Área próxima ao poço IPT 978/440	0,00 a 5,50	-
7. Posto de Pesquisa da Marinha	0,00 a 5,50	-
8. Área ao lado do cemitério de Extremos	0,00 a 2,50	- na profundidade de aproximadamente 2,30m encontrou-se o lençol freático

Todas as amostras foram levadas ao laboratório para determinação de seu conteúdo de trítio e de umidade.

As Figuras de números 9.4 a 9.8 fornecem os perfis de trítio e de umidade após seis meses da injeção de trítio para os cinco locais amostrados.

As Figuras de números 9.9 a 9.14 fornecem os perfis de trítio e de umidade após um ano de injeção de trítio para os seis locais amostrados.

O deslocamento do trítio (medido desde a profundidade de injeção ao centro de gravidade do perfil de trítio), a densidade global média e a recarga da água subterrânea estão indicados nas Tabelas 9.5 e 9.6 para 6 e 12 meses após a injeção, respectivamente.

Neste estudo, foram analisados no total 405 amostras de solo, indicando para os locais de números 3, 4, 6, 7, 8 e 9, as recargas de 11,88; 26,78; 39,80; 39,91; 41,70 e 7,05 respectivamente, para um ciclo de chuva.

A Figura 9.15 apresenta o mapa geológico do local.  
(IPT, 1982)

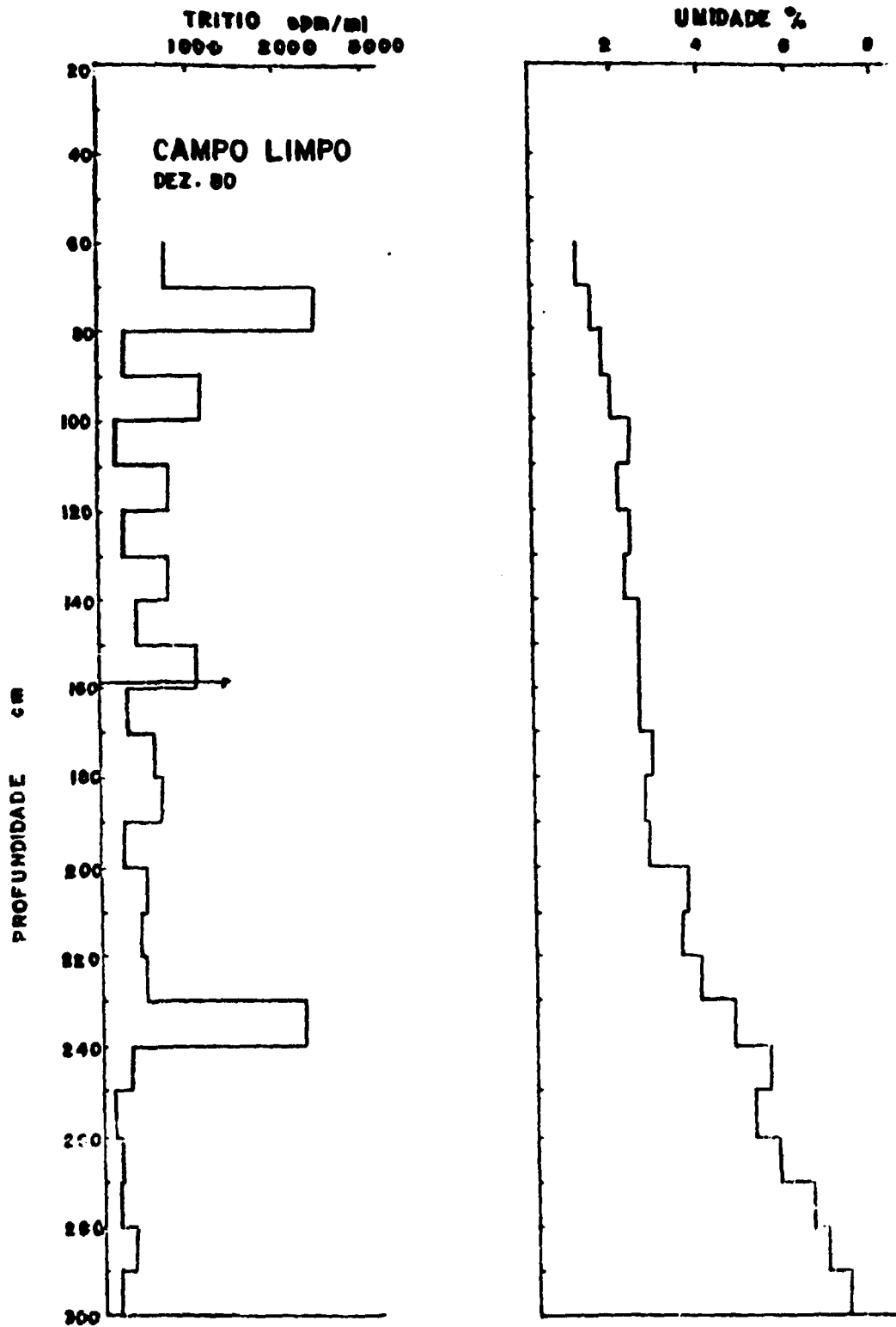


FIGURA 9.4. Perfil de trítio e de umidade após seis meses de injeção do trítio  
Campo Limpo, Rio Grande do Norte

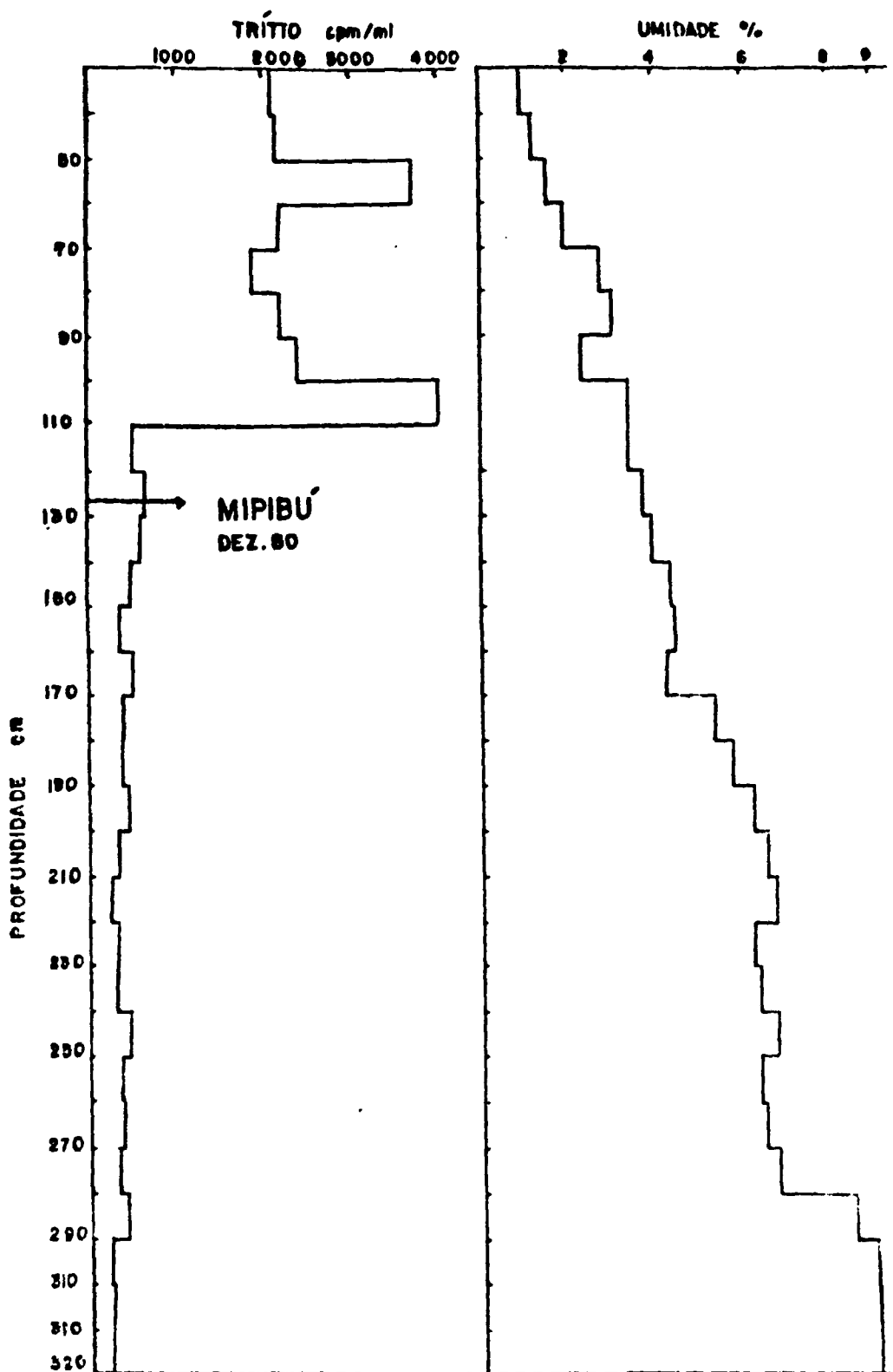


FIGURA 9.5. Perfil de trítio e de umidade após 6 meses da injeção do trítio, Mipibú, RN.

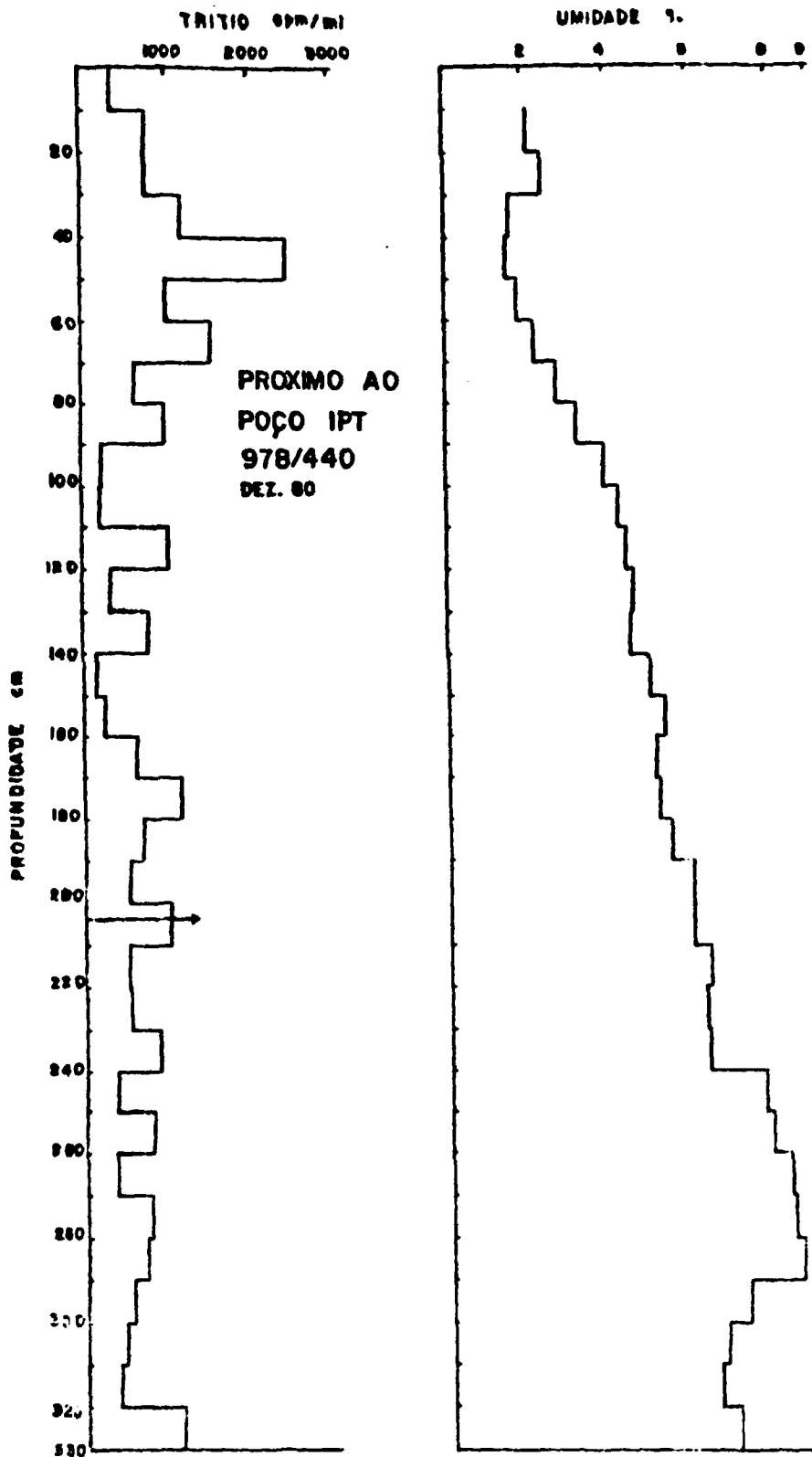


FIGURA 9.6. Perfil de trítio e de umidade após seis meses de injeção do trítio  
Local próximo ao poço IPT 978/440 - Rio Grande do Norte

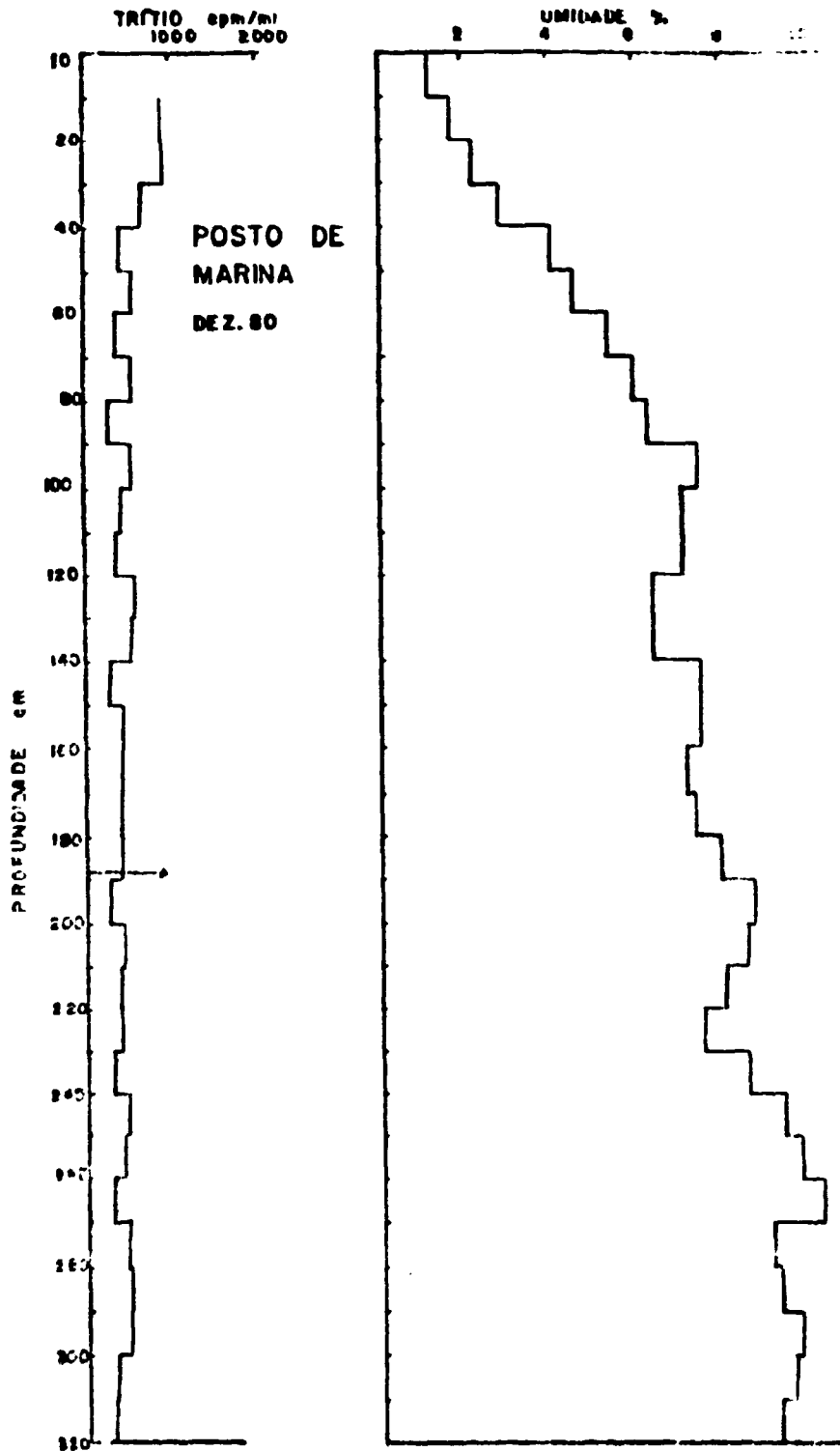


FIGURA 9.7. Perfil de trítio e de umidade após seis meses da injeção do trítio  
Posto da Marinha - Rio Grande do Norte

