

ESTIMATIVA DE RECARGA DE ÁGUA EM ZONA NÃO-
SATURADA DE SOLOS UTILIZANDO O TRÍTIU
ARTIFICIAL COMO TRAÇADOR

por

CLÁUDIO RAPOSO

Dissertação apresentada ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do

Título de Mestre

Ouro Preto

Junho / 1997

BANCA EXAMINADORA

PROF^a. Dra. ANGÉLICA F. DRUMMOND C. VARAJÃO

UFOP - Orientadora

PROF. Dr. ANTONIO T. MATOS

UFV - Co-orientador

PROF. Dr. HUBERT MATHIAS PETER ROESER

UFOP

PROF. Dr. RUBENS MARTINS MOREIRA

UFMG/CNEN-CDTN

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Angélica D. Varajão, orientadora desta Dissertação.

Ao Professor Dr. Antônio T. Matos, co-orientador, pelas valiosas contribuições na área de física de solos e pelas trocas constantes de idéias.

Ao Departamento de Geologia da UFOP, professores e funcionários, em especial, ao Professor Dr. Hubert M. Roeser - Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Geoquímica Ambiental.

Ao Departamento de Solos da UFV, pela caracterização físico-mecânica dos solos.

A SLU/PMBH, por ter autorizado a realização dos experimentos na área destinada ao futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo.

Ao CDTN/CNEN, por ter liberado a minha participação no Mestrado em Geoquímica Ambiental, em Ouro Preto e por ter realizado as análises de trítio.

Aos colegas de trabalho da Supervisão de Meio Ambiente: Duarte Antônio Costa e Nayron Cosme Lemos, pela ajuda aos trabalhos de campo durante a aplicação do traçador radioativo e sondagens/amostragens; Eng^o Paulo Lucas Cota e Cláudia Marques Peixoto, pelas discussões sobre análises laboratoriais; M. Sc. Alberto Avellar Barreto e bolsista Pablo Andrade Grossi, pelo apoio na área de informática; secretária Roselim Tropa Barreto, pelo apoio na área de digitação, geólogo Walter de Brito, pela caracterização mineralógica dos solos, geólogo Carlos Alberto de Carvalho Filho e M. Sc. Cláudio Camargos, pelas discussões sobre hidrologia e balanço hídrico e M. Sc. Yvon Chausson, pelas análises de trítio realizadas no CDTN.

Ao Professor Dr. Antônio Plata Bedmar - Chefe da Divisão de Hidrologia Isotópica do Centro de Estudios y Experimentación, Madri - Espanha, pelo inestimável apoio, colaboração, orientação e por ter realizado, no Laboratório do CEDEX/CETA, as análises de trítio referentes à 3ª amostragem.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia, utilizando o trítio artificial (Ti) como um traçador, para a avaliação de recarga de água, na camada não-saturada de solos. O trítio foi escolhido por ser considerado um traçador praticamente ideal, já que suas moléculas isotópicas têm comportamento idêntico ao das moléculas não-isotópicas da água.

Dois áreas de 20 m² cada, designadas de sub-área 1 e sub-área 2, cujos solos desenvolvidos, respectivamente, sobre rochas gnáissicas e metabásica, situadas nos domínios do futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo, município de Belo Horizonte, foram escolhidas para o trabalho experimental.

O traçador, sob a forma de água tritiada, foi aspergido diretamente nas superfícies das duas sub-áreas, sendo o monitoramento da pluma de água tritiada na zona não-saturada dos solos realizado por meio de três campanhas de sondagens/amostragens, após decorridos 4, 8 e 12 meses da aspersão. Para cada amostra, foram determinados o conteúdo de trítio e a umidade volumétrica. De posse das análises de trítio, foram estabelecidos os perfis de distribuição do traçador e monitorado o deslocamento da pluma. Após um período hidrológico completo (chuvoso-seco-chuvoso), a recarga foi calculada utilizando duas metodologias: pelo método do traçador radioativo e pelo método do Balanço Hídrico (método de Thornthwaite). Para melhor entendimento a respeito do fenômeno de percolação de água nas duas áreas testes, os solos foram caracterizados sob o ponto de vista pedológico e mineralógico, além de ter determinadas suas principais características físico-hídricas (macroporosidade, densidade aparente, capacidade de campo, ponto de murcha e composição granulométrica).

A técnica do traçador radioativo mostrou ser de aplicação simples, barata e rápida, capaz de fornecer à hidrogeologia estimativas precisas de recarga - um dos atributos, mais importantes na avaliação dos recursos hídricos subterrâneos de uma região.

Os resultados obtidos mostraram que as áreas escolhidas para os experimentos possuem taxas de recargas diferentes, devido as propriedades intrínsecas de seus solos. Com efeito, a sub-área 1 é caracterizada por um solo de textura argilosa, estrutura granular e com uma macroporosidade da ordem de 18,8%; de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, o solo desta região é um Latossolo Vermelho-Amarelo Câmbico

(LVc). A sub-área 2, apresenta uma textura muito argilosa, com percentual da fração argila superior ao da sub-área 1, estrutura em blocos e macroporosidade da ordem de 12%; o solo presente nesta região pode ser classificado como Podzólico Vermelho-Escuro (PE). As propriedades físico-hídricas, as classes e horizontes de solos presentes em ambas as áreas tiveram influência no cálculo da recarga.

Comparando-se as estimativas de recarga obtidas pela metodologia do traçador para as duas sub-áreas verifica-se que os dados obtidos não devem ser extrapolados espacialmente. Quanto ao balanço hídrico, os dados calculados devem ser vistos com certa reserva, já que o método é empírico e não leva em consideração as características físico-hídricas, nem a dinâmica da água no solo. Os solos, tais como os existentes na sub-área 1, cuja abrangência atinge a quase totalidade da área do futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo, representam um risco para o meio ambiente, necessitando de barreiras de impermeabilização para evitar a percolação de poluentes.

Recomenda-se que o valor da taxa de recarga de 30%, obtida com a técnica nuclear, seja adotada em atividades de pesquisa e em projetos que venham a ser instalados em terrenos com geologia semelhante à da área investigada, isto é, constituídos por solos de alteração de gnaisses pertencentes ao Domínio do Complexo Belo Horizonte.

ABSTRACT

The aim of this work was the development of a methodology utilizing artificial tritium (^3H) as a tracer for the assesment of water recharge in a soil unsaturated zone.

Two areas were chosen for the experiments, both with 20 m² and located in the area where the sanitary landfil of Capitão Eduardo is going to be built, in the City of Belo Horizonte; these two areas were named as sub-areas 1 and 2.

Tritiated water was directly sprayed on the surface of the soil, and the vertical displacement of the cloud across the unsaturated zone was monitored through three groups of soil samplings. The samples were collected from perforations to obtain water for analysis of tritium concentration by liquid scintillation, gravimetric humidity, volumetric water content and bulk density. In order to improve the knowledge of water percolation into the soils of the two test areas, their soils were characterized both pedologically and mineralogically. Besides, main physico-mechanical properties (macroporosity, field capacity, wilting point, granulometric composition and total soil porosity) were also determined. From the analysis of tritium concentration in every sample of the three samplings, profiles of the tracer distribution were determined and the partial and total recharges were calculated. After a complete hydrological period (wet-dry-wet), the final recharge was correlated to the amount of precipitation in the same period and compared with the water balance, calculated by the Thornthwaite method.

The methodolgy proved to be uncomplicated, inexpensive and straightforward; in short, a practical tool for the calculation of water recharge in hydrogeological studies. The results showed that the areas chosen for the experiments have different recharge rates due to intrinsical properties of their soils.

Sub-area 1 is characterized by a soil with a clay texture, granular structure and 18,8 % macroporosity; according to the Brazilian System of Soil Classification (BSSC), the soil of this region is a red-yellowish cambie latosol (LVc) or oxisol (American Taxonomy). Sub-area 2 presents a soil with a higher clay content than sub-area 1, structure in block and 12% macroporosity; according to the BSSC, the soil of this area is a red-dark podzolic (PE) or ultisol (American Taxonomy).

The comparison of the results obtained with the tracer methodology and the water balance shows that it is necessary to individualize the range of applicability of these methods and that the data should not be extrapolated to the whole watershed (or basin), when the soil is heterogeneous. Moreover, data from the hydric balance should be considered with some precaution, because the calculations are empirical, and due to the fact that physico-hydric properties, as well as water dynamics in the soil, are not taken into account.

Soils, such as the one that is present in sub-area 1, which comprises most of the total area of the forthcoming landfill, may pose a risk to the environment. Impermeable barriers will be needed to avoid percolation of contaminants, in particular heavy metals. Nevertheless, the final recharge data obtained represent a conservative aspect of a risk analysis and may be used as a reference for future studies of contaminant percolation in the unsaturated zone, in case the landfill will be constructed.

The application of the nuclear technique methodology yielded a value of 30% for the water recharge, and it is recommended that this value is adopted for other activities of prospection in terrains bearing similar geological features to those of the areas that were studied, that is, soils with altered gnaisses belonging to the domain of the Complexo Belo Horizonte.

The comparison of the results obtained with the tracer methodology and the water balance shows that it is necessary to individualize the range of applicability of these methods and that the data should not be extrapolated to the whole watershed (or basin), when the soil is heterogeneous. Moreover, data from the hydric balance should be considered with some precaution, because the calculations are empirical, and due to the fact that physico-hydric properties, as well as water dynamics in the soil, are not taken into account.

Soils, such as the one that is present in sub-area 1, which comprises most of the total area of the forthcoming landfill, may pose a risk to the environment. Impermeable barriers will be needed to avoid percolation of contaminants, in particular heavy metals. Nevertheless, the final recharge data obtained represent a conservative aspect of a risk analysis and may be used as a reference for future studies of contaminant percolation in the unsaturated zone, in case the landfill will be constructed.

The application of the nuclear technique methodology yielded a value of 30% for the water recharge, and it is recommended that this value is adopted for other activities of prospection in terrains bearing similar geological features to those of the areas that were studied, that is, soils with altered gnaisses belonging to the domain of the Complexo Belo Horizonte.