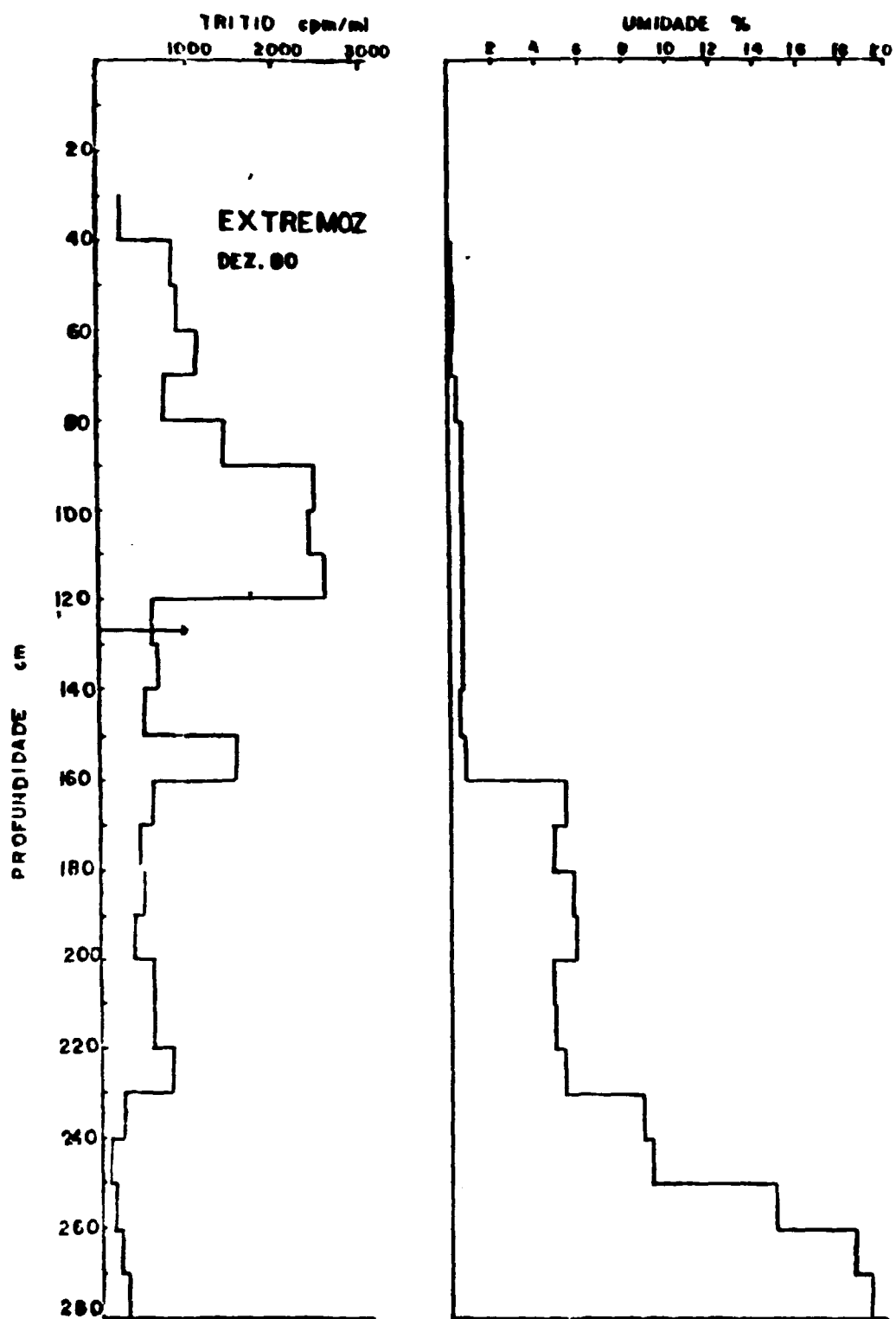


FIGURA 9.8. Perfil do trítio e de umidade após seis meses da  
injeção do trítio  
Extremoz, Rio Grande do Norte

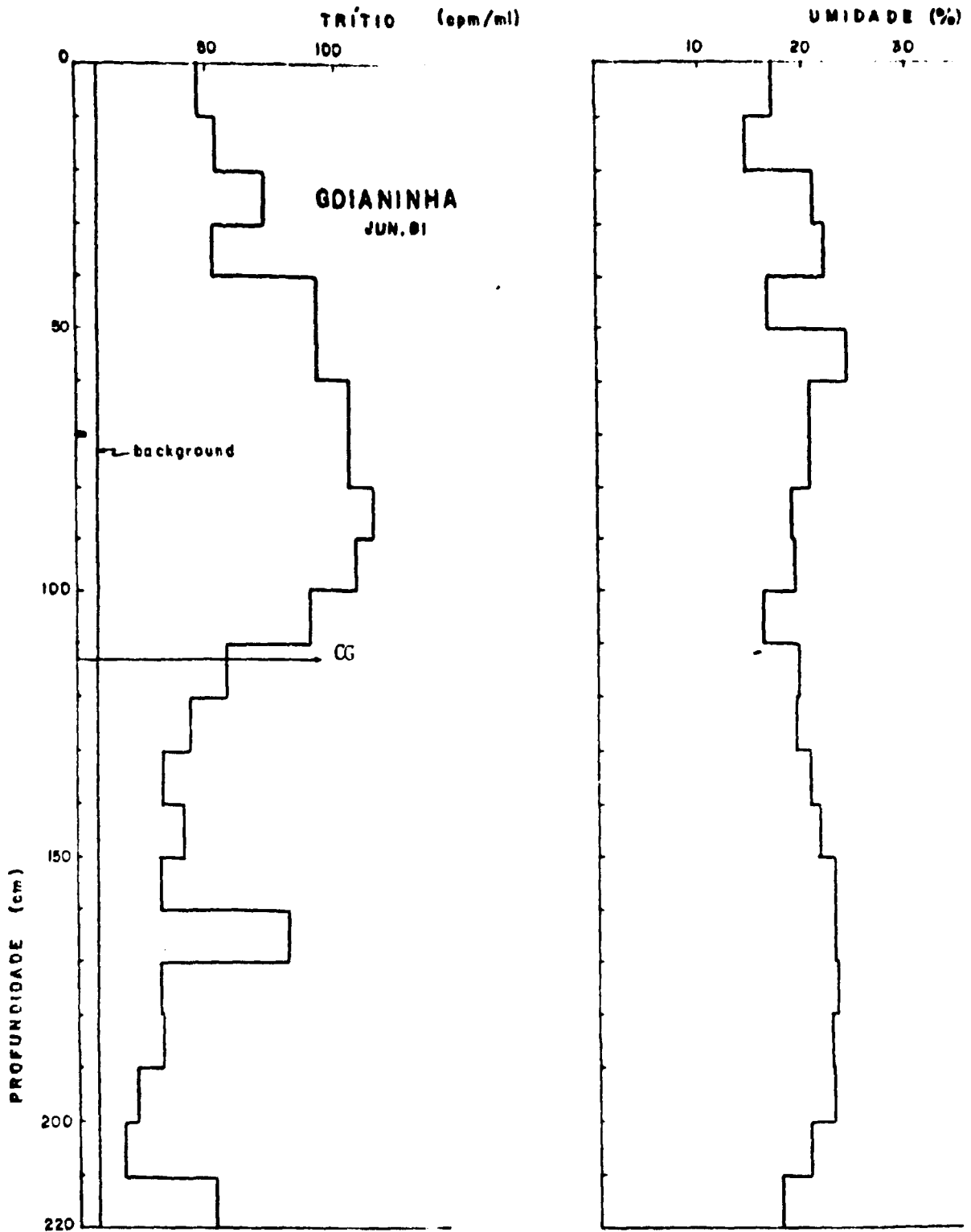


FIGURA 9.9. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses, Goianinha, RN.

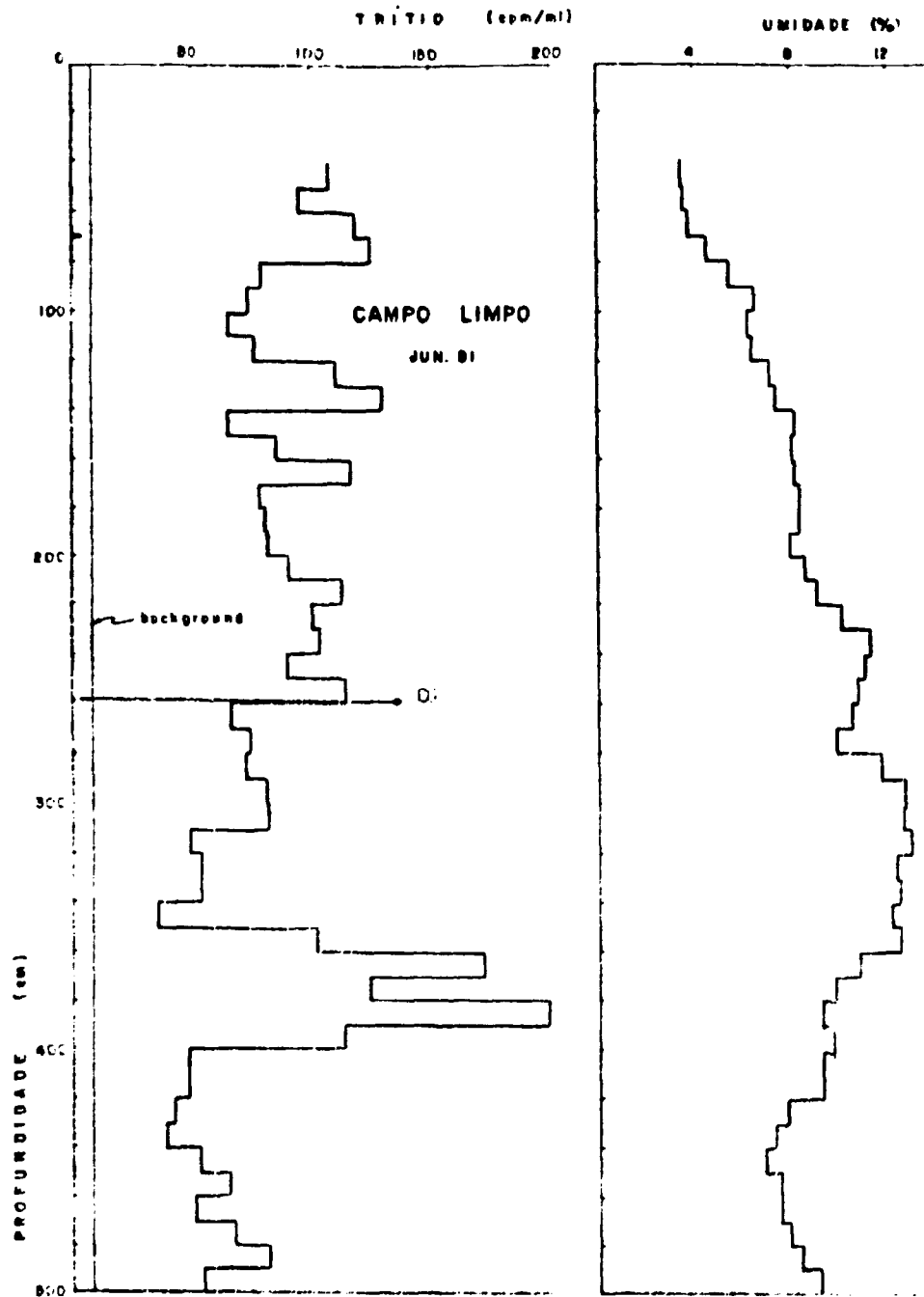


FIGURA 9.10. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses, Campo Limpo, RN.

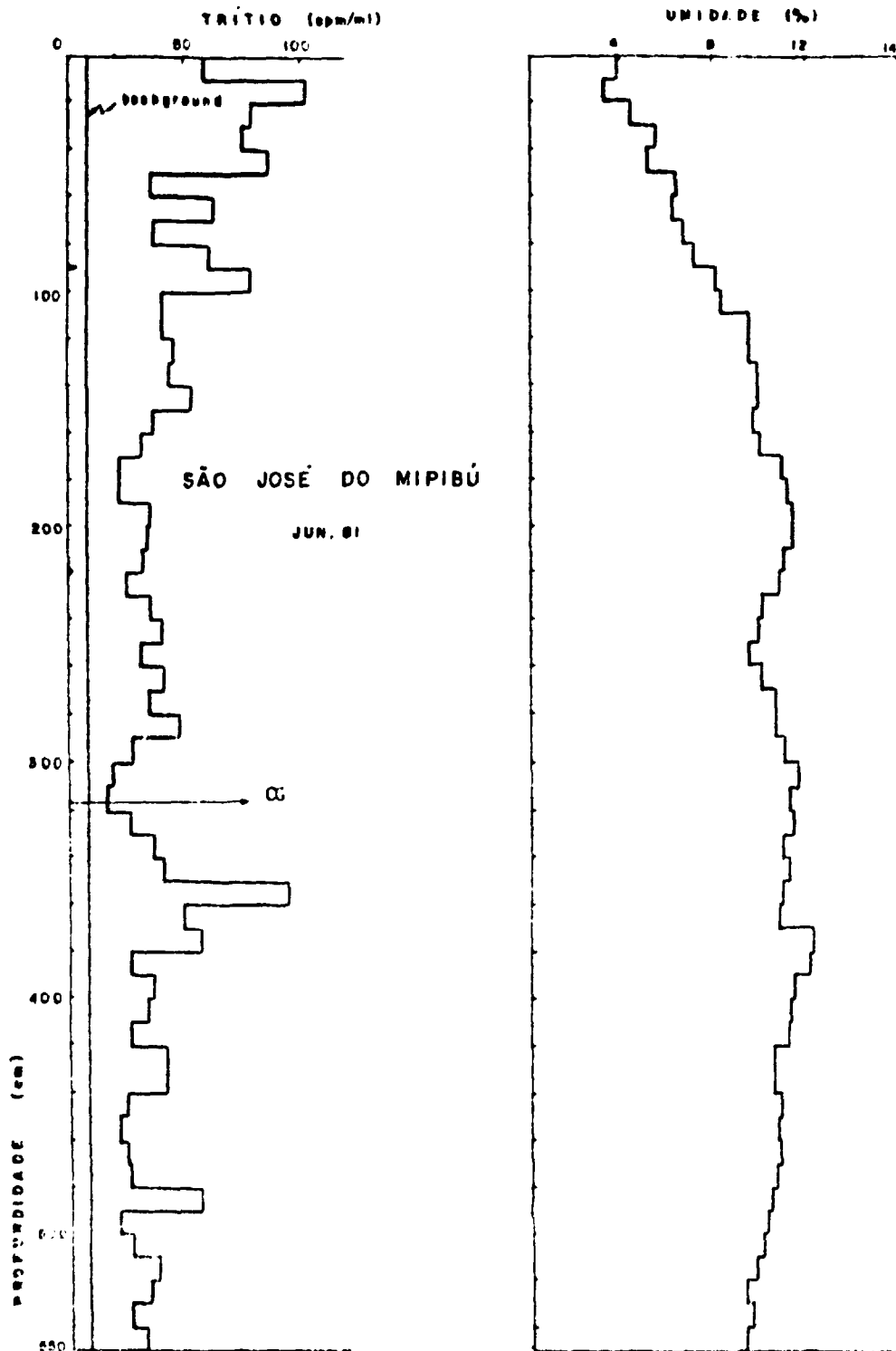


FIGURA 9.11. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses, São José do Mipibu, RN.

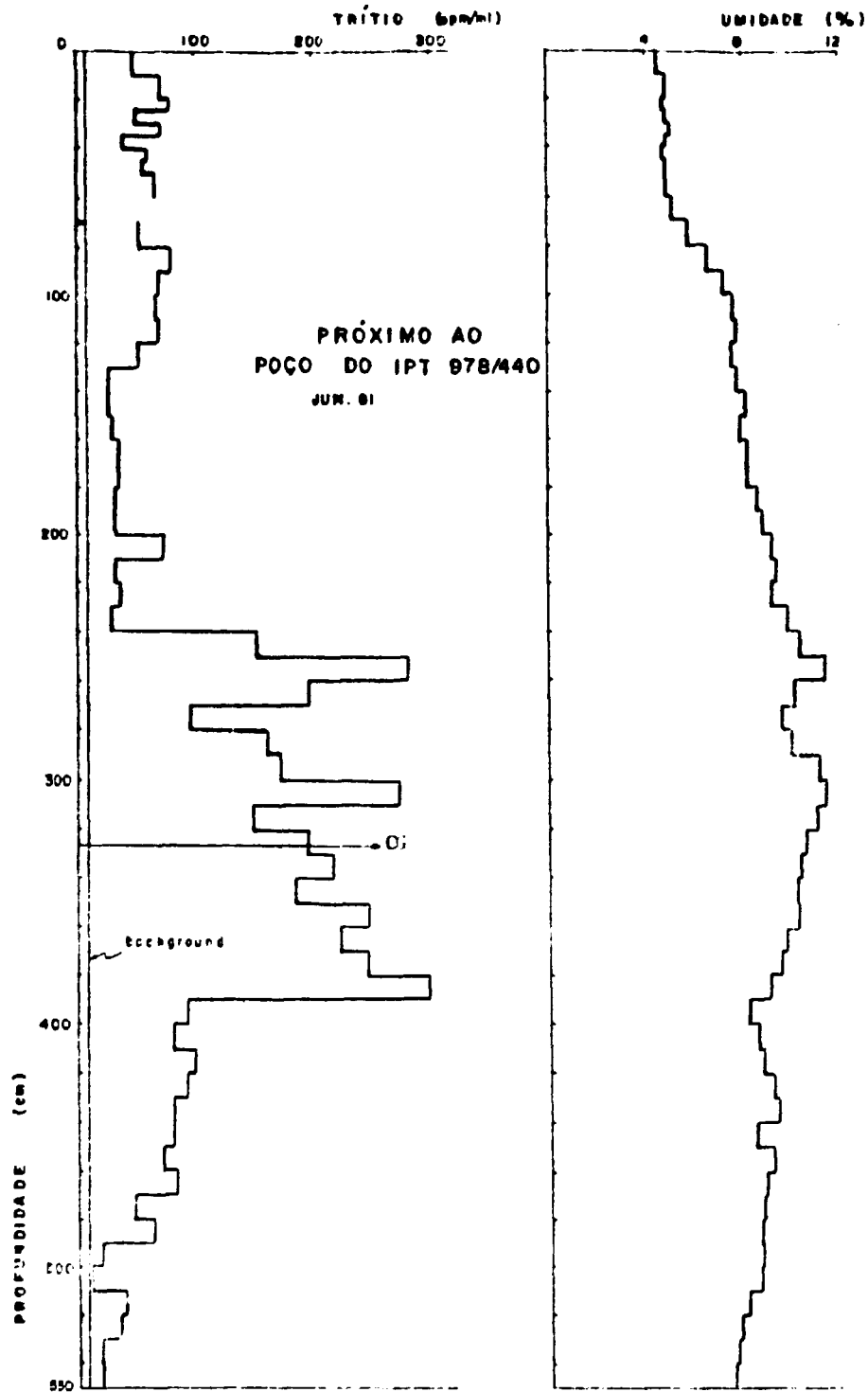


FIGURA 9.12. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Local próximo ao poço IPT 978/440, RN.

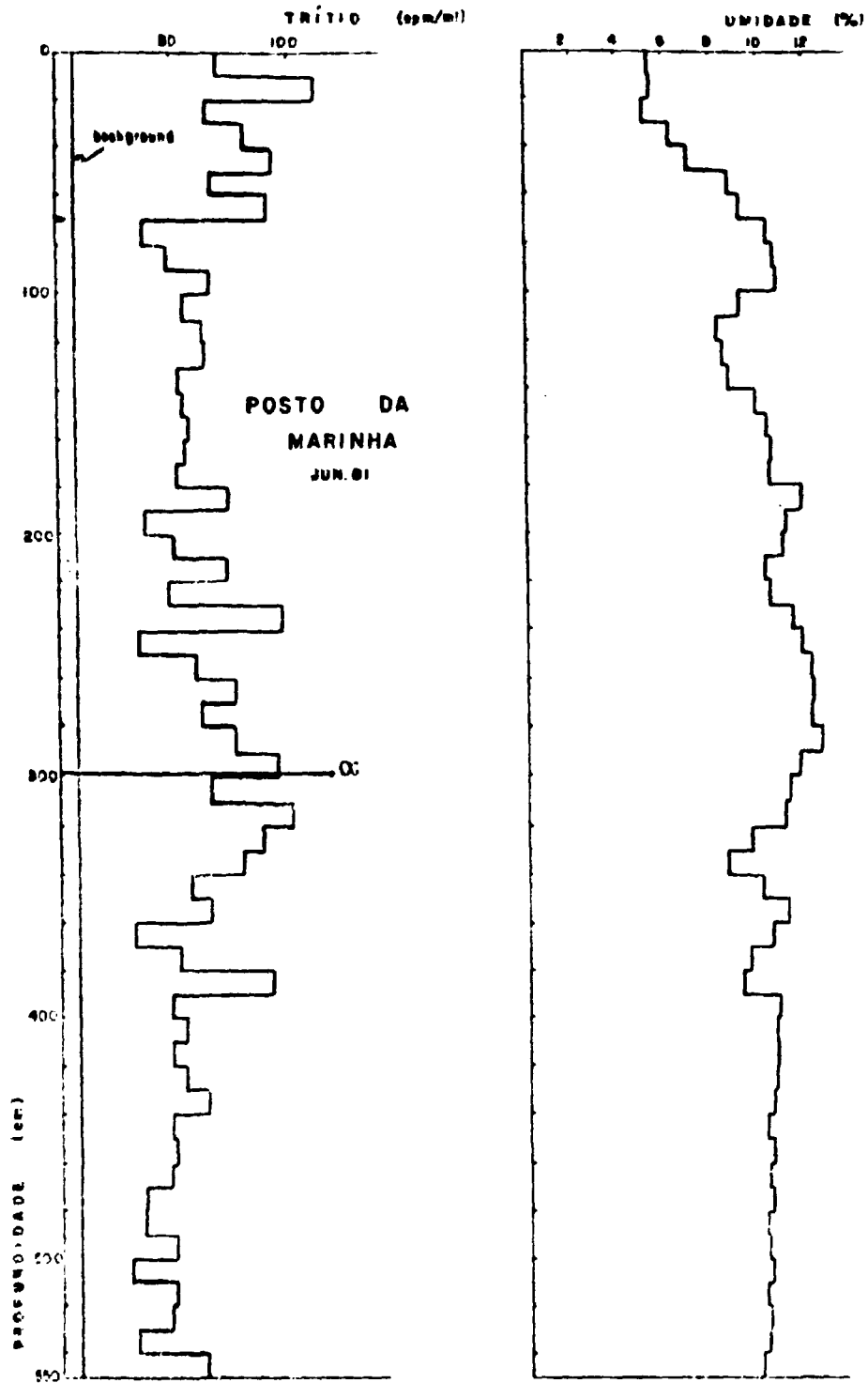


FIGURA 9.13. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Posto da Marinha, RN.

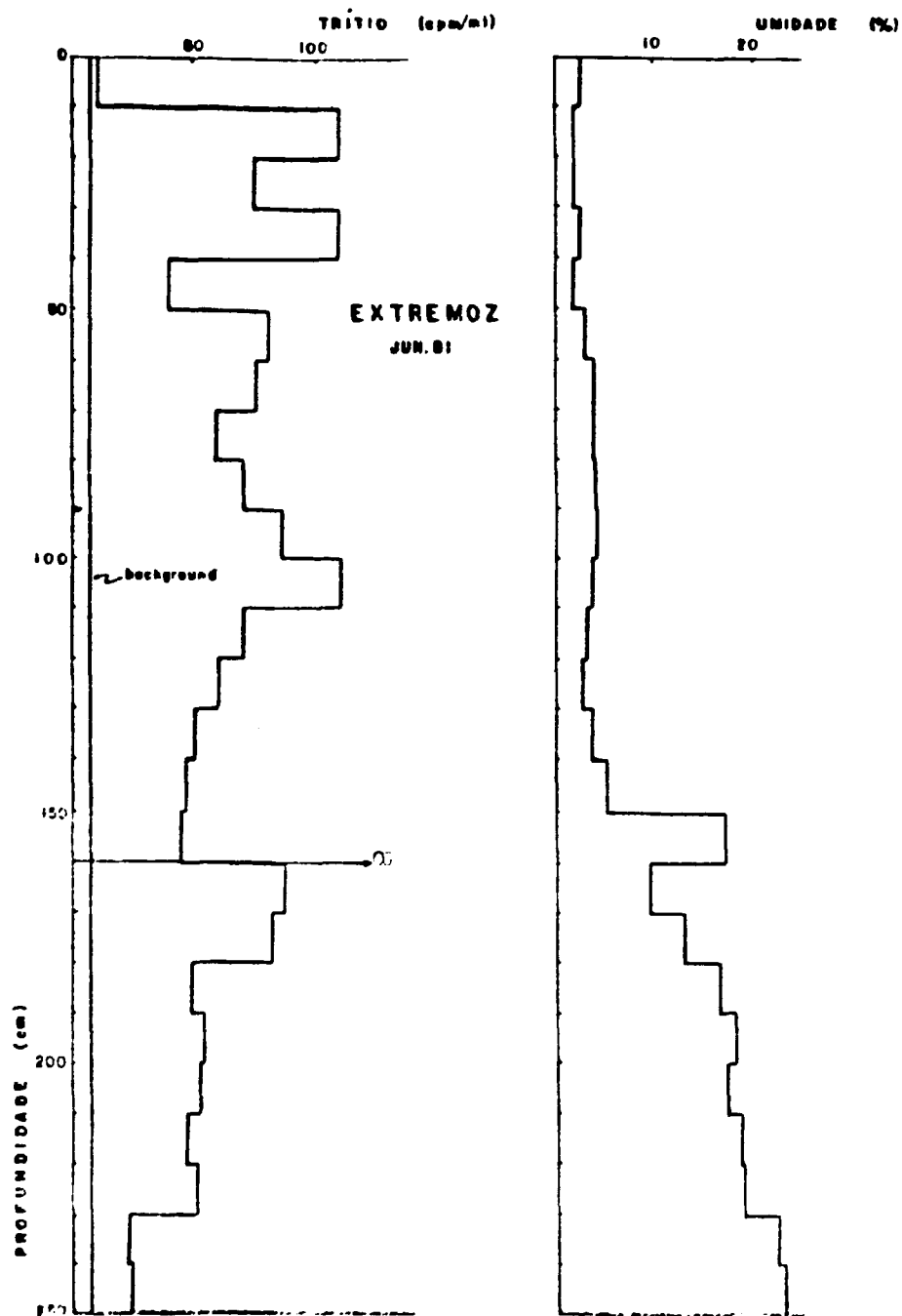


FIGURA 9.14. Perfis dos teores de trítio e umidade após 12 meses. Extremoz, RN.