NOTAÇÃO

Lista de acrônimos, unidades de medidas, prefixos e conversões utilizados

ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CETA	Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
PMBH	Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
PRODABEL	Processamento de Dados do Município de Belo Horizonte S. A.
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
SLU	Superintendência de Limpeza Urbana
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UFV	Universidade Federal de Viçosa
WMO	World Meteorological Organization
LIA	Limite de Incorporação Anual
CDA	Concentração Derivada no Ar

UNIDADES DE MEDIDAS, PREFIXOS E CONVERSÕES

r	grau Celcius	M	mega (10^6)
keV	quiloeltronvolt	m	mili (10^{-3})
Bq	bequerel	p	micro (10^{-6})
Ci	curie	n	nano (10^{-9}) -
Sv	sievert	p	pico (10^{-12})
UT	Unidade de Trítio	f	femto (10^{-15})
Ma	Milhões de anos	Å	angstrom (10^{-7} mm)

1 atm = $1,013 \times 10^5$ Pa ; 1 bar = 1×10^5 Pa

dpm desintegrações por minuto

1 UT = 7,2 dpm = 0,12 Bq

1 Bq = 27 pCi

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

NOTAÇÃO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo e justificativa

CAPÍTULO 2

O MEIO FÍSICO

2.1 Localização e acesso

2.2 Clima e vegetação

2.3 Contexto geológico

2.3.1 Geologia regional

2.3.2 Aspectos geotécnicos

2.3.3 Aspectos hidrogeológicos

2.3.4 Geologia local

CAPÍTULO 3

TRAÇADOR RADIOATIVO

3.1 Vantagens e desvantagens do uso de traçadores radioativos

3.2 O traçador ideal

3.3 Tritio

- 3.3.1 Características principais
- 3.3.2 Fontes de tritio
- 3.3.3 Propriedades da água tritiada
- 3.3.4 Importancia do tritio como traçador

3.4. Critérios para aplicação de um traçador radioativo

- 3.4.1 Radioproteção para o uso do tritio

CAPÍTULO 4

ESTIMATIVA DE RECARGA DE ÁGUA NA ZONA NÃO-SATURADA DE SOLOS

4.1 Ciclo hidrológico

4.2 Percolação de água no solo

4.3 Movimento de água no solo

- 4.3.1 Condições não-saturadas

4.4 Estimativa de recarga

- 4.4.1 Métodos hidrológicos
- 4.4.2 Métodos isotópicos
 - 4.4.2.1 *Método dos isótopos ambientais*
 - 4.4.2.2 *Método dos isótopos artificiais*

4.5 Movimentação da água tritiada na zona não-saturada do solo

- 4.5.1 Deslocamento de um traçador em um meio poroso homogêneo

4.6 Formulação matemática para o cálculo da recarga de água em zona não-saturada de um solo

CAPÍTULO 5

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 6

METODOLOGIA ESPECÍFICA E TRABALHO EXPERIMENTAL

6.1 Áreas selecionadas para os experimentos

6.2 Levantamento pedológico

6.3 Plano de proteção radiológica

6.4 Preparação da água tritiada

6.5 Aplicação da água tritiada no solo

6.6 Amostragem de solo

6.6.1 Amostragem para a determinação da concentração de trítio no solo	43
6.6.2 Amostragem para caracterização físico-mecânica e mineralógica do solo	44
6.7 Ensaios realizados (Trabalhos de Laboratório)	44
6.7.1 Determinação da concentração de trítio	44
6.7.2 Caracterização físico-mecânica do solo	47
6.7.2.1 <i>Análise granulométrica</i>	47
6.7.2.2 <i>Densidade real</i> (d_r)	47
6.7.2.3 <i>Densidade aparente - bulk density (pb)</i>	47
6.7.2.4 <i>Umidade gravimétrica</i>	48
6.7.2.5 <i>Umidade volumétrica</i>	48
6.7.2.6 <i>Porosidade total (nj)</i>	48
6.7.2.7 <i>Macroporosidade (n_{mac})</i>	49
6.8 Análise mineralógica	49
6.9. Levantamento de dados meteorológicos e balanço hídrico	50
CAPÍTULO 7	52
RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
7.1 Características pedológicas e mineralógicas dos solos	52
7.2 Caracterização físico-mecânica dos solos	59
7.2.1 <i>Análise granulométrica</i>	59
7.2.2 <i>Densidades aparente e real</i>	59
7.2.3 <i>Porosidade total e macroporosidade</i>	59
7.2.4 <i>Capacidade de campo e ponto de murcha</i>	60
7.2.5 <i>Umidades gravimétrica e volumétrica</i>	63
7.3 Movimentação do traçador radioativo na zona não-saturada	68
7.3.1 <i>Laboratórios de análise de trítio</i>	69
7.3.2 <i>Concentração de trítio ao longo do perfil do solo</i>	75
7.3.3 <i>Deslocamento do traçador</i>	84
7.4 Balanço hídrico	85
7.5 Cálculo da recarga	90
CAPÍTULO 8	94
CONCLUSÕES	94
BIBLIOGRAFIA	98
ANEXO 1	104
PLANO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - PPR	104
REQUISIÇÃO DE SERVIÇOS - RS	104

APÊNDICE A	116
Definições matemáticas - densidades real e aparente e umidades gravimétrica e volumétrica	116
Desenvolvimento da Equação 4.7	116
APÊNDICE B	120
Memórias de cálculo do centro de gravidade do perfil do trítio	120
APÊNDICE C	127
Fatores de correção de evapotranspiração - Balanço Hídrico	127
APÊNDICE D	129
Custos envolvidos nos experimentos	129
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIV

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Mapa de localização do Aterro Sanitário de Capitão Eduardo.

FIGURA 2.2 - Localização do futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo no contexto da geologia regional (simplificado de SILVA et al., 1995).

FIGURA 2.3 - Mapa geológico abrangendo a área do futuro Aterro Sanitário de Capitão Eduardo, em escala 1:25.000.

FIGURA 4.1 - Distribuição de água nas zonas de aeração e de saturação de um solo.

FIGURA 4.2 - Representação esquemática de injeção pontual de água tritiada no solo, vista lateral e em planta, (POLI, 1989).

FIGURA 4.3 - Dispersão de uma massa infinitesimal de um traçador em um fluxo uniforme (unidimensional), indicando a forma da mancha em vários tempos e a distribuição de concentrações segundo os eixos do elipsóide.

FIGURA 6.1 - Mapa de localização das sub-áreas 1 e 2 (Base de dados: PRODABEL).

FIGURA 6.2 - Componentes da linha de destilação a vácuo.

FIGURA 7.1 - Difratoograma de raios X (Cu K α) da fração argila da sub-área 1, em amostra orientada, seca ao ar, mostrando a caulinita (espaçamentos interplamares de 7,25; 3,57; 2,38; 1,78; 1,66 e 1,42 Å) e goethita (4,15 e 2,69 Å), imagem digitalizada.

FIGURA 7.2 - Difratoograma de raios X (Cu K α) da fração argila da sub-área 2, em amostra orientada, seca ao ar, mostrando a caulinita (espaçamentos interplamares de 7,19; 3,57; 2,38; 1,78; 1,70 e 1,42 Å) e goethita (4,15 e 2,67 Å), imagem digitalizada.

FIGURA 7.3 - Classes texturais - EMBRAPA (1979).

FIGURA 7.4 - Classificação textural dos solos das sub-áreas 1 e 2.

FIGURA 7.5 - Perfis de umidade volumétrica para a sub-área 1.

LISTA DE FIGURAS (continuação)

FIGURA 7.6 - Perfis de umidade volumétrica para a sub-área 2.

FIGURA 7.7 - Concentração de trítio ao longo do perfil do solo da sub-área 1 para comparação de resultados analíticos.

FIGURA 7.8 - Concentração de trítio ao longo do perfil do solo da sub-área 2 para comparação de resultados analíticos.

FIGURA 7.9 - Perfil de trítio no solo da sub-área 1. Amostragem de abril/96.

FIGURA 7.10 - Perfil de trítio no solo da sub-área 1. Amostragem de agosto/96.

FIGURA 7.11 - Perfil de trítio no solo da sub-área 1. Amostragem de dezembro/96.

FIGURA 7.12 - Perfil de trítio no solo da sub-área 2. Amostragem de abril/96.

FIGURA 7.13 - Perfil de trítio no solo da sub-área 2. Amostragem de agosto/96.

FIGURA 7.14 - Perfil de trítio no solo da sub-área 2. Amostragem de dezembro/96.

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Traçadores isotópicos e não-isotópicos.

TABELA 3.2 - Vantagens e desvantagens do uso de traçadores radioativos.

TABELA 3.3 - Sumário dos principais parâmetros para o trítio.

TABELA 3.4 - Limites primários anuais de dose equivalente.

TABELA 3.5 - Radionuclídeos por classe.

TABELA 3.6 - Limites anuais para ingestão e inalação de trítio e água tritiada.

TABELA 7.1 - Perfil de solo da sub-área 1.

TABELA 7.2 - Perfil de solo da sub-área 2.

TABELA 7.3 - Dados de análise granulométrica, classificação textural, densidades aparente e real e porosidade total.

TABELA 7.4 - Densidades aparente (ρ_b) e real (ρ_r).

TABELA 7.5 - Dados experimentais para o cálculo da macroporosidade.

TABELA 7.6 - Dados de capacidade de campo e ponto de murcha.

TABELA 7.7 - Umidades gravimétrica (U) e volumétrica (θ) para a sub-área 1.

TABELA 7.8 - Umidades gravimétrica (U) e volumétrica (θ) para a sub-área 2.

TABELA 7.9 - Características principais dos laboratórios de análise de trítio.

TABELA 7.10 - Resultados de análises de trítio obtidos nos Laboratórios do CDTN e CEDEX/CETA.

TABELA 7.11 - Umidade volumétrica e concentração de trítio no solo da sub-área 1.

TABELA 7.12 - Umidade volumétrica e concentração de trítio no solo da sub-área 2.

TABELA 7.13 - Deslocamento do traçador (cm).

LISTA DE TABELAS (continuação)

TABELA 7.14 - Dados meteorológicos do município de Belo Horizonte, para o período de 1961 a 1990.

TABELA 7.15 - Dados meteorológicos do município de Belo Horizonte, para o período de dezembro/95 a novembro/96.

TABELA 7.16 - Capacidade de reserva de água nos solos (CRA).

TABELA 7.17 - Balanço hídrico para a sub-área 1.

TABELA 7.18 - Balanço hídrico para a sub-área 2.

TABELA 7.19 - Dados de recarga.

TABELA 7.20 - Comparação dos resultados de recarga/precipitação (R/P) pelos métodos do balanço hídrico e do traçador radioativo.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da área nuclear nas últimas décadas tem proporcionado um avanço muito significativo no que diz respeito aos estudos de aplicação de técnicas que utilizam radioisótopos¹ artificiais em hidrogeologia.

As técnicas isotópicas têm sido desenvolvidas em hidrogeologia visando à determinação de parâmetros indispensáveis ao cálculo do balanço hídrico de um sistema e de propriedades físico-hídricas do solo. Um dos atributos mais importantes na avaliação dos recursos hídricos de uma região é a taxa de infiltração de água pelo solo. Os métodos clássicos utilizados para calcular a percolação ou recarga, tais como, lisímetro, armazenamento e inventário, requerem o conhecimento de dados hidrometeorológicos da região em estudo.

Como é sabido, a determinação das variáveis da equação clássica do balanço hídrico com a exatidão necessária torna-se, na maioria dos casos, laboriosa e difícil.

Devido às dificuldades existentes para se conseguir um balanço exato, uma alternativa é a utilização de técnicas nucleares baseadas na marcação da água contida no solo com traçadores isotópicos artificiais.

A água do solo, quando aplicada sobre a superfície, move-se de cima para baixo em camadas discretas, no sentido do maior para o menor potencial. A água adicionada, por precipitação ou irrigação, irá umedecendo o solo até que seja atingida a capacidade de campo. A partir dessa condição, toda a água que chega é percolada para a camada abaixo e, assim, sucessivamente, de tal forma que a água percolada na última camada da zona não-saturada é adicionada à água subterrânea. Se a água em percolação através do solo, for marcada com um

¹ **Radioisótopo** é um isótopo radioativo de um elemento químico, tal como o trítio, que é um isótopo do hidrogênio (Dictionary of Science and Technology, 1992); nesta Dissertação o termo radioisótopo é empregado no contexto de uma aplicação tecnológica, por exemplo, como um traçador.

traçador radioativo, ela pode ter o seu movimento monitorado. O deslocamento do traçador é indicado pelo pico em sua concentração ou pelo centro de gravidade do seu perfil. A lâmina de água deslocada da superfície até determinada profundidade é a medida da recarga no intervalo de tempo entre a marcação e a amostragem realizada.

Nos estudos de recarga de aquíferos, tem sido utilizado com maior frequência o trítio (^3H ou T), um isótopo² radioativo do hidrogênio, com peso atômico 3. O trítio é parte integrante da molécula da água e, portanto, tem um comportamento idêntico ao da água contida no solo. Além do mais, o trítio tem a vantagem de ser facilmente percebido por um detector líquido de cintilação.

Os estudos de recarga de água na zona não-saturada têm aplicações práticas nos seguintes trabalhos:

- avaliação de locais para disposição de rejeitos radioativos;
- avaliação de recarga em zona semi-árida;
- estudos de poluição de águas subterrâneas devido à percolação de solventes organo-metálicos em regiões de aterros sanitários, lixões, bacias de rejeito e áreas de botafora de minerações e de indústrias;
- estudos sobre a vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos a partir de fontes industriais, agrícolas e urbanas;
- salinização de águas subterrâneas e
- otimização do cálculo de demanda de irrigação na agricultura.

1.1 Objetivo e justificativa

O objetivo básico desta Dissertação é firmar competência em uma técnica específica de avaliação sobre a percolação ou recarga de água em zona não-saturada de um solo, de tal forma que possa ser utilizada como uma nova opção de trabalho em estudos que visam à proteção ambiental e ao gerenciamento de recursos hídricos.

Existe uma necessidade premente para o desenvolvimento desta técnica para aplicação imediata em Projetos a serem desenvolvidos pelo CDTN/CNEN:

- estudo de fluxo subterrâneo em áreas selecionadas para disposição de rejeitos radioativos (Repositório do ^{137}Cs de Abadia de Goiás - GO);

² Isótopos são átomos de um mesmo elemento químico, diferindo somente pelo número de nêutrons (Dictionary of Science and Technology, 1992).

- gerenciamento de recursos hídricos em regiões situadas no polígono das secas, no nordeste do Estado de Minas Gerais (Projeto Verde Grande) e
- cálculo de recarga de lagoas situadas em regiões *cársticas* (Projeto Lagoa Santa - MG).

Para o desenvolvimento da técnica do trítio artificial como traçador, os ensaios de campo foram desenvolvidos em área do futuro Aterro Sanitário de Capitão Eduardo, de propriedade da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. A escolha da área de campo foi feita levando-se em conta dois aspectos básicos:

- a área do futuro aterro é desabitada, cercada e de acesso controlado, fazendo com que o risco de contaminação aos indivíduos do público fosse minimizado, em cumprimento às diretrizes básicas estabelecidas pelas normas de radioproteção da CNEN;
- a metodologia de trabalho e os dados obtidos poderão servir de referência para os estudos de seleção de novas áreas para disposição de aterros sanitários, a fim de minimizar os riscos potenciais de contaminação do solo e das águas subterrâneas por metais pesados.

CAPÍTULO 2

O MEIO FÍSICO

2.1 Localização e acesso

O terreno destinado ao Aterro Sanitário de Capitão Eduardo (222 ha) situa-se em área rural, à margem esquerda do rio das Velhas, no limite dos municípios de Belo Horizonte e Santa Luzia. O centro geográfico da área é definido pela latitude 19° 49' 30" sul e pela longitude 43° 53' 00" oeste de Greenwich, FIGURA 2.1.

O acesso se faz pela BR-262 no sentido Belo Horizonte - João Monlevade até o rio das Velhas, onde existe uma entrada, antes da ponte, à esquerda. Em seguida, toma-se o leito atualmente desativado da RFFSA até o Bairro Capitão Eduardo e, daí, até a área em questão.

A distância, em linha reta, desde o centro urbano de Belo Horizonte até a área em questão é da ordem de 11,5 km.

2.2 Clima e vegetação

O clima predominante, de acordo com a classificação de Köppen, é o Cwa (mesotérmico, com verões quentes e úmidos). As chuvas predominam nos meses mais quentes (outubro a abril), com totais pluviométricos variando em torno de 1400 mm anuais. A temperatura média anual é da ordem de 21° C, a média das máximas em torno de 27° C e das mínimas de 16° C (Instituto Nacional de Meteorologia - 5° Distrito).

A região localiza-se na área de transição da floresta subperenifólia/cerrado (SILVA et al.,1995). A presença do coqueiro-macaúba comprova a existência de uma vegetação primitiva do tipo mata tropical.

Predominam, atualmente, o cerrado degradado e a vegetação rasteira que são utilizados como pastagens naturais, existindo ainda algumas áreas de mata secundária.

2.3 Contexto geológico

As informações aqui apresentadas foram basicamente extraídas da referência: "Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte" (SILVA et al., 1995).

2.3.1 Geologia regional

Regionalmente, a área pertence à bacia hidrográfica do rio das Velhas, mais precisamente, à sub-bacia do ribeirão do Onça. A área está inserida no Complexo Granito-Gnáissico definido por DORR (1969). Este complexo é constituído de rochas arqueanas, predominantemente gnaisses tonalíticos a granodioríticos, migmatizados ou não, de idade entre 3200 Ma e 2600 Ma. É dividido em complexos e domos que recebem diferentes denominações locais. O complexo que ocorre no município de Belo Horizonte foi designado Complexo Belo Horizonte por NOCE et al. (1994) e suas rochas mais características (gnaisses cinzentos com bandamento composicional e feições de migmatização) denominadas de gnaisse Belo Horizonte, FIGURA 2.2.

O domínio do Complexo Belo Horizonte integra a unidade geomorfológica denominada Depressão de Belo Horizonte - depressão esta, de contato, do tipo periférica, instalada entre o compartimento de relevo acidentado do Quadrilátero Ferrífero e o relevo suave da bacia sedimentar do Grupo Bambuí. No relevo, predominam as colinas de topo plano a arqueado, com encostas côncavo-convexas e altitudes entre 800 - 900 metros, formadas pela dissecação fluvial das áreas gnáissicas. As cotas mínimas situam-se na faixa de 680 - 690 metros, na foz do ribeirão do Onça.

As formações superficiais (coberturas cenozóicas) que parcialmente recobrem este Complexo, são representadas por solos residuais de espessura variada. O solo é delgado ou ausente nas áreas de exposição dos maciços rochosos, como em parte das regiões nordeste e leste, e espesso, maturo e silto-argiloso nas áreas de relevo muito suave.

Em termos de estruturas geológicas presentes no Complexo Belo Horizonte, ROMANO et al. (1994) constataram que a deformação foi essencialmente dúctil e gerou uma foliação gnáissica disposta entre N30°W - N30°E, com predominância da direção NS. São comuns dobras abertas a muito fechadas, de eixos NS horizontais a sub-horizontais. Esses autores reconheceram evidências de atividade neo-cenozóicas na região, corroboradas pelas falhas nos terraços aluviais do rio das Velhas, pela posição de terraços aluviais consolidados a

cerca de 20 metros acima do nível de base, pela denudação completa de maciços gnáissicos e formação de rampas coluvionares espessas com entulhamento de depressões de direção N-S e pelo encaixamento profundo da drenagem do ribeirão Arrudas e do Onça.

A foliação e o bandamento gnáissico são muitas vezes descontínuos por interferência de fusão parcial, sendo muito comum a foliação milonítica nas zonas de cisalhamento. As juntas e fraturas possuem em geral mergulhos fortes a verticais, com distribuições espaciais muito variadas.