TABELA 9.5. Dados do movimento da umidade do solo e da recarga do aquífero após 6 meses da injeção do trítio

Local	Grupo	Profundidade de injeção do trítio (cm)	Centro de gravidade C.G. (cm)	Deslocamento X(cm)	Conteúdo de umidade médio % em peso (ponto de injeção C.G.)	Densidade global do solo (g/cm)	Recarga r (cm)
Campo Limpo	4	70	158.5	88.5	2.04	1.70	3.01
Mipibu	6	90	127.0	37.0	3.21	1.75	2.01
Poço do IPT 978/440	7	70	204.5	134.5	4.69	1.50	9.04
Posto da Marinha	8	70	188.5	188.5	7.04	1.65	12.86
Extremoz	9	90	127.0	37.0	0.60	1.60	0.35

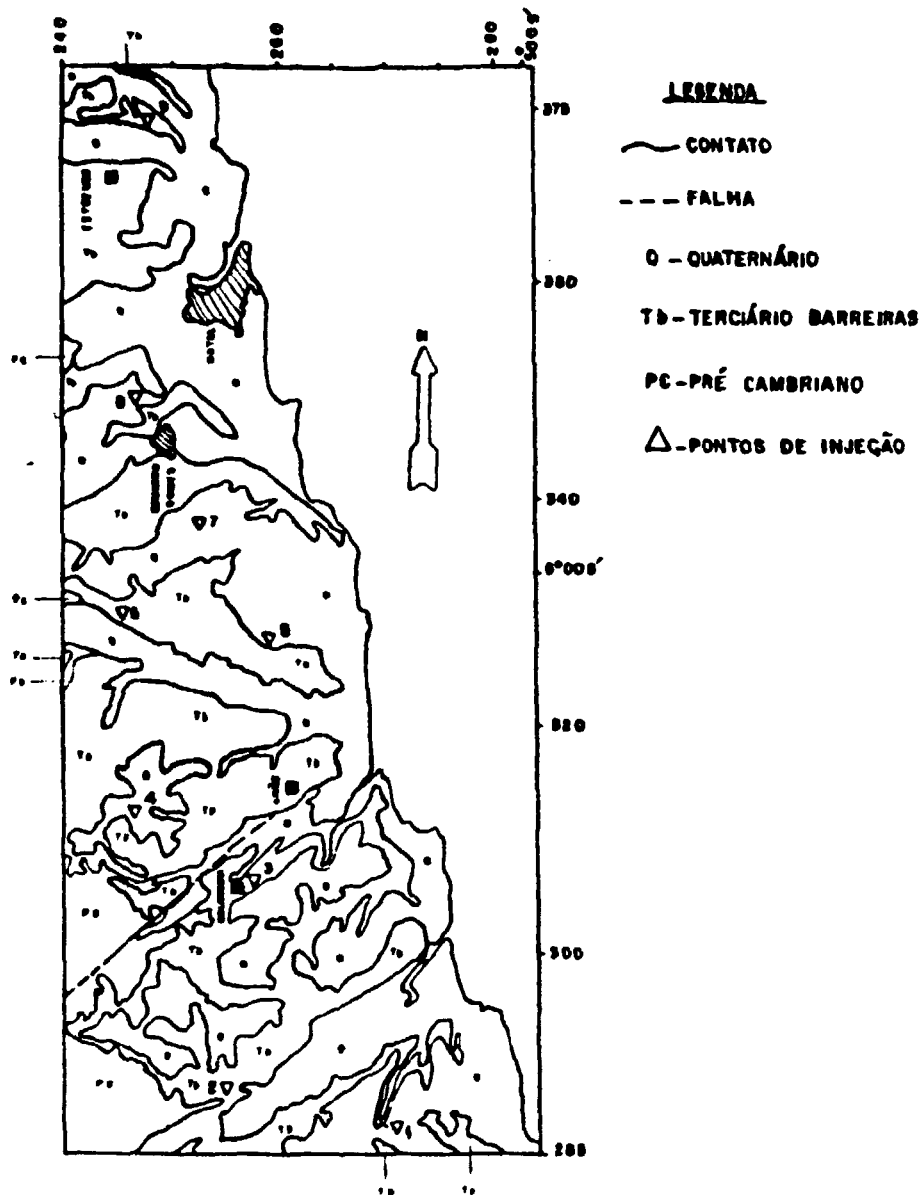


FIGURA 9.15. Mapa Geológico do local de estudo (IPT, 1981)

Tabela 9.6. Dados de migração da umidade e da recarga do aquífero após um ano da injeção do trítio

Local	Grupo	Profundidade de injeção do trítio (cm)	Centro de Gravidade (C.G.) do perfil (cm)*	Deslocamento x (cm)	Conteúdo de umidade médio (Ponto de injeção-C.G.) % em peso	Densidade global do solo D (g/cm <sup>3</sup> )	Recarga r (cm)	Precipitação média (mm)	% de infiltração
Goianinha	3	70	112.8	42.8	18.72	1.76	11.58	1212	9,8%
Campo Limpo	4	70	259.3	189.3	8.09	1.89	26.78	1212	22,1%
Mapibú	6	90	316.9	226.9	10.23	1.89	39.80	1212	32,8%
Poço do IPT 978/440	7	70	327.6	257.6	8.93	1.89	39.91	1212	32.9%
Poço da Marinha	8	70	299.6	229.6	10.63	1.89	41.70	1212	34.4%
Extremoz	9	90	160.0	70.0	5.63	1.89	7.05*	1212	5.8%

\* Calculado sem levar em consideração os dados superiores à profundidade de injeção.

\*\* possível perda do traçador

### 9.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos gráficos de variação de trítio com a profundidade, mostra que:

- a recarga na Formação Barreiras está variando de local para local dependendo da condutividade hidráulica da região;

- ocorre uma variação da permeabilidade vertical ao longo do pacote sedimentar, evidenciando uma alternância de camadas litologicamente distintas;

- as baixas recargas observadas em Goianinha (Fazenda Paquetá) e Campo Limpo, comparativamente àquelas obtidas em São José do Mipibu, Posto da Marinha, Fazenda Caninãna (Poço do IPT nº 978/440) e Extremoz, estão fortemente relacionadas ao solos argilosos predominantes nas áreas acima.

- a cobertura arenosa, observada na área de Extremoz, sugere uma alta permeabilidade vertical. A pouca profundidade das águas subterrâneas nesta área, da ordem de 2,30m e provavelmente, o forte gradiente hidráulico aí existente, provocou quando da aplicação do trítio, uma perda lateral do mesmo, após a infiltração da água da chuva nesta profundidade, obtendo-se assim, uma baixa recarga por infiltração de águas de chuva. Em vista desses problemas é quase certo que a recarga oriunda das águas de chuva, na região de Extremoz, seja superior à encontrada (7cm).

- em alguns locais, como Campo Limpo, São José do Mipibu e Posto da Marinha, o trítio já se infiltrou mais que 5,50m de profundidade. Isto indica que a recarga nesses locais pode ser um pouco maior que a calculada.

O trabalho de amostragem de campo foi feito cuidadosamente para evitar a contaminação das camadas profundas com restos de solo que podem desprender-se do trado durante sua

colocação e retirada do buraco, mas ainda não foi possível evitar alguma contaminação, principalmente nos solos muito arenosos.

Melhorando o amostrador de solo pode facilitar-se a amostragem em profundidades maiores que 5,50m e, ao mesmo tempo, diminuir a probabilidade de contaminação.

Este trabalho realizado em conjunto com o IPT (1982) permitiu a comparação entre diferentes métodos empregados no balanço hídrico da Bacia da Costa Leste. Entre os métodos empregados pelo IPT, verificou-se que a partir da fórmula de Turc, obteve-se uma taxa de evapotranspiração de 85% da pluviometria média anual da área.

Segundo o balanço hídrico de Thornthwaite, que apresentou um resultado para evapotranspiração semelhante ao obtido pela fórmula de Turc, resulta numa parcela infiltrada de somente 127mm anuais, o que parece não estar de acordo com as características topográficas e de solos da área (IPT, 1982).

Os resultados obtidos pelo IPEN/IPT através da injeção de trítio mostram uma excelente correspondência entre o tipo de cobertura e as recargas. Assim é que, as maiores recargas foram obtidas em São José do Mipibu (398mm), Nísia Floresta (399mm) e Posto da Marinha (417mm). Nestes locais é notório o domínio do solo arenoso, sobre a fração argilosa. Goiânia (119mm) e Campo Limpo (268mm), são os locais onde se observam menores infiltrações. Nestas duas últimas áreas, a ocorrência de coberturas arenosas é mais rara, relativamente às demais.

A partir dessas considerações foram selecionados resultados obtidos através do método de traçador que, em se tratando de uma aplicação direta de campo, apresenta uma maior confiabilidade. Utilizou-se, pelo IPT, para o balanço hídrico, um valor médio de recarga, de 193mm/ano, correspondente à mé-

dia das determinações efetuadas em Goianinha (119mm) e Campo Limpo (268mm).

Considerando a pluviometria média anual para a área, de 1212mm, o valor de recarga acima corresponde a uma taxa de infiltração de 16%.

Estudos realizados na área de Extremoz (região norte) concluíram por uma taxa de infiltração semelhante aos 16% obtidos. De fato, a semelhança dos caracteres texturais dos solos presentes tanto nas áreas onde foram realizadas as aplicações de trítio, quanto na região norte da Bacia, permite a adoção de uma única taxa de infiltração para as duas áreas.

Deste modo, os cálculos do volume de recarga do aquífero Barreiras, foram efetuados pelo IPT, com base em uma taxa de infiltração de 16%.

Este estudo foi feito numa região em que a evaporação compete com a precipitação. O movimento do trítio para as camadas superiores foi predominante em cada local investigado.

Chuvas fracas e intermitentes não adicionam à recarga pois devem ficar retidas nas camadas superiores e sofrem perdas por evaporação. Nesta região onde a evaporação pode ser significativa, o modo de se ter uma recarga substancial deve ser por meio de uma chuva pesada.

As condições geológicas, hidrológicas e morfológicas da Bacia da Costa Leste, indicam que a recarga dos principais aquíferos se processa essencialmente por infiltração da chuva, diretamente nas áreas de afloramento das formações e, posteriormente por processos de infiltração vertical de um aquífero para outro por causa de diferenças de pressão hidrostática entre eles (IPT, 1982).

Predominam na área os solos de natureza arenosa de alta permeabilidade. O relevo é caracterizado pela presença de níveis aplainados, constituindo as superfícies dos tabuleiros,

nas quais nota-se uma quase ausência de drenagem superficial, o que evidencia reduzido escoamento e elevada infiltração.

(IPT, 1982)

A recarga por águas meteóricas comumente ocorre durante os meses de temperaturas médias do ar, mais baixas, quando a evapotranspiração deve atingir seus níveis mínimos e ainda onde a umidade do solo é mantida igual ou acima da capacidade de campo, devido a chuvas freqüentes.

A injeção de trítio foi realizada em junho/80, isto é, no final do período de chuvas da região onde o solo deve estar úmido, acima da capacidade de campo.

O caráter predominantemente arenoso dos solos e a pequena profundidade das águas subterrâneas do aquífero Barreiras, indicam ser este altamente vulnerável à poluição. (IPT, 1982)

#### 9.4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos para a recarga na "Formação Barreiras", conclui-se que a técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial é uma técnica útil, fornecendo resultados confiáveis em regiões semi-áridas.

CAPÍTULO X  
AValiação DE RECARGA E UMIDADE EM TERRENOS  
SUBTROPICAIS ÚMIDOS

10.1. ESTaÇÃO EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DA DINÂMICA E DA EVO-  
LUÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ÁGUA NA ZONA NÃO SATURA-  
DA (VIVEIRO/USP)

10.1.1. Dados gerais sobre o local de estudo

A Estação Experimental para Estudo da Dinâmica e da Evolução da Composição Química da Água na Zona não Saturada está situada no Viveiro de Plantas da Cidade Universitária numa cota de 748m, sendo que o nível da água neste local está, aproximadamente a 9,36m abaixo do nível da superfície. O perfil litológico mostra a seqüência de areias de diferentes granulções e colorções com intercalações de argila siltosa da Formação de São Paulo, de idade terciária (Fig. 10.1, SZIKSAY, 1980).

Com o objetivo de se estudar a percolação da água na zona não saturada em condições naturais, onde possa ser realizado num monitoramento de todas as variações que ocorrem, tanto do ponto de vista da dinâmica das águas, como da sua composição química, foi instalada pelo CEPAS/Geociências (SZIKSZAY, 1986) uma Estação Experimental no Campus da Universidade de São Paulo, onde foi proposto pelos pesquisadores estudar os seguintes itens:

- A transferência da água na zona não saturada (evaporação e/ou infiltração);

- a evolução da composição química da água a partir da água de chuva, através da zona saturada, até o aquífero;

- o comportamento (propagação, dispersão e tempo de residência) de diversos poluentes.

Na escolha do local para instalar a Estação Experimental, os seguintes fatores foram levados em consideração:

a) o nível hidrostático (NH), deve se encontrar pelo menos a 1m abaixo do fundo da escavação, mesmo na época das chuvas;

b) a presença de uma camada de sedimentos no mínimo de 5 - 6m de espessura;

c) preferência para rochas sedimentares não autóctones e não manto de decomposição;

d) preferência por areia e não argilas.

Deste modo foi escolhido pelos pesquisadores o local com características que mais se aproximam do desejado, numa área que se encontra no seu estado original, ou seja, não foi retalhado antropicamente, situada no Viveiro de Plantas da Cidade Universitária.

SZIKSZAY, et alli (1987) em seus estudos preliminares analisaram e correlacionaram os seguintes parâmetros na Estação Experimental: pluviometria, medida do nível hidrostático, granulometria, medidas diretas da permeabilidade em laboratório e campo e medidas de carga hidráulica com os tensiômetros.

Das pesquisas, eles concluíram que a infiltração da água da chuva é controlada primeiramente pela permeabilidade e conseqüentemente pela litologia e granulometria e posteriormente pela topografia.

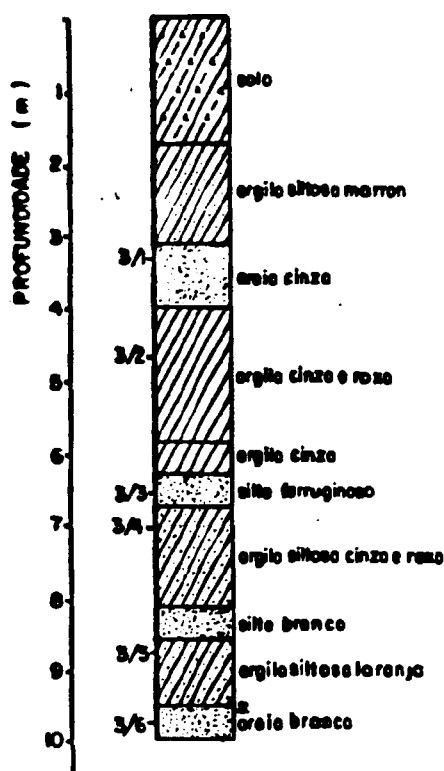


FIGURA 10.1. Perfil da Estação Experimental (SZIKSZAY, 1980).

#### 10.1.2. Trabalho Experimental

Para estudo do movimento da umidade do solo com traçador, foi feita uma injeção de trítio artificial na forma de água tritiada em 17/12/85, em cinco conjuntos de injeção cada conjunto tendo cinco pontos distanciados 1m um do outro, em linha reta, na parte da frente da Estação Experimental.

Em cada ponto foi injetado 2,5ml de água tritiada a uma concentração de  $4,44 \times 10^4$  Bq/ml ( $1,2 \mu\text{Ci/ml}$ ), totalizando  $55,5 \times 10^4$  Bq ( $15,0 \mu\text{Ci}$ ) de trítio.

A profundidade de injeção foi de 70cm, por causa das raízes profundas do local.

Foi realizada uma amostragem em 20/05/86, 5 meses após a injeção como um trado mecânico de 3", MB/L da Trado Equipamentos e Serviços Ltda, acoplado a um moto a gasolina, de fabricação nacional marca Honda, 1,006kg/m de torque com sistema de descompressão automático e governador científico de acelerador, e um guia.

Esta amostragem foi feita até 7,15m de profundidade.

A densidade média foi medida no local sendo determinado o valor de  $1,78\text{g/m}^3$ .

As amostras de solo foram colocadas em frascos de polietileno, bem tampados e levadas ao laboratório para determinação do conteúdo de trítio e de umidade.

A Figura 10.2 apresenta o perfil de trítio e de umidade para esta amostragem.

O centro de gravidade do perfil do conteúdo de trítio foi de 326,3cm.

A partir dos perfis de trítio e de umidade, calculou-se a recarga, obtendo-se 60cm para 5 meses após a injeção.