2.3.2 Aspectos geotécnicos

O domínio do Complexo Belo Horizonte apresenta um zoneamento geotécnico com duas zonas litologicamente distintas, às quais estão associados mantos de intemperismo de distintos comportamentos com as seguintes características:

CG1 - Zona de exposição de rocha gnáissica variando de sã a pouco alterada. A cobertura, se presente, varia de delgada a descontínua. Ocorre em meia-encosta e topos. Esta zona possui baixa taxa de infiltração, entretanto é vulnerável à penetração de efluentes perigosos.

CG 2 - Zona de gnaiss recoberto por manto de intemperismo de espessura variável e baixo grau de evolução pedológica. Apresenta vulnerabilidade, crescente com a granulometria/textura, à penetração de efluentes perigosos.

Quanto ao complexo de formações superficiais, principalmente na foz do ribeirão do Onça, ocorre a zona **CS1** - formações aluviais, com aluviões predominantemente arenosos.

2.3.3 Aspectos hidrogeológicos

O sistema aquífero do Complexo de Belo Horizonte é do tipo livre, constituído na sua parte superior por rochas inconsistentes do manto de decomposição das rochas gnáissico-migmatíticas ou por material alúvio-coluvionar depositado sobre este manto ou mesmo em rocha sã e, na parte inferior, por rochas fraturadas. Assim, tem-se um aquífero granular poroso superior e um fissurado sotoposto, em comunicação hidráulica íntima, constituindo um só sistema aquífero. A espessura deste aquífero é variável, máxima de 150 metros. Em áreas de afloramento de rocha sã ocorrem, exclusivamente, aquíferos do tipo fraturado, livre e com baixo potencial de água subterrânea.

A recarga deste aquífero é realizada exclusivamente por infiltração de águas superficiais, em zonas de recarga preferencial, ou em todas as partes das sub-bacias, por percolação de águas fluviais.

Trata-se de um aquífero com vulnerabilidade, em geral, grande à poluição de suas águas. A parte granular porosa superficial deste aquífero apresenta normalmente grande capacidade de infiltração de líquidos, notadamente de solventes. Nas áreas do aquífero, onde a espessura da zona não-saturada é grande, o aquífero tem maior poder de autodepuração e naquelas, onde a superfície freática é rasa, a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas é bem maior.

2.3.4 Geologia local

As informações disponíveis mostram que as rochas mais características são representadas por gnaisses com bandamento composicional e migmatitos. Estas rochas apresentam-se, via de regra, saprolitizadas ou recobertas por manto de intemperismo silto-argiloso de coloração rosa claro a avermelhado. Exposições de rocha são encontradas na área do aterro, sendo representadas por gnaisses e migmatitos milonitizados (**ml**) e migmatitos de composição granítica a tonalítica (**Agm**), FIGURA 2.3.

Ao sul e oeste da área, nas proximidades do Conjunto Habitacional Paulo VI, ocorrem corpos de rocha metabásica (β) de direções aproximadas E-W e SE-NS.

A foliação gnáissica e/ou milonítica oscila em torno de N-S, com mergulhos de 50° a 75° E. Lineamentos de direções NW e NE, alguns perpendiculares entre si, são visíveis em fotos aéreas que cobrem a área.

Do ponto de vista geotécnico, predominam na área as duas zonas litologicamente distintas, definidas anteriormente, para o domínio do Complexo Belo Horizonte, havendo predominância da zona CG2. Na foz do ribeirão do Onça, há o predomínio da zona CS1.

Sondagens à percussão tipo SPT, executadas na área demonstraram que o nível do lençol freático encontra-se, em média, abaixo, de 6 metros de profundidade (LIMA, 1996). De um total de 40 furos executados, apenas dois detectaram água a uma profundidade inferior à citada.

- **furo SP-26**, nos domínios da área do Aterro, a uma profundidade de **5,75** m e
- **furo SP-37**, no Bairro Capitão Eduardo, a uma profundidade de **2,85** m.

MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE

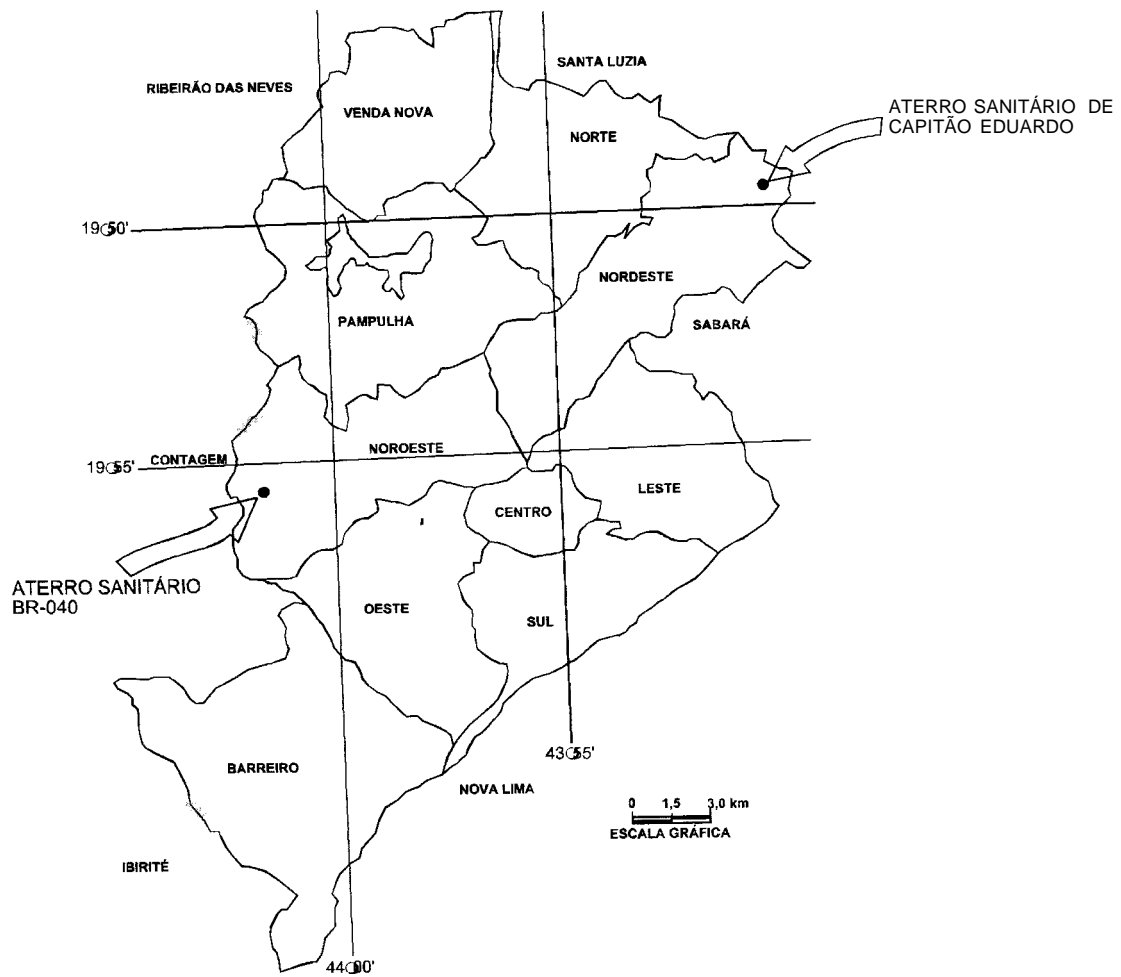


FIGURA 2.1 - Mapa de localização do Aterro Sanitário de Capitão Eduardo.

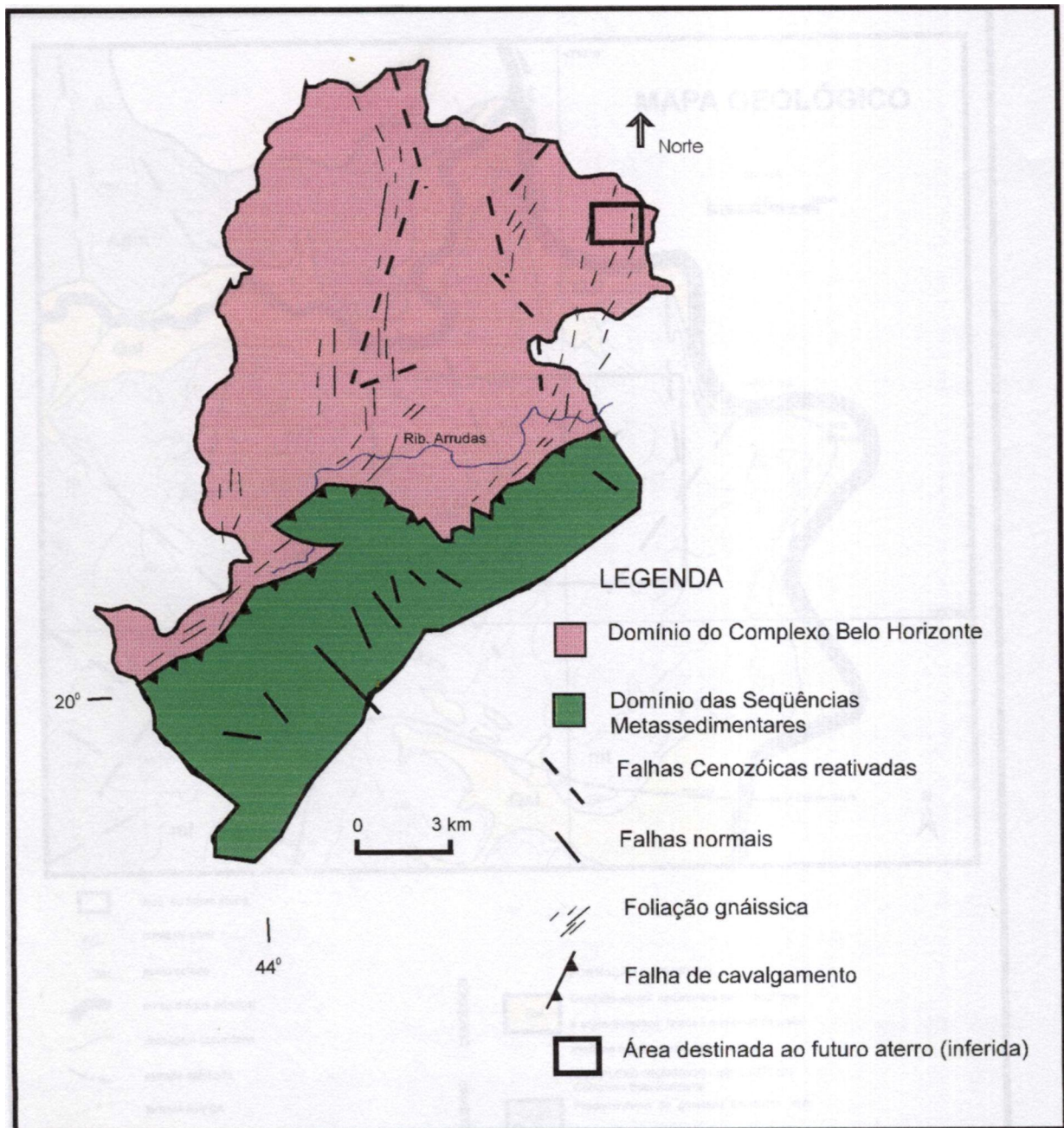


FIGURA 2.2 - Localização do futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo no contexto da geologia regional (simplificado de SILVA et al., 1995).

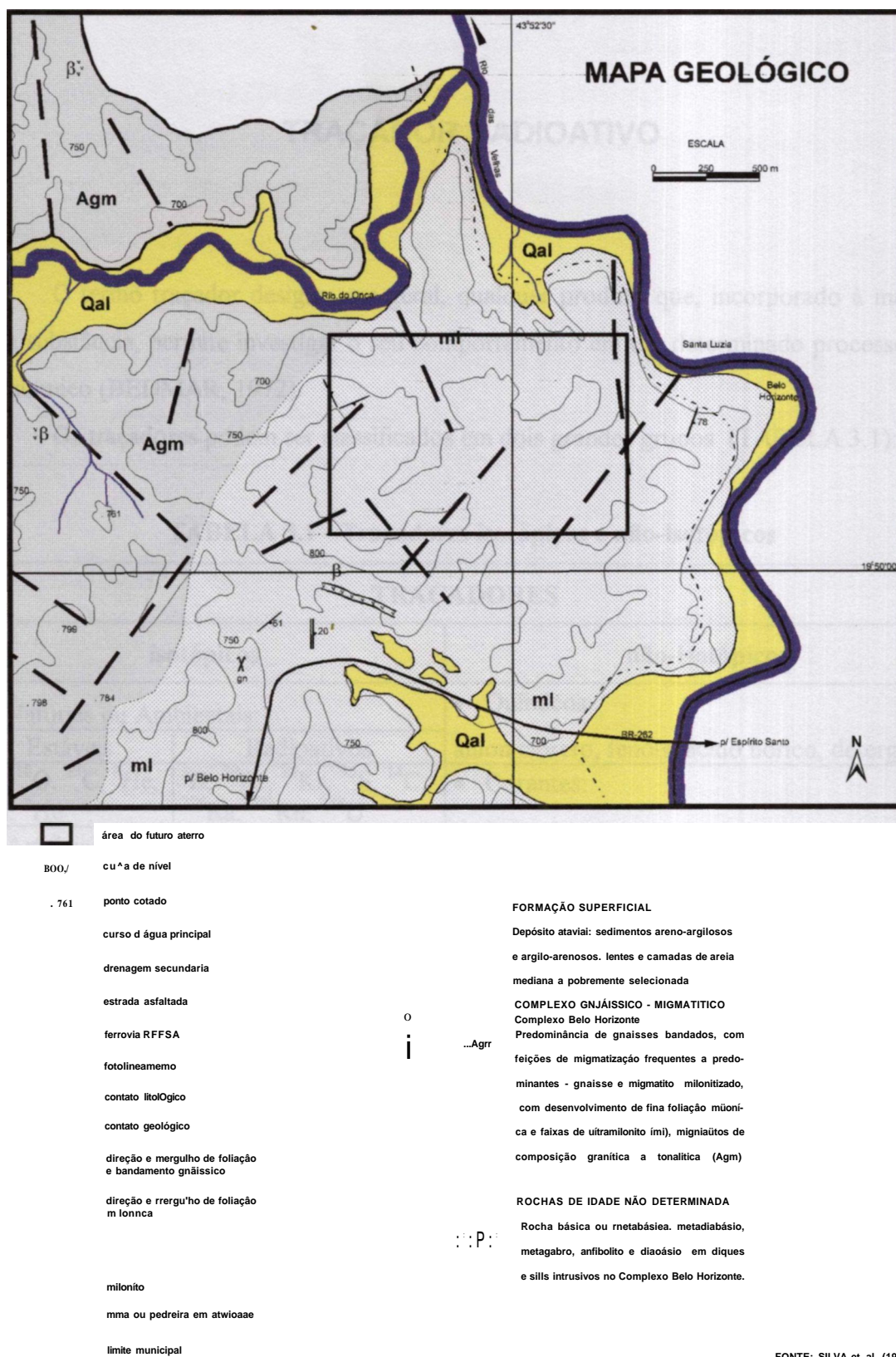


FIGURA 2.3 - Mapa geológico, abrangendo a área do futuro Aterro Sanitário de Capitão Eduardo, em escala 1:25.000.

CAPÍTULO 3

TRAÇADOR RADIOATIVO

O termo traçador designa, em geral, qualquer produto que, incorporado à massa de uma substância, permite investigar o seu comportamento em um determinado processo físico ou químico (BEDMAR, 1972).

Os traçadores podem ser classificados em dois grandes grupos (TABELA 3.1):

TABELA 3.1 - Traçadores isotópicos e não-isotópicos

TRAÇADORES		
isotópicos		não-isotópicos
• Naturais ou Ambientais:		• Químicos: ânion cloreto, fenóis, ácido bórico, detergentes
Estáveis	Radioativos	
^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^3He , ^{15}N , ^4He	^3H , ^{39}Ar , ^{85}Kr , ^{35}S , ^{14}C , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{238}U	• Corantes: rodamina B, vermelho do congo, azul de metileno, anilina, dicromato de potássio
• Artificiais:		
^3H , ^{131}I , ^{51}Cr , ^{82}Br , ^{86}Rb , ^{24}Na		

Os traçadores químicos são geralmente compostos químicos solúveis em água e facilmente identificáveis. O ânion cloreto é o mais utilizado porque sua retenção nos materiais sólidos é quase nula (a exceção se faz para os solos de cerrado - gibsíticos e caulíníticos, que possuem pH ácido e carga positiva); dentre os corantes, destaca-se o dicromato de potássio que é muito utilizado em estudos de fluxos superficiais.

Os traçadores ambientais são os isótopos estáveis e/ou radioativos que ocorrem naturalmente ou são produzidos pelo homem, mas encontram-se tão distribuídos que fazem parte integrante do meio ambiente. Já os traçadores radioativos artificiais são aqueles obtidos pelo homem pelo bombardeio de núcleos estáveis com partículas nucleares, normalmente com nêutrons num reator nuclear. Os traçadores emissores de partículas γ são os preferidos por causa da maior facilidade de medida *in situ*.

Os traçadores isotópicos mais frequentemente utilizados nos estudos hidrológicos são os isótopos de hidrogênio - ^2H e ^3H , o oxigênio - ^{18}O , o carbono - ^{14}C (meia-vida muito grande, ou seja, $T_{1/2} = 5270 \pm 30$ anos) e os isótopos emissores de partículas γ :

- ^{131}I ($T_{1/2} = 8$ dias, utilizado para determinação de velocidade de fluxo de água subterrânea);
- ^{51}Cr ($T_{1/2} = 27,8$ dias, direção de fluxo de água subterrânea) e
- ^{82}Br ($T_{1/2} = 36$ horas, velocidade de fluxo de água subterrânea).

3.1 Vantagens e desvantagens do uso de traçadores radioativos

De acordo com BEDMAR (op. cit), as vantagens e desvantagens dos traçadores radioativos frente aos outros tipos podem ser resumidas na TABELA 3.2:

TABELA 3.2 - Vantagens e desvantagens do uso de traçadores radioativos

Vantagens	Desvantagens
<p>1. Extraordinária sensibilidade de detecção, permitindo diluições extremas. Por exemplo 1 curie (Ci) de ^{131}I permite marcar 20 hm^3 de água. Para efetuar uma marcação semelhante com dicromato de potássio seriam necessários 500 kg deste produto.</p> <p>2. Vida limitada do traçador, não produzindo contaminações e podendo ser escolhido de acordo com sua meia-vida em função da duração da experiência.</p> <p>3. A medida é seletiva, não havendo interferência de outros materiais contidos na água, radioativos ou não. Mediante espectrometria de raios gama, pode-se identificar o traçador de forma inequívoca.</p>	<p>1. Necessidade de apresentação de um Plano de Proteção Radiológica e autorização para a aquisição e manipulação de materiais radioativos junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN.</p> <p>2. Os isótopos de vida curta têm que ser adquiridos e usados prontamente.</p> <p>3. Os equipamentos de medida/detecção são geralmente mais caros.</p> <p>4. Preço elevado dos traçadores radioativos, se bem que em alguns casos eles são mais baratos que alguns corantes e, em outros, o preço dos mesmos não desempenha um papel importante no custo final do experimento.</p>

3.2 O traçador ideal

De acordo com HALEVY & NIR (1962), um traçador ideal para estudos hidrológicos deveria satisfazer aos seguintes requisitos:

1. o comportamento do traçador no processo que se pretende investigar deve ser idêntico ao da água. Esta condição exige, por sua vez, que:

- o traçador não deve reagir quimicamente com a água, pois sua identificação posterior poderia ser prejudicada;
 - não deve ser adsorvido pelos materiais sólidos do meio;
 - não deve modificar sua concentração durante o fenômeno em estudo pela interação com os materiais sólidos do meio;
 - a quantidade do traçador a ser utilizado não deve modificar, de forma significativa, a densidade, viscosidade ou temperatura da água, a fim de que não se produzam alterações no fluxo natural;
 - os fenômenos de dispersão e difusão do traçador devem ser análogos aos da molécula da água;
 - não deve haver troca iônica e precipitação química ou coloidal.
2. se um traçador é adicionado a um meio ou à água, estes devem ter uma concentração do traçador tal que não interfira nos resultados;
 3. deve ser facilmente solúvel na água;
 4. não deve contaminar o meio em estudo por longos períodos de tempo;
 5. deve permitir fatores de diluição muito elevados, ou seja, com uma pequena quantidade do traçador pode-se marcar volumes muito grandes de água;
 6. deve ser de baixo custo, de fácil manipulação e inócuo aos seres vivos.