Nesta experiência foi realizada apenas uma amostragem, não sendo possível completar um ciclo de chuva (um ano) por que tivemos, inicialmente um problema de "enchente" no local e posteriormente, foi passada uma máquina neste local, perdendo assim a localização exata dos pontos de injeção do traçador.

### 10.1.3. Discussão dos resultados

A injeção de trítio no Viveiro foi realizada no meio de dezembro, exatamente na época das chuvas de verão (outubro/janeiro) onde as camadas superiores de solo estão bem úmidas e deve predominar a infiltração da umidade do solo para as camadas mais profundas.

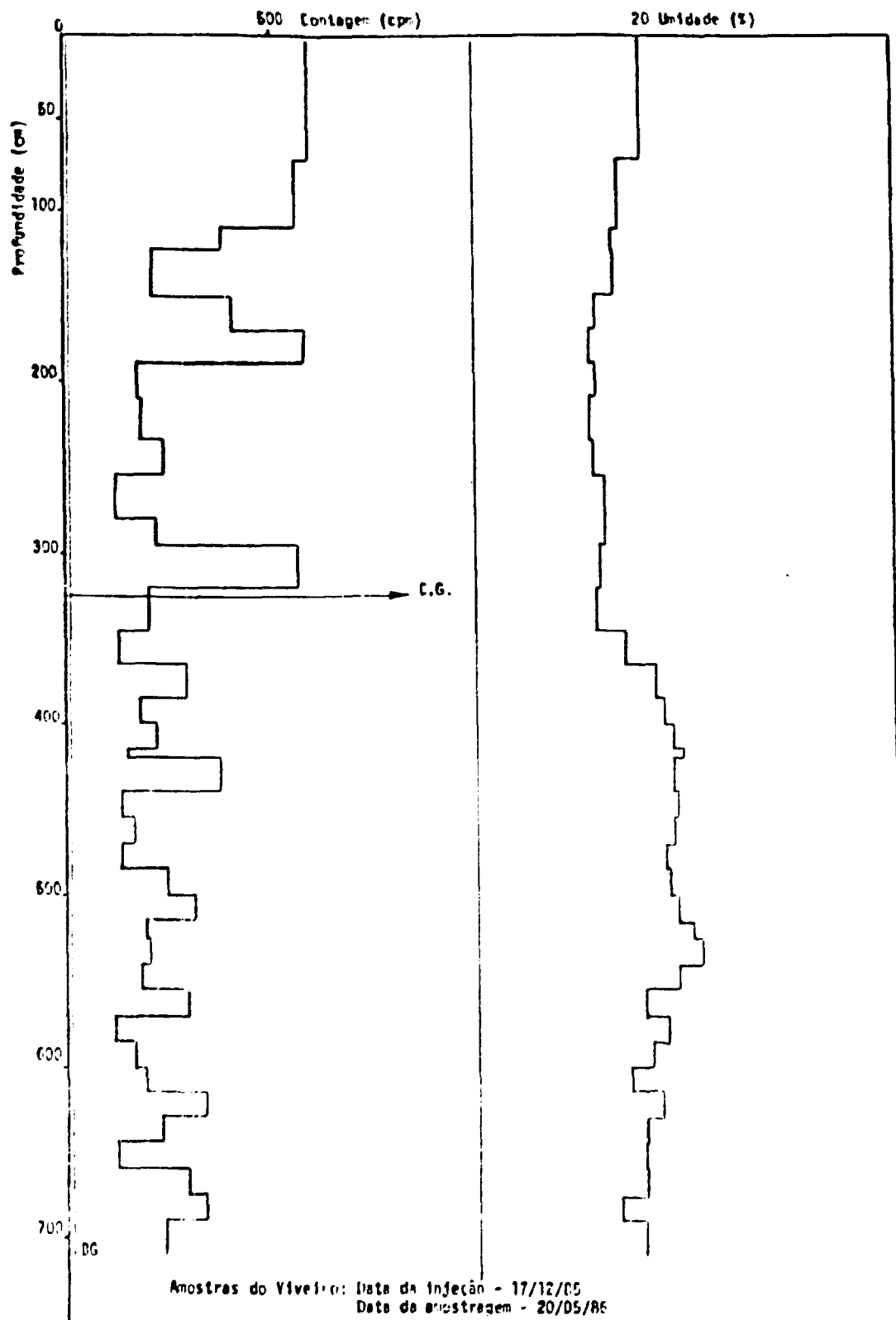


FIGURA 10.2. Perfil de trítio e de umidade após 5 meses da injeção (Viveiro/USP).

MARY SZIKSZAY et alli (1987) observaram que nas épocas de chuva prolongada, a linha de fluxo nulo pode aprofundar-se para até 1,5m e que durante a época das chuvas, ou seja, nos meses de janeiro, fevereiro e março, esta desaparece, por que há predomínio da infiltração. Porém, esta infiltração está várias vezes interrompida quando as chuvas cessam e novamente a linha de evaporação oscila, dependendo da precipitação momentânea.

A amostragem feita em maio de 1986 apresenta dois picos de trítio, em torno de 2m e 3m, coincidindo com a camada argilosa que possui permeabilidade mais baixa, retardando assim, o movimento da frente de umidade.

O centro de gravidade do perfil do conteúdo de trítio foi de 3,26m, significando que a maior parte do trítio, portanto, a umidade do solo, demorou 5 meses para se deslocar de 70cm de profundidade para 326cm.

Nota-se ainda por este perfil, que uma pequena quantidade de trítio chegou até 7,00m de profundidade. Como o pico do trítio pode ser alargado por causa de vários fatores como difusão, irregularidades na precipitação e dispersão da linha reta, o centro de gravidade do perfil corresponde à posição média da camada marcada.

O solo, obviamente é suficientemente homogêneo e o movimento vertical da água é suficientemente lento para permitir uma mistura lateral efetiva entre as porções de água de solo de diferentes velocidades de fluxo.

A amostragem foi feita com um trado mecânico, que minimizou os problemas de contaminação do solo das camadas mais profundas com a colocação e retirada do trado no buraco.

A amostragem do solo foi feita em maio onde a evaporação supera a precipitação. Isto pode explicar conteúdos relativamente altos de trítio acima de 70cm de profundidade.

No próprio processo de injeção pode haver contaminação de trítio nas camadas superiores a 70cm. A injeção foi feita na época das chuvas, no verão, onde a precipitação é alta e a evaporação também é relativamente alta, havendo uma competição entre esses processos, mas como no mês de janeiro ainda chove muito, provavelmente, se houve contaminação na injeção, esta contaminação deve ter sido mascarada.

O valor encontrado para recarga, é alto, 60cm em 5 meses. Mas, deve-se notar que este valor corresponde à época das chuvas onde predomina a infiltração. Deve ser notado também que a recarga anual não é linear, portanto não pode ser extrapolado um valor para a recarga para um ciclo de chuva.

## 10.2. CAJATI - JACUPIRANGA

### 10.2.1. Dados gerais sobre a área de estudo

O distrito de Cajati fica a  $\approx$  12km da cidade de Jacupiranga e cerca de 230km de São Paulo, às margens da BR-116, trecho São Paulo - Curitiba, fazendo parte do Vale do Ribeira.

#### Clima e vegetação do Vale

O zoneamento agrícola do estado de São Paulo, elaborado em 1974, pela Secretaria da Agricultura, mostra as peculiaridades do clima regional dentro do território estadual (Comissão de Zoneamento Agrícola do Estado de São Paulo, 1974), (QUEIROZ NETO, 1983).

O clima da região enquadra-se na classificação de tipos quentes e úmidos, sem estiagem, com temperaturas médias anuais variando de 20 a 22°C.

As precipitações são elevadas quando comparadas às

outras regiões do estado. O total anual de chuvas, com média ponderada de 1900mm para a região toda, varia desde 1400mm na parte mais interior da baixada do Ribeira, até 3500mm na parte inferior da encosta da Serra do Mar, nos trechos onde ela se aproxima mais da costa. No geral, a pluviosidade total aumenta com a altitude, mas diminui com o afastamento da costa. A partir dos índices climáticos o clima pode ser definido como sub e semi-úmido na parte central e super-úmido nas encostas.

A umidade relativa anual é superior a 85% na parte litorânea e a 80% nas serras.

Caracteriza-se, assim um clima quente e úmido, sem estação seca, para a parte essencial do Vale do Ribeira. O clima torna-se mais fresco nas partes mais elevadas, permanecendo úmido.

#### Localização

O local de estudo está situado no Complexo de Jacupiranga que corresponde a uma região erodida e ondulada com altitudes variando de 40 a 330m acima do nível do mar.

O clima da região é úmido e quente, com temperaturas médias mensais entre 15 a 25°C e precipitação média anual de  $\approx 1650$ mm. (PFISTERER, 1989).

#### Geologia Geral

O local em que foi realizada a experiência pertence ao maciço alcalino de Jacupiranga que consiste de uma associação de rochas ultramáficas, alcalinas e carbonáticas como mostra a Figura 10.3 (FRIEDRICH, 1988).

As rochas predominantes são os dunitos, constituídos de olivina, serpentina, cromita e magnetita; e os jacupirangitos formados de titanogaugita, magnetita e perovibita, que cobrem uma área de aproximadamente 70% do complexo. Estas ro-

chas foram submetidas à alteração intempérica resultando em um espesso manto laterítico com mais de 40m de espessura.

Fisiograficamente, os dunitos formam um platô pouco dissecado com altitudes máximas da ordem de 190m enquanto que os jacupiranguitos constituem colinas com altitudes de até 50m.

#### Geologia local

O estudo foi efetuado no solo de laterito correspondente à porção litológica do dunito.

A Figura 10.4 (OLIVEIRA, 1988) apresenta o perfil de alteração do dunito, composto de três zonas:

a) laterito; é uma zona homogênea, constituída de finos grãos de caolinita, geothita e quartzo. Não apresenta qualquer estrutura original e tem aproximadamente 13m de espessura.

b) Si-boxwork: é uma zona muito heterogênea formada de quartzo e geothita, e possui espessura de cerca de 13m.

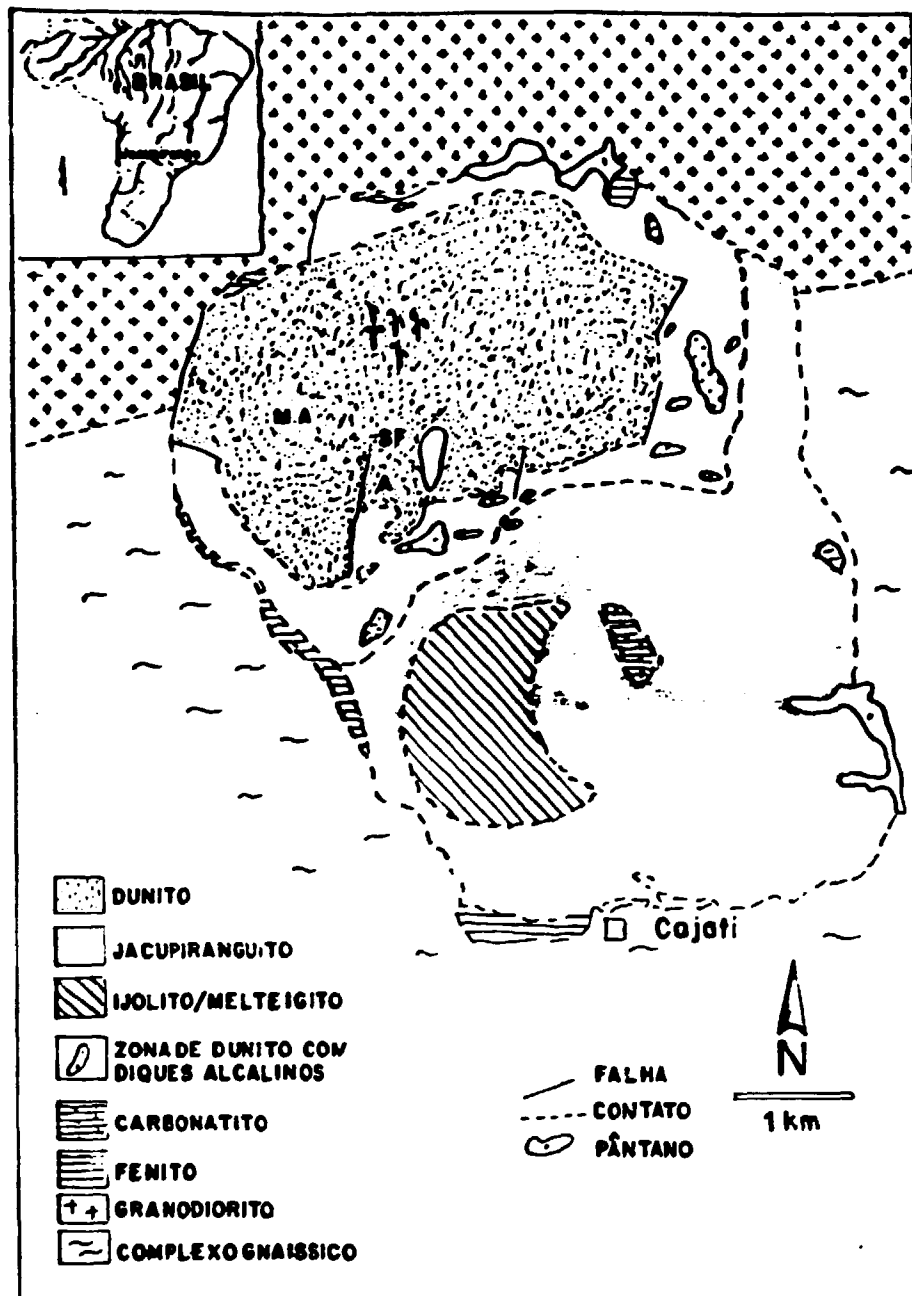
c) saprolito: situado à profundidades acima de 26m, é formado de serpentina, esmectita e quartzo.

#### 10.3.2. Parte experimental

Este estudo faz parte de um trabalho conjunto com a CEPAS/USP para estudo do laterito.

A injeção de trítio foi realizada em 14/04/88. Foram realizados 5 conjuntos de injeção de acordo com o esquema da Figura 10.5. Cada conjunto tendo 5 pontos de injeção. Em cada ponto foram injetados 2,5ml de água tritiada a uma concentração de  $5,55 \times 10^4$  Bq/ml ( $1,5 \mu\text{Ci/ml}$ ), totalizando  $70,3 \times 10^4$  Bq ( $19 \mu\text{Ci}$ ).

A profundidade de injeção foi de 50cm, já que na plantação de bananas as raízes não são profundas.