Não existe um traçador que cumpra com perfeição as condições ideais relacionadas e nem é possível a seleção de um traçador universal, que se adapte satisfatoriamente a todos os estudos. De um modo geral, a escolha deste ou daquele traçador vai depender de situações particulares e dos objetivos propostos.

A principal característica que se deve ter em mente é de que o traçador deva acompanhar o comportamento do líquido a ser traçado.

3.3 Tritio

O tritio é o traçador ideal para os estudos de recarga de aquíferos porque as moléculas isotópicas de água comportam-se praticamente como moléculas de água (KAUFMANN & ORLOB, 1956).

3.3.1 Características principais

O trítio (^3H ou T) é o mais pesado e o único isótopo radioativo do hidrogênio. Foi descoberto em 1940 por ALVAREZ & CORNOG que, em trabalho subsequente, estabeleceu sua meia-vida (período de semidesintegração) de $12,36 \pm 0,03$ anos (NCRP n° 62, 1979).

Este isótopo do hidrogênio é um emissor β puro, decaindo a hélio pela reação:

$^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \beta + \text{energia}$; a energia máxima é de 18,6 keV, e a energia média de 5,7 keV.

O peso atômico do ^3H é $3,016997 \pm 0,000001$ g, comparado com ^1H e ^2H de $1,008142 \pm 0,000003$ g e $2,014735 \pm 0,000006$ g, respectivamente (LANGE & FORKER, 1961).

A TABELA 3.3 apresenta o sumário dos principais parâmetros para o trítio.

TABELA 3.3 - Sumário dos principais parâmetros para o trítio

Parâmetro	Valor	Fonte
Radiação	β (100%)	EVANS, 1974
Produto de Decaimento	^3He	EVANS, 1974
Tl/2	$12,38 \pm 0,03$ anos 12,33 anos	OLIVER, 1989 TRS n° 273, 1987 Table of Isotopes, 1987
Peso atômico	$3,016997 \pm 0,000001$	JACOBS, 1968
EP _{ax}	$18,610 \pm 0,016$ keV	OLIVER, 1989
EP _{med}	$5,6928 \pm 0,0033$ keV	OLIVER, 1989
Radiação acima de 17 keV	0,05%	EVANS, 1974
Partículas β :		
alcance no ar	4,5 - 6 mm	EVANS, 1974
penetração máxima	0,6 mg.cm ⁻²	
meia espessura	0,049 mg.cm ⁻² ou 18 um para o Al	AIEA-1991

Fonte: POLI (1989); IAEA (1991)

3.3.2 Fontes de trítio

O trítio ambiental provém de duas fontes. A primeira resulta da interação de raios cósmicos com os constituintes gasosos, principalmente nas reações induzidas por prótons e nêutrons de alta energia, com núcleos de nitrogênio ($^{14}_7\text{N} + \text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^{12}_6\text{C}$). A produção em toda a atmosfera tem sido estimada em cerca de 0,16 a 0,22 átomos por centímetro quadrado da superfície terrestre por segundo (cm⁻².s⁻¹). Um valor médio de 0,19 poderia resultar em um inventário de 26 MCi, (NCRP, op. cit). A segunda fonte é produzida

artificialmente pelo homem em centrais nucleares, pela irradiação de lítio metálico por nêutrons (${}^6\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H} + 4,69 \text{ MeV}$) e pelas explosões termonucleares na superfície terrestre, a partir de 1952. Comercialmente, o trítio não é produzido no Brasil (POLI, 1989).

Todo trítio existente na troposfera e estratosfera experimenta um processo de oxidação, aparecendo gradativamente na troposfera na forma de HTO (água tritiada), misturando-se com a água de chuva e umidade atmosférica e acompanhando a água natural em todo o ciclo hidrológico.

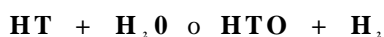
A concentração do trítio ambiental é expressa em UT "Unidades de Trítio". No sentido estrito, não é uma unidade, mas uma razão - razão isotópica [$({}^3\text{H}/{}^1\text{H}) = \text{IO}^{18}$]. Um litro de água com uma concentração de 1 UT produz 7,2 dpm (desintegrações por minuto) ou 0,12Bq(Bequerel).

Estima-se que a concentração de trítio na água de chuva varia de 5 a 20 UT, dependendo da posição geográfica (latitude) e da época do ano. As concentrações no hemisfério norte são muito maiores que no hemisfério sul. O nível máximo atingido por esse isótopo foi de aproximadamente 10^4 UT em 1963, no hemisfério norte (BEDMAR, op.cit).

Por outro lado, as concentrações de trítio, em águas superficiais e subterrâneas e em lagos do hemisfério norte, são bem mais baixas, atingindo valores desde zero até centenas de unidades de trítio para os dois últimos tipos de água. No hemisfério sul, estes mesmos tipos de águas apresentam valores de concentrações de trítio ainda menores, entre 0-23 UT (IAEA, 1987).

3.3.3 Propriedades da água tritiada

O trítio gasoso T_2 , à temperatura ambiente, tende a formar HT pela reação com o hidrogênio gasoso. O vapor HTO é formado rapidamente pela reação:



e é a forma mais comum do trítio encontrado no ambiente. Na faixa de temperatura variando de 25 a 80°C, a pressão de vapor de HTO é menor que a da água, enquanto que seu ponto de ebulição é maior que o da água. O coeficiente de difusão de HTO em água ordinária a 25°C é da ordem de $2,44 \pm 0,057 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, comparado com $2,299 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ da própria água (JACOBS, 1968 e NCRP, 1979).

3.3.4 Importância do trítio como traçador

Como o trítio forma parte da molécula de água (HTO), o mesmo permanece juntamente com a água em todo o ciclo hidrológico, permitindo que este isótopo do hidrogênio seja um excelente traçador para a hidrologia. Esta característica faz com que o trítio seja freqüentemente usado nos estudos de recarga de aquíferos, direção e velocidade de fluxo, relação entre águas superficiais e subterrâneas em bacias de rios, datação de águas subterrâneas e tempo de residência de águas (IAEA, 1983).

Nesta Dissertação, limitar-nos-emos aos estudos de estimativa de infiltração/recarga de aquíferos.

3.4. Critérios para aplicação de um traçador radioativo

O uso de radioisótopos artificiais em estudos hidrológicos, assim como em qualquer campo de aplicação, deve levar em consideração a saúde e a segurança. De acordo com as recomendações do International Commission on Radiological Protection - ICRP e da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, três princípios básicos governam os usos dos radioisótopos:

1. princípio da justificação da metodologia:

qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação a outras alternativas e deve ser tal que produza um benefício líquido positivo para a sociedade;

2. princípio da otimização da técnica e processos:

o planejamento, o projeto e a execução subsequente de um experimento devem ser feitos de modo a garantir que as exposições sejam tão reduzidas quanto razoavelmente exeqüíveis, levando-se em conta fatores sociais e econômicos;

3. princípio da limitação de dose individual:

as doses individuais para os trabalhadores e para os indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de dose equivalente estabelecidos pela Norma CNEN 3.01 (TABELA 3.4).

TABELA 3.4 - Limites primários anuais de dose equivalente

Dose Equivalente	Trabalhador	Indivíduo do Público
Efetiva	50mSv	1 mSv
Para órgão ou tecido	500 mSv	1 mSv
Para a pele	500 mSv	50 mSv
Para a cristalino	150 mSv	50 mSv
Para extremidades (mãos, pés antebraços e tornozelos)	500 mSv	50 mSv

Fonte: CNENNE 3.01 (1988)

A aplicação de qualquer radioisótopo requer uma licença do órgão fiscalizador que, no Brasil, é representado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, com sede no Rio de Janeiro.

A licença é um documento que autoriza e habilita 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 sua competência técnica, assim como a adequação de métodos, aparelhos e instalações a serem empregados.

A aplicação de radioisótopos para fins hidrogeológicos requer que o requerente preencha as seguintes condições (BEDMAR & MOSER, 1990):

1. razoável grau de formação técnica em radioatividade, proteção radiológica e, obviamente, hidrogeologia;
2. experiência prática no assunto para o qual a licença é requerida e
3. equipamento básico para medições de radioatividade e proteção radiológica, incluindo dosímetros e equipamentos para transporte e acondicionamento.

Em virtude da grande diversidade de aplicações e riscos associados, a Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA (in BEDMAR & MOSER, op. cit), recomenda um controle complementar dependendo do grau do risco de cada prática ou operação. Três diferentes categorias de controle regulatório têm sido definidas pelas normas de segurança:

Categoria 1 - Sistema completo de licenciamento

cada prática individual ou operação tem que ser autorizada com base em estudos preliminares, os quais devem incluir: sistema completo de licenciamento envolvendo

descrição e justificação, análise de riscos e danos aos trabalhadores e indivíduos do público e estudos de segurança para situações emergenciais.

Categoria 2 - *Registro e notificação*

é um sistema de autorização geral, onde não são requeridos os detalhes precisos da operação, mas a autoridade competente ainda faz uma apreciação geral do experimento.

Categoria 3 - *Isenção de controle regulatório*

a autoridade competente deve especificar as condições sob as quais a isenção é autorizada.

3.4.1 Radioproteção para o uso do trítio

O trítio é certamente um dos radionuclídeos³ 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, 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 V - baixa toxicidade segundo a Norma CNEN NE 3.01, TABELA 3.5.

TABELA 3.5 - Radionuclídeos por classe

Classe	Radionuclídeo
I	²²⁷ Ac, ²²⁸ Th, ²³⁰ Th, ²³² Th, Th-nat., ²³¹ Pa, ²³² U, ²³³ U, ²³⁴ U, ²³⁶ U, emissores alfa com Z > 92
II	¹⁴⁷ Sm, ²¹⁰ Pb, ²²⁷ Th, ²³⁵ U, ²³⁸ U, U-emp., U-nat, U-enr., ²⁴¹ Pu
III	demais radionuclídeos não especificados nas classes IV e V
IV	¹⁴ C, ³⁵ S, ⁵⁴ Mn, ⁵⁷ Co, ⁶⁵ Zn, ⁶⁷ Ga, ⁷⁵ Se, ⁷⁷ Sr, ⁹⁹ Tc, ¹⁰⁹ Cd, ¹²³ I, ¹²⁵ I, ¹²⁹ Cs, ¹⁹⁷ Hg
V	³ H, ⁵¹ Cr, ⁵⁵ Fe, ⁶³ Ni, ¹³⁷ Cs

³ **Radionuclídeo** é um nuclídeo radioativo (Dictionary of Science and Technology, 1992); **nuclídeo** é uma espécie atômica caracterizada pelos números de prótons e nêutrons em seu núcleo, e pelo estado de energia do núcleo (BEDMAR & MOSER, 1990); nesta Dissertação, o termo radionuclídeo é empregado para enfatizar aspectos da estrutura interna de um nuclídeo radioativo.

O trítio é classificado pela IAEA (Basic Safety Standards - 1982) na Categoria 3. Nesta categoria está prevista a injeção de traçadores em zona não-saturada de sistemas de solos.

Do ponto de vista ocupacional/biológico, a TABELA 3.6 fornece os limites de incorporação anual - LIA (Bq) e a concentração derivada no ar - CD A (Bq.m⁻³), considerando uma semana de 40 h, para o trítio e a água tritiada. Para a obtenção do LIA, expresso em Ci e da CDA, também expresso em Ci.m⁻³, os valores devem ser divididos por

TABELA 3.6 - Limites anuais para ingestão e inalação de trítio e água tritiada

Radionuclídeo	Unidade		Oral	Inalação
	LIA	Bq		
3H (água tritiada)	LIA	Bq	3 x 10 ⁹	3 x 10 ⁹
	CDA	Bq.m ⁻³	-	8 x 10 ⁵
³ H (trítio elementar)	LIA	Bq	-	-
	CDA	Bq.m ⁻³	-	2 x 10 ⁵

Fonte: CNEN - NE 3.01 (1988)

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 n° 30, 1982, para um indivíduo trabalhando 8 horas por dia, durante um ano inteiro, considera-se:

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

De acordo com BEDMAR & MOSER (op. cit), a experiência acumulada durante mais de 30 anos com o uso de radioisótopos artificiais em hidrologia mostra que os riscos para os trabalhadores e membros do público são muito baixos. Nenhum acidente foi

registrado com estas aplicações. Devido às baixas atividades⁴ envolvidas e à alta capacidade de dispersão do meio natural, nenhum acidente pode ser esperado, que cause sérios danos ou detrimientos aos indivíduos do público. Riscos triviais, quando presentes, podem ser restaurados dias após a aplicação do traçador.

De um modo geral, a descontaminação, dependendo da concentração de trítio, pode ser feita pela simples diluição em água e/ou pela evaporação da água tritiada.

Atividade de uma quantidade de radionuclídeo, em um determinado estado de energia e instante de tempo é a grandeza expressa por: $A = dN/dt$, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares daquele estado de energia, no intervalo de tempo dt (CNEN, 1992).

CAPÍTULO 4

ESTIMATIVA DE RECARGA DE ÁGUA NA ZONA NÃO-SATURADA DE SOLOS

Antes de se entrar diretamente nos métodos de estimativa de recarga ou infiltração de água na zona não-saturada de um solo, é interessante apresentar algumas considerações preliminares relacionadas com o assunto.

4.1 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (SILVEIRA, 1993).

Uma descrição simplificada do ciclo hidrológico poderia começar considerando o vapor d'água contido na atmosfera, o qual, sob condições apropriadas, condensa e precipita sobre os oceanos e os continentes. A porção de água que cai sobre a superfície dos continentes sob a forma de precipitação (P) é, subsequentemente, dispersada por diferentes caminhos. Uma parcela da precipitação é interceptada pelo dossel das plantas de onde por evaporação pode retornar à atmosfera. Da parcela da precipitação que alcança o solo, uma parte é escoada, formando o escoamento superficial (Q), outra parte se infiltra através da superfície. A água infiltrada pode escoar subsuperficialmente, ser armazenada na zona não-saturada do solo (AA) ou constituir a recarga (R) e vir a abastecer os mananciais subterrâneos.

A água armazenada no solo pode ser transferida de volta à atmosfera por meio da evaporação e transpiração (sistema solo-planta-atmosfera). O efeito combinado de evaporação e transpiração é comumente chamado de evapotranspiração (ET). A parcela da água de precipitação que penetra no solo e não fica armazenada na sua zona não-saturada recebe as denominações de água de recarga (R), de percolação profunda ou de drenagem profunda.

A infiltração e a percolação no interior do solo estão associadas à qualidade dos poros existentes e aos gradientes de potencial no solo.

A equação geral do balanço hídrico, quando o escoamento subsuperficial e a interceptação superficial são desprezadas, pode ser expressa, de uma maneira simplificada, por:

$$P = ET + Q + R + AA \quad (4.1)$$

A determinação de R com a exatidão necessária torna-se, na maioria dos casos, laboriosa e difícil, por essa razão, sua determinação tem sido efetuada por medição do fluxo de umidade ou, mais precisamente, pela consideração desta variável como única incógnita na solução do balanço hídrico..

Atualmente, com o avanço das técnicas de utilização de traçadores radioativos, a estimativa "in loco" da recarga tem sido obtida (BEDMAR, 1972).

4.2 Percolação de água no solo

A passagem de água da superfície para o interior do solo constitui o processo denominado infiltração. Posteriormente, estando a água no interior do solo, sua movimentação é chamada de percolação. A percolação é um processo que depende fundamentalmente das propriedades físico-hídricas e do gradiente de potencial do solo. Quanto mais macroporoso e maior o gradiente de potencial da água do solo, maior a velocidade de percolação da água. (SILVEIRA et al. 1993).

À medida que a água percola no solo, as camadas superiores do solo vão-se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto houver aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a superfície, naturalmente, o primeiro nível a se saturar.

Normalmente, precipitações naturais não são capazes de levar à saturação. Quando muito, ocorre saturação apenas nas camadas superficiais, conformando, temporariamente, um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade. Quando o aporte de água à superfície cessa, isto é, deixa de haver infiltração, a umidade no interior do solo se redistribui, evoluindo para um perfil de umidade inverso, com menores teores de umidade próximo à superfície e maiores nas camadas mais profundas.

Em um solo em que cessou a infiltração, parte da água do seu interior distribui-se para as camadas mais profundas e parte retorna à atmosfera por evapotranspiração. Este processo faz com que o solo vá recuperando sua capacidade de infiltração, haja vista que com o

decréscimo de umidade nas camadas superiores do solo há um abaixamento do potencial da água do solo. O abaixamento do potencial proporciona um aumento do gradiente de potencial e, conseqüentemente, da força de sucção da água superficial.

O conhecimento do processo de infiltração e suas relações com as propriedades do solo é de fundamental importância na agricultura para o eficiente manejo do solo e da água. Ótimas revisões sobre o movimento de água no solo foram publicadas por REICHARDT, 1975.

4.3 Movimento de água no solo

O movimento da água no solo pode ser descrito pela equação de Darcy:

$$q = -K \cdot \nabla \psi \quad (4.2)$$

onde:

q = densidade de fluxo ou velocidade de Darcy; $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

K = condutividade hidráulica do solo saturado; $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ e

$\nabla \psi$ = gradiente de potencial; $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1}$

A equação de Darcy (4.2) indica que o fluxo é proporcional ao gradiente de potencial (energia propulsora do movimento). A condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (K) do solo é dependente do arranjo das partículas do solo ou, de outra forma, da macroporosidade do solo. O sinal menos (-) na equação indica que o sentido do fluxo é o inverso ao gradiente.

Na zona saturada, a condutividade hidráulica é usualmente constante com o tempo. Na zona não-saturada, a condutividade é uma variável dependente do conteúdo de umidade do solo (MARSILY, 1986).

A análise matemática da percolação de água na zona não-saturada torna-se mais complicada quando se leva em consideração a heterogeneidade composicional e estrutural dos solos, já que em meio anisotrópico a condutividade deve ser determinada por camadas homogêneas.

4.3.1 Condições não-saturadas

Tais condições predominam na zona de aeração situada acima do lençol freático, na qual o solo encontra-se com um teor de umidade (θ), abaixo da umidade de saturação (θ_s).

Os processos que governam os fluxos não-saturados são complexos e de difícil descrição quantitativa e não serão objeto desta Dissertação.

Esquemáticamente, a zona não-saturada ou zona de aeração consiste de três sub-zonas, FIGURA 4.1:

- zona da água no solo;
- zona intermediária, com poros parcialmente ocupados pela água, e
- zona denominada franja de capilaridade, onde ocorre a ascensão capilar da água.

A Zona da água no solo

É a zona adjacente à superfície e se estende até a profundidade média de alcance das raízes das plantas. A espessura desta zona varia com o tipo de solo e vegetação.

A distribuição de umidade na zona da água do solo depende das condições da superfície do solo e da proximidade do lençol freático. Quando o lençol freático é profundo, ele não deve influenciar a distribuição de umidade nesta zona. O sentido de fluxo de água nesta zona é descendente ou mesmo algum tempo após o aporte superficial e, ascendente durante a evaporação.