SF-FAZ. SÃO FRANCISCO

M.A-FAZ. MONTE ALEGRE

A.-LOCAL DE INJEÇÃO

FIGURA 10.3. Mapa Geológico do maciço alcalino de Jacupiranga  
(FRIEDRICH, 1988)

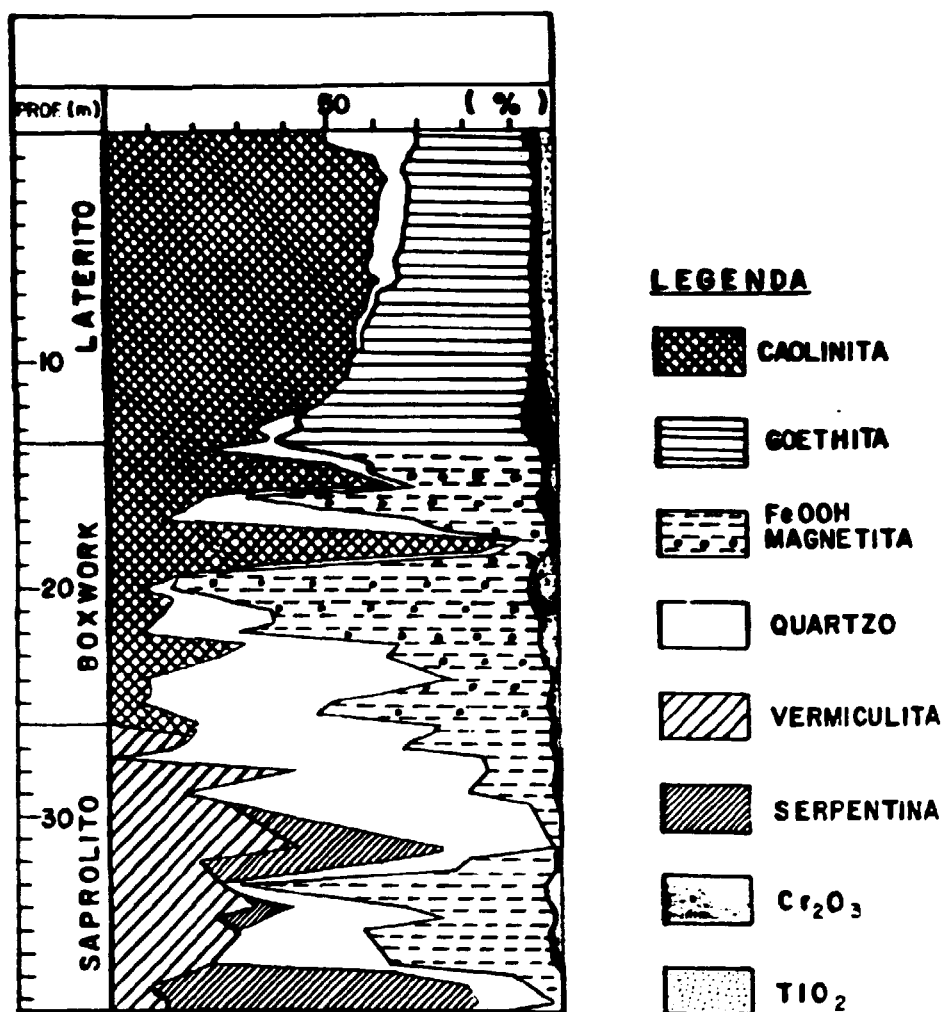


FIGURA 10.4. Perfil de alteração do dunito (OLIVEIRA, 1988)

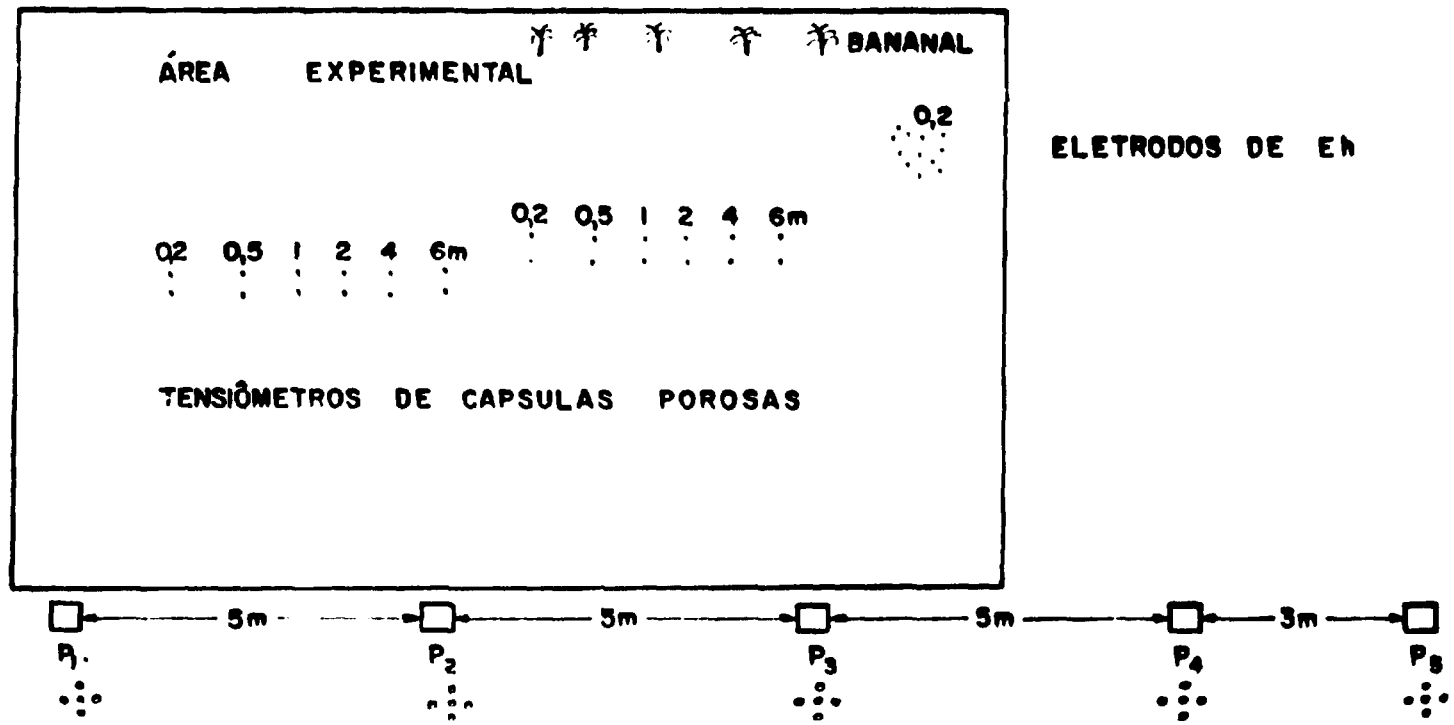


FIGURA 10.5. Localização dos pontos de injeção de trítio. Fazenda São Francisco - Cajati  
 Profundidade de injeção: 50cm

Nesta experiência, os tubos de latão foram substituídos por tubos de aço inox que apresentaram melhores condições de trabalho, pois os tubos de latão entortavam muito.

A distância entre os conjuntos de injeção foi aumentada para 5m para evitar qualquer possível interferência de um conjunto para outro.

As amostragens foram realizadas com um trado manual de 3" de diâmetro. Essas amostragens foram realizadas 1, 6, 9 e 12 meses após a injeção, totalizando 155 amostras analisadas.

As amostragens foram realizadas nas seguintes datas:

1º) amostragem: 26/05/88

2º) amostragem: 26/10/88

3º) amostragem: 30/01/89

4º) amostragem: 05/04/89

As amostras de solo foram pesadas no campo para a determinação da densidade global média.

As amostras de solo de 10 em 10cm de profundidade, foram colocadas em frascos bem tampados e levados ao laboratório para determinação do conteúdo de trítio e de umidade.

As Figuras 10.6, 10.7, 10.8 e 10.9 indicam o perfil de trítio e de umidade, respectivamente para 1, 6, 9 e 12 meses após a injeção.

A Tabela 10.1 apresenta os dados do movimento da umidade do solo para o local.

O deslocamento do trítio foi de  $\approx 1,90\text{m}$  em um ano, considerando-se que o nível d'água está a  $\approx 10\text{m}$ , a água da chuva levará  $\approx 5$  anos para alcançar o aquífero.

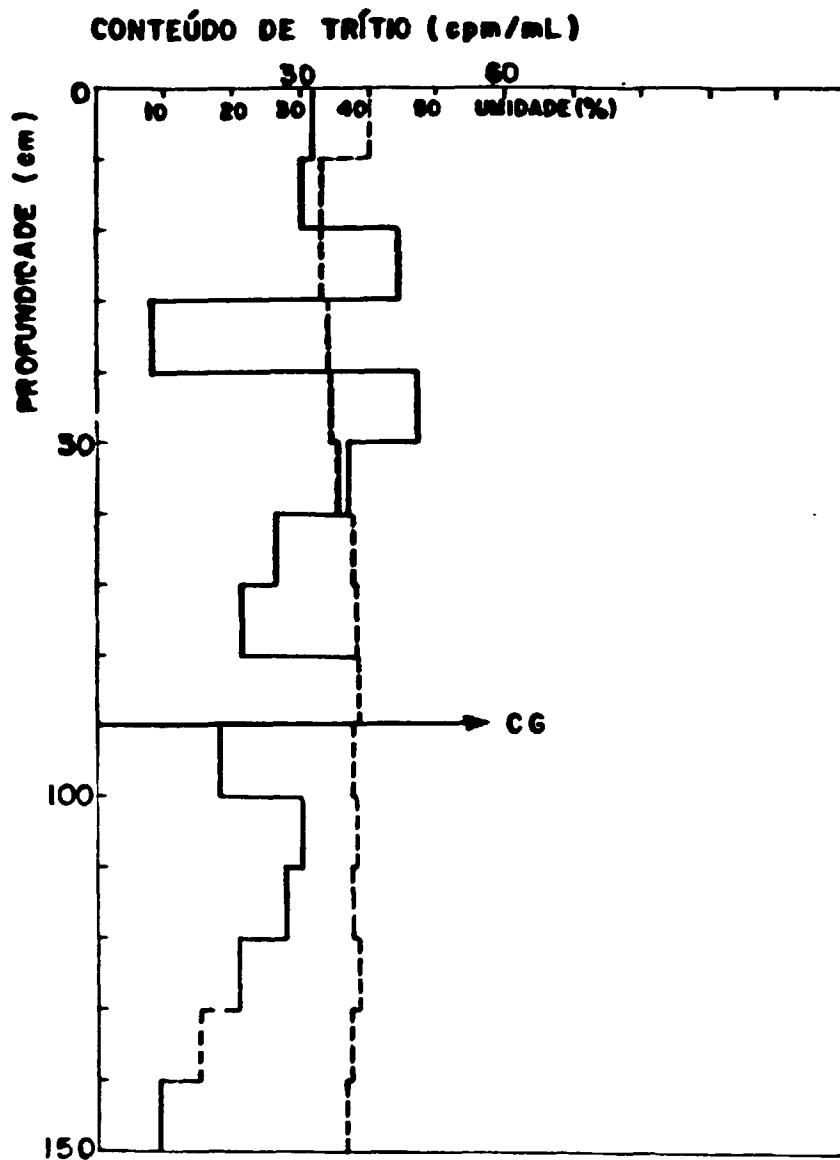


FIGURA 10.6. Perfil de trítio e de umidade após 1 mês da injeção - Cajati.

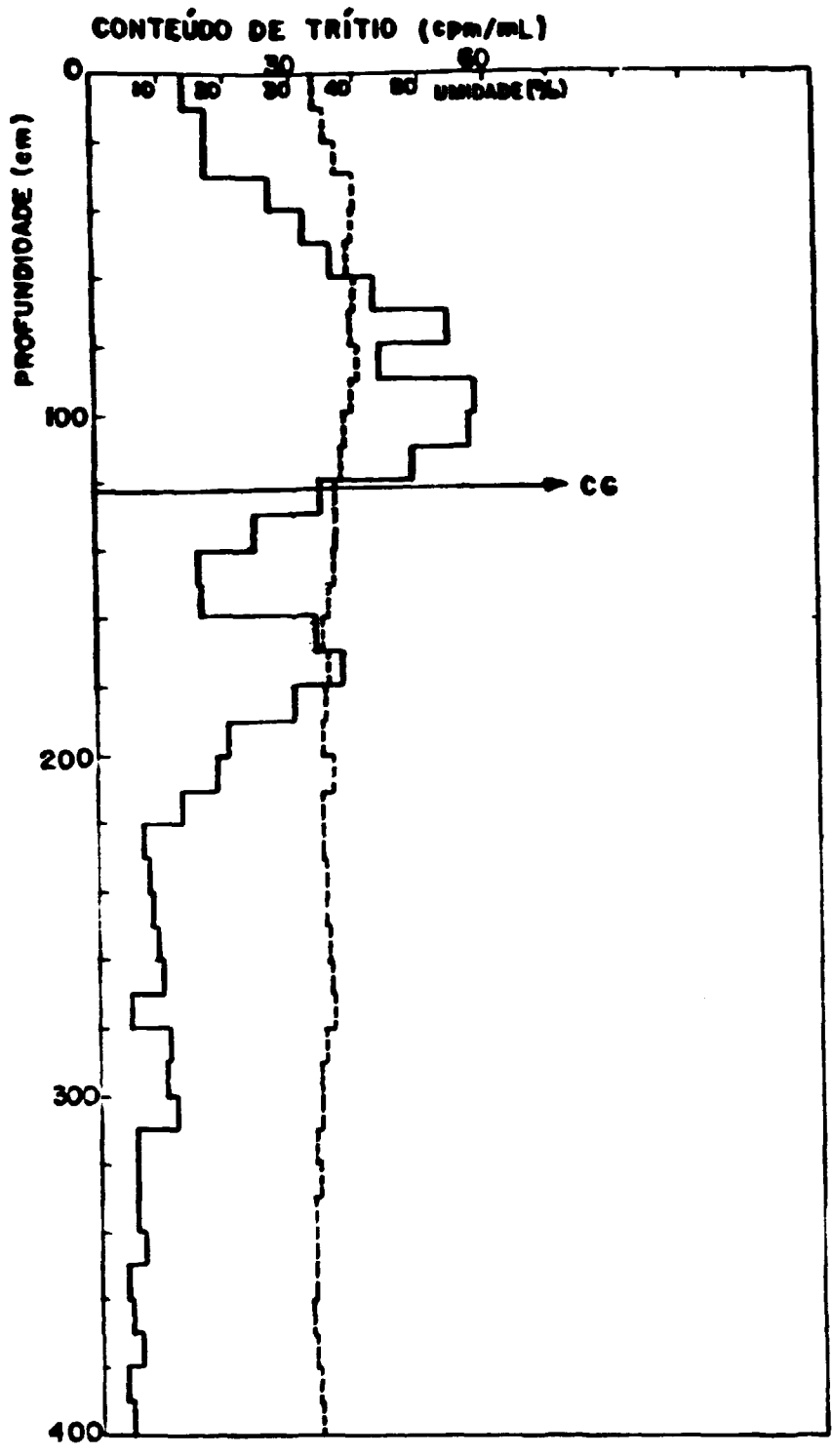


FIGURA 10.7. Perfil de trítio e de umidade após 6 meses da injeção - Cajati.

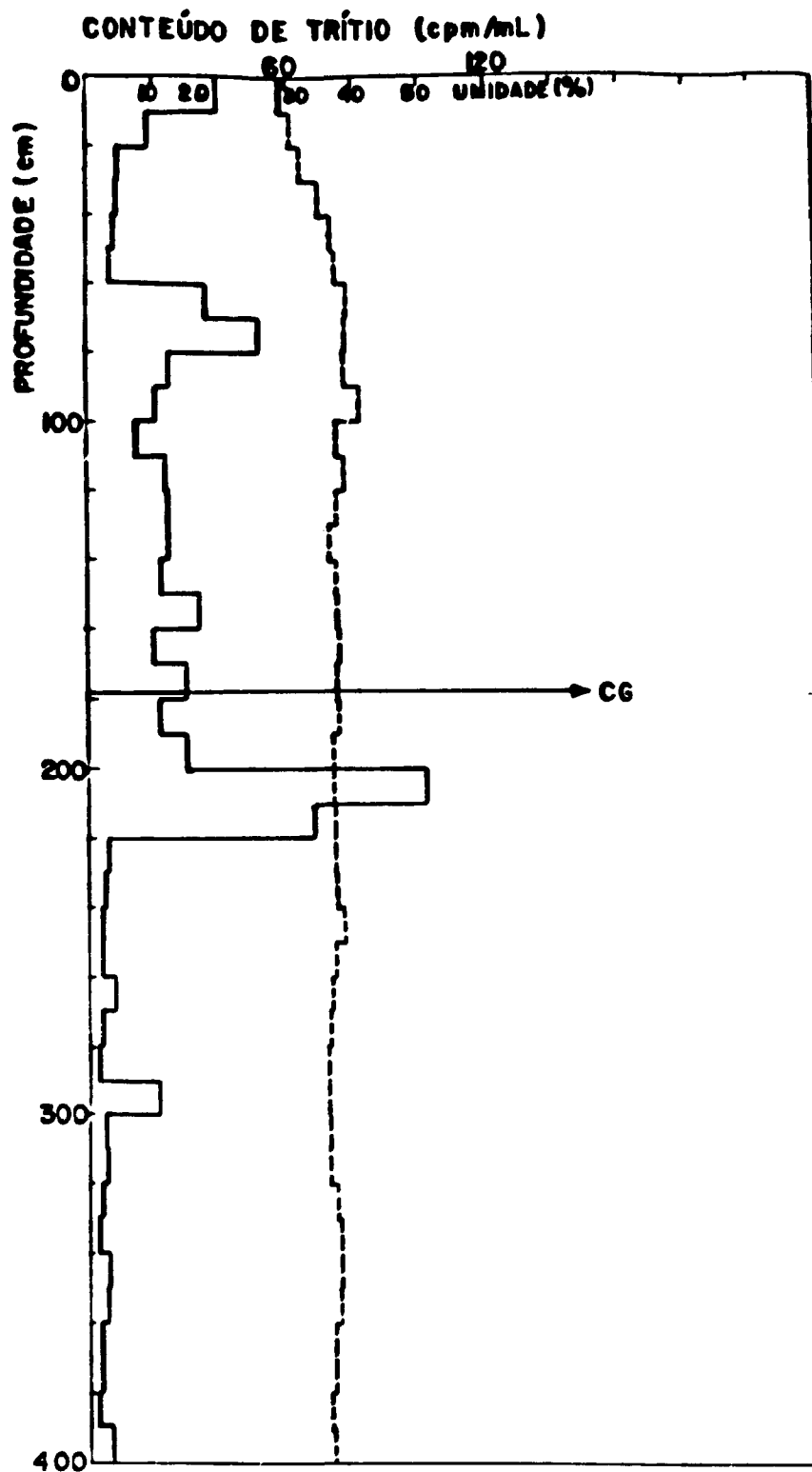


FIGURA 10.8. Perfil de trítio e de umidade após 9 meses da injeção - Cajati.

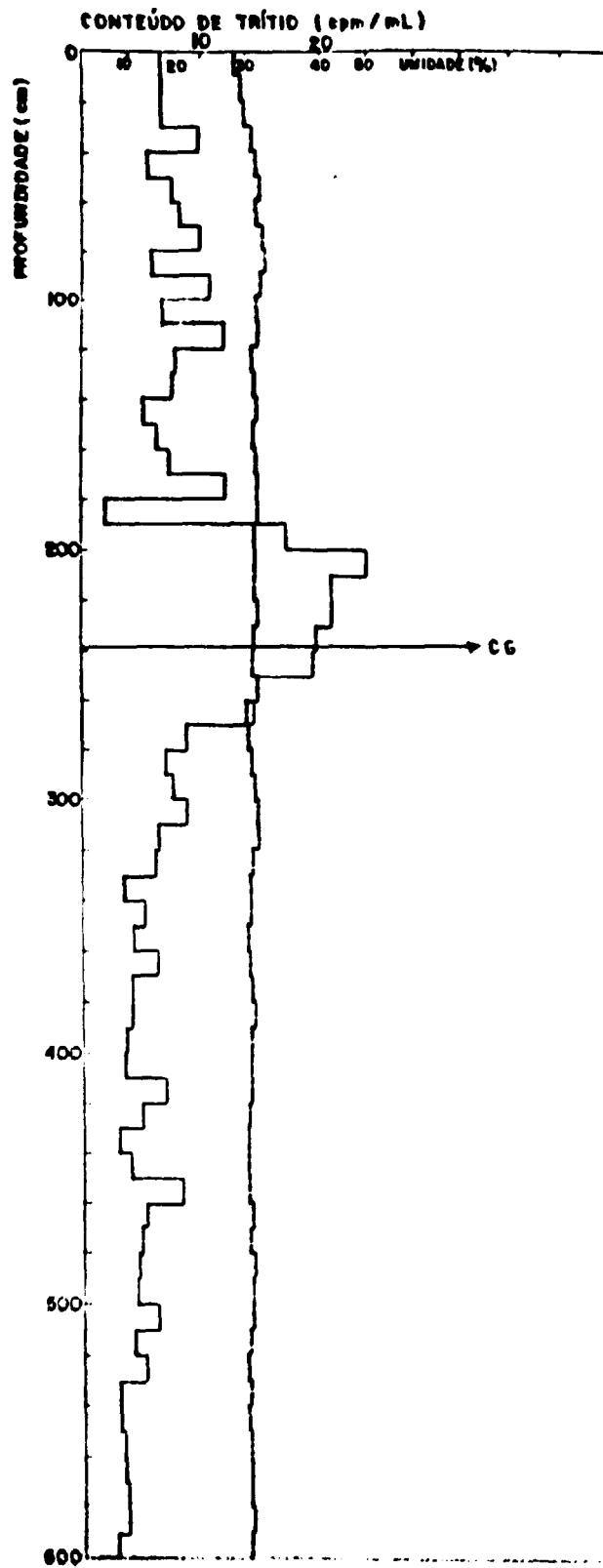


FIGURA 10.9. Perfil de trítio e de umidade após 12 meses de injeção - Cajati.

TABELA 10.1. Dados do movimento da unidade do solo e recarga do aquífero em Cajati  
(abril de 1988 a abril de 1989) Data da injeção de trítio: 14/04/88

Data da amostragem	Deslocamento do trítio (cm)	Centro de gravidade (CG) em cm	Densidade global média do solo ( $\text{g/cm}^3$ )	Conteúdo de unidade média do solo (% em peso) (50cm - CG)	Recarga (cm)	Precipitação (mm)	Porcentagem de infiltração (%)
26/05/88	37,5	89,7	2,28	37,3	24,6	128	-
26/10/88	72,6	122,6	1,96	38,6	39,6	603	65,7%
30/01/89	127,8	177,8	2,46	38,0	86,6	1170	74,0%
05/04/89	190,3	240,3	2,10	36,6	107,1	1650	64,0%

### 10.2.3. Discussão dos resultados

Obteve-se para este local uma recarga de 1070mm o que corresponde a aproximadamente 65% da precipitação local, que é da ordem de 1650mm. Pode-se considerar que o restante da precipitação é perdido por evaporação, evapotranspiração e escoamento superficial.

Esta alta infiltração pode ser explicada pelo local em estudo. Trata-se de uma região com clima quente e úmido, praticamente sem estiagem, com precipitações elevadas, o solo local tendo alto conteúdo de umidade, em torno de 38%. Além disso, a cobertura vegetal é muito importante. A injeção de trítio foi feita numa fazenda de plantação de bananas, que diminui muito a evaporação direta.

Durante a estação quente e seca, uma grande fração do traçador pode ser perdida por evaporação da superfície do solo. Como o clima neste local é muito úmido, a taxa de evaporação deve ser menor.

A injeção do trítio foi realizada num local bem plano, o que diminui o escoamento superficial.

Um dos fatores mais importantes que influenciam a recarga é a condição antecedente da umidade do solo. A umidade deste solo, durante o ano todo, permaneceu alta, provavelmente acima da capacidade de campo, facilitando a infiltração. Quando a precipitação se infiltra nas camadas superiores do solo, inicialmente é preenchida a sua deficiência de umidade, depois a água começa a infiltrar para as camadas mais profundas por fluxo em pistão.

A partir dos valores de deslocamento de trítio encontrados para 1, 6, 9 e 12 meses após a injeção, nota-se que de junho a outubro, proporcionalmente, a infiltração é menor que nos meses de janeiro a abril, quando a precipitação é um pou-

co mais elevada.

É importante notar que este solo é bem homogêneo, permitindo uma boa extrapolação da taxa de infiltração obtida nas camadas superiores, para as camadas mais profundas, até o nível d'água.

### 10.3. CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos conclui-se que a técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial pode ser aplicada também em terrenos sub-tropicais úmidos, apresentando perfis de conteúdo de trítio mais bem definidos que em zonas semi-áridas.

## CAPÍTULO XI

### CONCLUSÕES

A técnica de marcação da umidade do solo é uma ferramenta útil, precisa e disponível para fornecer informações complementares e em alguns casos, informação única para os hidrogeologistas, potencialmente importantes no planejamento de recursos hídricos.

A medida da recarga é essencial para uma utilização racional dos recursos hídricos. É necessário ter uma completa cobertura de um país.

A técnica do trítio artificial é muito prática para estudar a recarga de aquíferos por causa da facilidade de operação.

Em locais inclinados, podem-se fazer correções para o movimento lateral da água com modificações no projeto de injeção, como por exemplo, fazer injeção num plano vertical, em vez do horizontal. É importante considerar que a estimativa da recarga por trítio artificial representa somente o componente vertical da recarga.

Na maioria dos locais estudados, a maior fonte de recarga para os aquíferos é a precipitação. Desde que a precipitação é irregularmente distribuída no tempo e no espaço, o mesmo acontece com a recarga. Pode-se concluir também, dos resultados obtidos, que a quantidade de precipitação que alcança a zona de saturação depende de vários fatores, tais como, a deficiência de umidade do solo, a profundidade do nível d'água, a intensidade, duração e distribuição da precipita-

---

ção, o uso da terra, as propriedades físicas do solo, a vegetação, a topografia, a temperatura do ar, a velocidade do vento, a evaporação, a evapotranspiração etc.

Desde que estes fatores variam significativamente de bacia para bacia, e algumas vezes dentro da própria bacia, uma extrapolação de valores de recarga de uma região para outra pode levar a resultados errôneos; portanto, é importante estudar cada região individualmente.

A aplicação da técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial em locais com diferentes tipos de climas, permite concluir que ela pode ser aplicada, independentemente do tipo de clima de uma região.

A aplicação desta técnica na avaliação de locais para disposição de rejeitos radioativos, é muito útil. Um armazenamento seguro é determinado pelas características hidrogeológicas do solo, os quais influenciam grandemente a migração de materiais radioativos. O movimento da umidade do solo tem um papel importante no processo de migração quanto o material radioativo se espalha num local.

As principais vantagens desta técnica, são: não causa mudanças nas condições naturais, pode ser aplicada no campo sem requerer equipamentos sofisticados e, em geral, tem um custo total relativamente baixo. As dificuldades aparecem quando o solo é muito arenoso, quando existem rochas ou quando existem raízes muito profundas, mas estes problemas também existem para os outros métodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, Y.J.; KUMAR, B.; SINGH, B.P. Study of soil moisture movement using tritium. In: INDIA DEPARTMENT OF ATOMIC ENERGY. Nuclear techniques in hydrology: proceedings of the workshop on... held in Hyderabad, 19-21 March 1980. s.l., s.d. p. 138-44.
- ALLISON, G.B. & HUGUES, M.W. Environmental tritium in the insaturated zone: estimation of recharge to an unconfined aquifer. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotope techniques groundwater hydrology: proceedings of a symposium on... held in Vienna, 11-15 March 1974. Vienna, 1974, v.1, p. 57-72.
- AOKI, F.E. Metodologia das determinações da velocidade, direção e sentido do fluxo da água subterrânea, com utilização de traçadores radioativos. São Paulo, 1983. (Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Univ. São Paulo).
- ATAKAN, Y.; ROETHER, W.; MUNNICH, K.O.; MATTHESS, G. The sandhausen shallow-groundwater tritium experiment. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotope hydrology: proceedings of a symposium on... held in Vienna, 11-15 March 1974. Vienna 1974. v.1, p. 21-43.
- ATHAVALE, R.N. Injected radioactive tracers in studying indian geohydrological problems. Present status and future needs. In: INDIA. DEPARTMENT OF ATOMIC ENERGY. Nuclear techniques in hydrology: proceedings of the workshop on... Hyderabad, 19-21 March 1980. s.l., s.d. p. 59-91.
- ATHAVALE, R.N.; CHAND, D.R.; RANGARAJAN, R. Groundwater recharge estimates for two basins in the Deccan Trap basalt formation. Hydrol. Sci. J., 28(4):525-39, 1983.
-

- ATHAVALE, R.N.; MURTI, C.S.; CHAND, R. Estimation of recharge to the phreatic aquifers of the lower Maner Basin, India, by using the tritium injection method. J. Hydrol., 45:185-202, 1980.
- BAHADUR, J.; ARORA, R.P.; MUKHERJEE, P.; BHAKTA, R.N. Tritium tracer technique for study of water movement in alluvial soils. INDIA. DEPARTMENT OF ATOMIC ENERGY AGENCY. Use of radiations and radioisotopes in studies of plant productivity: proceedings of a symposium on... held in Pantnagar, 12-14 April 1974. Bombay, s.d. p. 282-92.
- BEAR, J. Hydraulics of groundwater. New York, NY, McGraw Hill, 1979.
- BEDMAR, A.P. Isotopos em hidrologia. Madrid, Alhambra, 1972.
- BENGTSSON, L.; SAXENA, R.K.; DRESSIE, Z. Soil water movement estimated from isotope tracers. Hydrol. Sci. J., 32(4):497-520, 1987.
- BHANDARI, N.; DATTA, P.S.; GUPTA, S.K. Groundwater velocity around Pokhran and confinement of radioactivity produced by the nuclear explosion. In: GUPTA, S.K. & SHARMA, P. Current trends in arid zone hydrology. s.l., 1978. p. 127-35. (Pres. on symposium on study and management of water resources in arid and semi-arid regions, Ahmedabad, 5-6 April 1978).
- BLUME, H.P.; ZIMMERMANN, U.; MUNNICK, K.O. Tritium tagging of soil moisture the water balance of forest soils. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies: proceedings of a symposium... held in Istanbul, 12-16 June 1967. Vienna 1967. p. 315-32.
- BONKA, H. Production and emission of tritium from nuclear facilities and the resulting problems. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Behaviour of tritium in the environment: proceedings of the international symposium on... held in San Francisco, 16-20 October 1978. Vienna 1979. p. 105-23. (IAEA-SM-232/12)

- CHANDRA, U. Studies on exchange and movement of isotopes in soil and water media. Bombay, India, 1978. (Ph.D. Thesis, Univ. Bombay).
- CHANDRA, U. & POLI, D.C.R. Hydrological evaluation of radioactive waste disposal site at IPEN: study of movement of soil moisture and groundwater recharge by artificial tritium tagging method. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Águas subterrâneas: anais do congresso brasileiro sobre... realizado em Recife, nov. 1980. s.n.t. p. 545-55.
- CHARAMATHIEU, A. Le tritium en radioprotection. Gif-sur-Yvette, CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, 1968. (CEA-BIB-131)
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, 1 ago. 1988. (CNEN-NE-3.01).
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Licenciamento de instalações radioativas. Rio de Janeiro, 14 dez. 1984 (CNEN-NE-6.02).
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Normas básicas de proteção radiológica. Rio de Janeiro, 19 set. 1973, (CNEN-NE-6/73).
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Água subterrânea e poços tubulares. São Paulo, 1978.
- COREY, J.C. Contribution of tritiated water at various depths in soil to evaporation at the soil surface. Aiken, SC, Du Pont de Nemours, Jan. 1968. (DP-MS-67-95).
- CRAIG, H. Distribution, production rate, possible solar origin of natural tritium. Phys. Rev., 105(3):1125-7, 1957.
- CRITERIA for selection and operation on a regional waste burial facility. Washington, DC, USAEC, Jan. 1960.
- DATTA, P.S. Indian contribution to applications of artificially inject tritium in hydrological investigations. In: INDIA

DEPARTMENT OF ATOMIC ENERGY. Nuclear techniques in hydrology: proceedings of the workshop on... held in Hyderabad, 19-21 March 1980. s.l., s.d., p. 145-63.

DATTA, P.S. & COEL, P.S. Groundwater recharge in Panjab state (India) using tritium tracer. Nord. Hydrol., 8:225-36, 1977.

DATTA, P.S. & GUPTA, S.K. Soil moisture movement and groundwater recharge by tritium tagging technique. Discussion. Curr. Sci., 47(2):51, 1978.

DATTA, P.S.; DESAI, B.I.; GUPTA, S.K. Comparative study of groundwater recharge rates in parts of Indo-Gangetic and Sabarmati alluvial plains. Mausam, 30(1):129-33, 1979.

DATTA, P.S.; DESAI, B.I.; GUPTA, S.K. Hydrological investigations in Sabamarti Basin. I. Groundwater recharge estimation using tritium tagging method. Proc. Indian Natl. Sci. Acad., Part A, 46(1):84-98, 1980.

DATTA, P.S.; GOEL, P.S.; RAMA, F.A.; SANGAL, S.P. Groundwater recharge in Western Utta Pradesh. Proc. Indian Acad. Sci., Sect. A, 78:1-12, 1973.

DATTA, P.S.; GUPTA, S.K.; SHARMA, S.C. A conceptual model of water transport through insaturated soil zone. Mausam, 31(1):9-18, 1980.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Boletim hidrometeorológico nº 10. São Paulo, 1979.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Boletim hidrometeorológico nº 11. São Paulo, 1980.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Boletim hidrometeorológico nº 12. São Paulo, 1981.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Boletim hidrometeorológico nº 13. São Paulo, 1982.

---

- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Final report of the federal task force for hazardous material management of the Western Federal Regional Council Region 9. Washington, DC, Mar. 1978.
- ESTUDO hidrogeológico no IEA para a divisão de assessoria de obras. São Paulo, Pesquisas Hidrogeológicas, Mar. 1972. (Relatório HSE-1/72).
- EVANS, E.A. Tritium and its compounds. London, Butterworth, 1974.
- FODOR-CSANYI, P.; KASZA, J.; FEHER, L.; BERCI, K. Movement of tritium-labelled water in soils. Int. J. Appl. Radiat. Isot., 36(3):209-13, 1985.
- FRIEDRICH, G. & KANIG, M. Geochemie und mineralogie lateritischer Boden in gebiet von Jacupiranga, Brasilien. West Germany, Technical University of Aachen, Aug. 1988. (Rheinisch-westalische DFG-Forschungsvorhaben Fr 240/47-1).
- GARCEZ, L.N. Hidrologia. São Paulo, SP, Edgard Blücher, 1967.
- GEE, G. & HILLEL, D. Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods. Hydrol. Processes, 2:255-66, 1988.
- GODSE, V.B.; KHAN, Z.A.; PAWAR, V.M. Determination of hydrological parameters using active tracers at radioactive waste burial site-tarapur. In: INDIA. DEPARTMENT OF ATOMIC ENERGY. Nuclear techniques in hydrology: proceedings of the workshop on... held in Hyderabad, 19-21 Mar. 1980. s.l., s.d. p.115-37.
- GOEL, P.S.; DATTA, P.S.; TANWAR, B.S. Measurements of vertical recharge to groundwater in Haryana state (India) using tritium tracer. Nord. Hydrol., 8:211-24, 1977.
- GUPTA, S.K. & SHARMA, P. Soil moisture transport through the unsaturated zone: tritium tagging studies in Sabamarti basin, Western India. Hydrol. Sci. J., 29:2-6, 1984.
-

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. São Paulo, 1982. (IPT-15795).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic safety standards for radiation protection. Vienna, 1982. (IAEA-SS-9)
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Handbook on nuclear activation. Vienna, 1987. (Technical report series, 273).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Shallow ground disposal of radioactive wastes. Vienna, 1981. (IAEA-SS-53).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Tritium in some typical ecosystems. Vienna, 1981. (Technical report series, 207).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Underground disposal of radioactive wastes. Vienna, 1981. (IAEA-SS-54).
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Limits for intakes of radionuclides by workers. Oxford, 1982. (ICRP-30).
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Washington, DC, Jan. 17, 1977. (ICRP-26).
- JACOBS, D.G. Sources of tritium and its behavior upon release to the environment. Oak Ridge, TN, USAEC, 1968.
- JORDAN, C.F.; STEWART, M.L.; KLINE, J.R. Tritium movement in soils: the importance of exchange and high initial dispersion. Health Phys., 27:37-43, 1974.
- JOUZEL, J.; POURCHET, M.; LORIEUX, C.; MERUVAT, L. Artificial tritium fall-out at the south pole. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Behavior of tritium in the environment: symposium on... held in San Francisco, 16-20 Oct. 1978. Vienna, 1979. p. 31-46. (IAEA-SM-232/38)
- LEDERER, C.M. & SHIRLEY, V.S., eds. Table of isotopes. 7. ed. New York, NY, John Wiley, 1978.

- MARCELINO, S. Avaliação geohidrológica do local para estocagem dos rejeitos radioativos do IPEN/CNEN/SP. São Paulo, 1983. (Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- MEYER, G.L. EPA views on selection of site for land disposal for low-level waste. In: YALCINTAS, M.G. & JACOBS, D.G. comps. Low-level waste disposal: symposium on... held in Arlington, Va., 8-9 December, 1981. Oak Ridge, TN, 1982. v.1, p. 31-54. (NUREG/CP-0028).
- MORGAN, J.R. Considerations in evaluating a burial ground for solid wastes. In: TECHNICAL INFORMATION SERVICE EXTENSION. Sanitary engineering aspects of the atomic energy industry: seminar on... held in Cincinnati, Ohio, 6-9 Dec. 1955. Oak Ridge, TN, 1956. p. 243-9. (TID-7517 Pt. IA).
- MUNNICH, K.O. Moisture movement in the unsaturated zone. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Vienna, 1983. p. 203-22. (Technical report series, 91).
- MUNNICH, K.O. Moisture movement measured by isotope tagging. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Vienna, 1968. p. 112-8 (Technical reports series, 91).
- MUNNICH, K.O. Use of nuclear techniques for the determination of groundwater recharge rates. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Vienna, 1968. Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Vienna, 1968. p. 191-7. (Technical reports series, 91).
- NALIMOV, V.V. The application of mathematical statistics to chemical analysis. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1963.
- NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. Tritium in the environment. Washington, DC, Mar. 9, 1979. (NCRP 62).
- NIGAM, D.D.; SAXENA, R.C.; BHISHM, K. A method of calculating recharge to groundwater and flow of groundwater from or to rivers using tritium. In: INDIA. DEPARTMENT OF ATOMIC ENERGY. Nuclear techniques in hydrology: proceedings of the workshop on... held in Hyderabad, 19-21 Mar. 1980. s.l., s.d. p. 92-102.
- NORTON, F.I. Estimating evapotranspiration from potential

evaporation: practicality of an iconoclastic approach.

J. Hydrol., 38:1-32, 1978.

NWTS conceptual reference repository description. v. 3: criteria, bases, special studies and codes. São Francisco, CA, Bechtel Group, May 1981. (CONWI-258).

OIKAWA, H. Estudo das características de um sistema para datação por carbono-14. São Paulo, 1978. (Dissertação de mestrado, Instituto de Energia Atômica).

OLIVEIRA, S.M.B.; MELFI, A.J.; CARVALHO, A.; FRIEDRICH, G.; MARKER, A.; KANIG, M. Lateritic evolution of the Jacupiranga alkaline complex, SP. Geochim. Bras., 2(2):119-26, 1988.

OLIVER, B.M.; BRITSCHER, M.M.; FARRAR, H. Mass spectrometric determinations of the absolute tritium activities of WBS tritiated water standards. Appl. Radiat. Isot., 40(3): 199-208, 1989.

PANE, L. Estudo de um sistema para análise de trítio em água por enriquecimento eletrolítico. São Paulo, 1978. (Dissertação de mestrado, Instituto de Energia Atômica).

PAPADOPOULOS, S.S. & VINOGRAD, I.J. Storage of low-level radioactive wastes in the ground hydrogeologic and hydrochemical factors (with and appendix on the Maxey Flats, Kentucky, radioactive waste storage site: current knowledge and data needs for a quantitative hydrogeologic evaluation). Washington, DC, Environmental Protection Agency, 1974. (EPA-520/3-74009).

PAYNE, B.R. & HALEVY, E. Introduction. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Vienna, 1968. cap. 1, p. 1-20. (Technical reports series, 91)

PLATA-BEDMAR, A. Artificial radioisotopes in hydrological investigation-Technical Reports. Int. At. Energy Agency Bull., 30(1):35-8, 1988.

- QUEIROZ NETO, J.P. O Vale do Ribeira: O meio físico regional. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Ocupação do Vale do Ribeira: simposio sobre... realizado em São Paulo, 30 setembro - 1 outubro 1983. São Paulo, 1984. p. 23-8.
- ROVINSKII, F. Ya.; KOLOSKOV, I.A.; GRECHUSHKIWA, M.P.; NEKOZYREV, A.F. The behavior of tritium oxide: model experiments under natural conditions. Sov. At. Energy, 62(4): 286-91, 1987.
- SAMPA, M.H.O. Estudo e desenvolvimento de métodos analíticos para determinação da radioatividade natural em águas. São Paulo, 1979. (Dissertação de mestrado, Instituto de Energia Atômica).
- SANTOS, J.P.; AZEVEDO, S.G.; ARAUJO, J.R. Caracterização hidráulica do aquífero barreiras na costa oriental do estado do Rio Grande do Norte. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. Geologia de engenharia: anais do 4º congresso brasileiro sobre... realizado em Belo Horizonte, abril 1984. Belo Horizonte, 1984. v. 2, p. 349-59.
- SAXENA, R.K. & DRESSIE, Z. Estimation of groundwater recharge and moisture movement in sandy formations by tracing natural oxygen-18 and injected tritium profiles in the unsaturated zone. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotope hidrology: proceedings of a symposium on... held in Vienna, 12-16 September 1983. Vienna, 1984. p. 139-50. (IAEA-SM-270/46).
- SHARMA, P. Soil movement in semi-arid climate and isotopic investigation - Final Report. Vienna, IAEA, Aug. 1984. (IAEA-R-3154-F).
- SHARMA, P. & GUPTA, S.K. Isotopic investigation of soil water movement: a case study in the Thar desert, Western Rajasthan. Hydrol. Sci. J., 32(4):469-83, 1987.
- SHARMA, P. & GUPTA, S.K. Soil water movement in semi-arid climate: an isotopic investigation. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Stable and radioactive isotopes in

- the study of the unsaturated soil zone. Final meeting. Joint IAEA/CSF co-ordinated res. Vienna, 1985. p. 55-69. (IAEA-TEC-DOC-357).
- SMITH, D.B.; WEARN, P.L.; RICHARDS, H.J.; ROWE, P.C. Water movement in the unsaturated zone in high and low permeability strata by measuring natural tritium. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotope hydrology: proceedings of a symposium on... held in Vienna, 9-13 March 1970. Vienna, 1970. p. 73-87.
- SUKHIJA, B.S. & SHAH, C.R. Conformity of groundwater recharge rate by tritium method and mathematical modelling. J. Hydrol., 30:167-78, 1976.
- SZIKSZAY, M.; CONSONI, A.J.; GUIGUER, N.; HASSUDA, S.; KIMMELMANN, A.A.; PARISOT, E.; SGAMBATO, F.; YOSHINAGA, S. Instalação de uma estação experimental para estudo da dinâmica e da evolução da composição química da água na zona não saturada. Água Subter., 10:5-20, 1986.
- SZIKSZAY, M.; CONSONI, A.J.; YOKOTTA, H.K.; ARAUJO, J.R.; DUARTE, V.; KANEHISA, M.S. Estudo preliminar da hidrodinâmica da zona não saturada da estação experimental (Cidade Universitária, São Paulo). Água Subter., 11(4):33-62, 1987.
- SZIKSZAY, M.; HYPOLITO, R.; KIMMELMANN, A.A.; FIGUEIRA, R.M.; ORLANDO, R.; SAMESHIMA, H.R. Estudo hidrogeológico e hidrogeoquímico na zona não saturada. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Águas subterrâneas: anais do 59 congresso brasileiro sobre... realizado em São Paulo, 14-16 setembro 1988. São Paulo, 1988. p. 133-43.
- TANWAR, B.S. Planning of tritium injections for groundwater recharge measurements. In: INDIA. DEPARTMENT OF ATOMIC ENERGY. Nuclear techniques in hydrology: proceedings of the workshop on... held in Hyderabad, 19-21 March 1980. s. l., s.d. p. 103-13.
- TODD, D.K. Ground water hydrology. New York, NY, John Wiley, 1959.

VOGEL, J.C. & DIJKEN, M. Determination of groundwater recharge with tritium. In: SOUTH AFRICA. ATOMIC ENERGY BOARD. Technological applications of nuclear techniques: national conference on the... held in Pelindaba, 12-13 October 1972. Pelindaba, 1972. paper 28, p. 1-7.

ZIMMERMANN, U.; EHHALT, D.; MUNNICH, K.O. Soil-water movement and evapotranspiration changes in the isotopic composition of the water. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes in hydrology: Proceedings of a symposium on... held in Vienna, 14-18 November 1966. Vienna, 1967. p. 567-85.

ZIMMERMANN, U.; MUNNICH, K.O.; ROETHERM W.; KREUTZ, W.; SCHUBACH, K.; SIEGEL, O. Tracer determine movement of soil moisture and evapotranspiration. Science, 152:346-7, 1966.