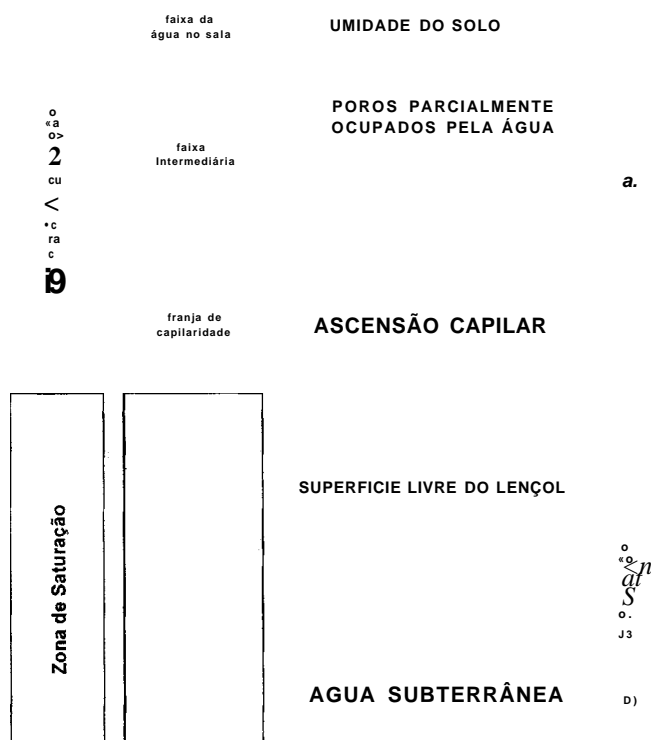


FIGURA 4.1 - Distribuição de água nas zonas de aeração e de saturação de um solo

Fonte: CETESB, 1978

Após um período de fornecimento de água na superfície, a água que permanecer no solo sem ser drenada naturalmente, constitui a chamada umidade à capacidade de campo. Em 1949, VEIHMEYER & HENDRICKSON definiram a capacidade de campo como sendo a umidade do solo, após a drenagem do excesso de água, quando a velocidade do movimento descendente praticamente cessa, o que usualmente ocorre 2 a 3 dias após a chuva ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniformes.

Em umidades inferiores à capacidade de campo, a água está retida no solo por forças de adsorção (higroscópicas), na forma de filmes contínuos ao redor das partículas de solo e por capilaridade (forças decorrentes do balanço entre forças de coesão no líquido e de adesão líquido-sólido).

A Zona intermediária

Esta zona está compreendida entre a zona da água do solo e a zona capilar. A água desta zona é também mantida por forças higroscópicas e capilares, estando a umidade do solo, geralmente, à capacidade "de campo.

A Franja capilar

Esta zona está compreendida entre a zona intermediária e a zona de saturação. Sua espessura depende das características e homogeneidade do solo, principalmente da distribuição do diâmetro 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 ou na linha do lençol freático, os poros encontram-se praticamente saturados. A umidade decresce até a capacidade de campo no topo da franja.

4.4 Estimativa de recarga

Conforme apresentado anteriormente, a recarga subterrânea é a quantidade de água que, a partir dos processos hidrológicos, percola através da zona de aeração do solo, atingindo sua região saturada.

Basicamente, os métodos de estimativa de recarga podem ser reunidos em dois grupos principais:

- métodos hidrológicos
- métodos isotópicos

4.4.1 Métodos hidrológicos

De acordo com STEENHUIS et al. (1985), duas abordagens podem ser utilizadas para a estimativa da recarga: medição do fluxo de umidade e o balanço hídrico.

A medição do fluxo de umidade da zona não-saturada, executada por meio do método do plano de fluxo nulo, necessita que se localize o ponto, ao longo do perfil vertical do solo, no qual o gradiente hidráulico se anula. Acima desse ponto, o fluxo é ascendente, sendo causado pela evaporação e pelo consumo de água pelas plantas; abaixo, a água percola sob a ação da gravidade, em direção à zona saturada. A variação temporal dos armazenamentos, obtida pela integração do perfil de umidade abaixo do plano nulo, fornece a estimativa da recarga. Para o emprego do método do plano de fluxo nulo, são necessárias medidas simultâneas do potencial mátrico³ e do conteúdo de umidade do solo, restringindo-se sua aplicação à profundidade máxima onde seja possível a instalação de tensiômetros.

A segunda abordagem se baseia nos métodos do balanço hídrico, onde a recarga subterrânea é estimada por meio da aplicação conceitual do balanço de massa expresso pela equação hidrológica simplificada (Equação 4.1).

Dentre os métodos clássicos podem ser citados:

- método do inventário,e
- método do lisímetro.

O método do inventário requer medições de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial durante um ciclo hidrológico. No método do lisímetro, a recarga é medida coletando-se a água percolada a uma certa profundidade com o auxílio de um grande funil. Um lisímetro é essencialmente uma cuba estanque enterrada, de paredes verticais, aberta em sua parte superior e cheia de solo da área que se quer estudar.

4.4.2 Métodos isotópicos

O movimento da umidade na zona não saturada do solo pode ser monitorado com a ajuda de traçadores isotópicos, conforme mostrado no CAPÍTULO 3.

4.4.2.1 Método dos isótopos ambientais

Os isótopos ambientais são ferramentas muito eficientes nos estudos dos ciclos de água, em parte devido ao fato de que os três diferentes isótopos (trítio, deutério e oxigênio-

³ **Potencial mátrico** ($Q\psi_m$) é a medida da energia livre da água, posto que a água está sob a ação de forças capilares e de adsorção dos componentes sólidos do solo (REICHARDT, 1975).

18) incorporados na molécula da água, podem efetivamente ser usados como traçadores. O trítio, um traçador radioativo, é especialmente usado no entendimento dinâmico do movimento da água em diferentes compartimentos da hidrosfera. Já o deutério e o oxigênio fornecem informações sobre as características de regime permanente (steady-state) do ciclo de água.

As distribuições de trítio, deutério e oxigênio-18 em precipitações têm sido monitoradas mensalmente, desde o início da década de 60, por uma rede de mais de 40 estações distribuídas no mundo inteiro e operadas pela IAEA e pela World Meteorological Organization (WMO).

Numerosos estudos têm mostrado que o trítio é um traçador muito poderoso para o estudo do movimento da água na zona não-saturada. Os trabalhos publicados mostram que a maior parte do trítio existente nas precipitações, a partir de 1952, é de origem termonuclear e este trítio se constitui uma ótima ferramenta para a determinação da recarga de aquíferos (VOGEL et al., 1972).

A recarga subterrânea pode ser estimada pelo balanço entre o suprimento de trítio dado pela precipitação e o trítio depositado na água subterrânea (ATAKAN et al., 1974).

4.4.2.2 Método dos isótopos artificiais

Outro método isotópico de grande aplicação ao estudo da estimativa de recarga é o método de marcação com a utilização de radioisótopos artificiais. Normalmente, o trítio tem sido usado porque apresenta uma série de vantagens, conforme comentado no CAPÍTULO 3.

A Modelo do fluxo em pistão, ZIMMERMANN et al.(1967)

O método de marcação com traçador artificial baseia-se na suposição de que a água adicionada à superfície, por precipitação ou irrigação, irá, após atingir a capacidade de campo em toda a camada de solo, percolar para a camada abaixo e, assim, sucessivamente, "de tal forma que a água percolada na última camada da zona não-saturada, alimenta as águas subterrâneas. Este conceito de movimento da água, através do solo, é denominado "Modelo de Fluxo em Pistão" e foi desenvolvido por ZIMMERMANN et al. (1967).

Segundo este modelo, e sob a condição de contorno de fluxo de água apenas no sentido vertical, a infiltração da água de precipitação leva a um deslocamento camada abaixo,

semelhante ao funcionamento de um pistão. Sabe-se, entretanto, que na natureza o movimento da água no solo é bem mais complexo, como pode ser visto no item 4.5.

Na metodologia desenvolvida por estes autores, a água do solo é marcada com o traçador artificial. O traçador se move juntamente com a água como consequência de precipitações ou irrigações. O solo do local do experimento é amostrado após um certo intervalo de tempo escolhido, e o conteúdo de umidade e a concentração do traçador são medidos em amostras de solo coletadas a vários intervalos de profundidade. O deslocamento do traçador é indicado pelo pico em sua concentração ou pelo centro de gravidade no perfil do trítio.

A lâmina de água, medida em cm ou mm, deslocada da superfície/profundidade de injeção até a profundidade onde se encontra o pico de concentração ou o centro de gravidade da pluma do traçador, representa a medida da recarga no intervalo de tempo compreendido entre a irrigação/injeção e a coleta de amostras. Normalmente, calcula-se a recarga com base na precipitação de um ciclo hidrológico completo.

A Técnicas Experimentais

As técnicas experimentais disponíveis são:

- irrigação do traçador diretamente na superfície do terreno (distribuição planar) e
- injeção do traçador a uma profundidade abaixo da zona de raízes das plantas (arranjo em cruz e/ou em linha).

A técnica de irrigação do traçador sob a forma de água tritiada diretamente na superfície do terreno foi a técnica empregada nos trabalhos pioneiros (BLUME et al., 1967; ZIMMERMANN et al., 1967).

A área aproximada, utilizada para a irrigação, é da ordem de 20 m² (4 m x 5 m). Nesta área, de tempos em tempos, são feitos furos com auxílio de um trado para coleta de amostras de solo, com a finalidade de se monitorar a pluma de água tritiada.

Em regiões com taxas de evapotranspiração mais elevadas, a técnica de irrigação na superfície é substituída em favor de uma injeção tipo seringa, onde o traçador é injetado a uma profundidade abaixo da zona de influência das raízes das plantas. A água tritiada é injetada em furos de diâmetro de $V\%$ arranjados em forma de cruz (FIGURA 4.2). Em geral, são feitos cinco conjuntos de injeções, cada um contendo cinco pontos. Isto garante a possibilidade de se fazerem 4 a 5 amostragens de solo em diferentes intervalos de tempo, sem afetar o solo natural e as condições ao redor do conjunto ainda não amostrado. Após as

injeções, os furos são preenchidos com solo. De acordo com POLI (1989), os conjuntos de injeções devem ser feitos com distanciamento entre si de 1 a 5 m para se evitarem problemas de interferência entre um conjunto e outro, nos casos de haver algum movimento horizontal da água por caminhos preferenciais.

BLUME et al. (1967) sugerem injetar o traçador em pontos individuais, distanciados de 5 a 10 cm ao longo de uma linha reta horizontal. A série de pontos de injeção precisa somente de concentrações toleráveis do traçador. Após algum tempo, estes pontos estarão praticamente indistinguíveis, constituindo-se então numa verdadeira linha de injeção.

Segundo estes mesmos autores, a utilização desta ou daquela metodologia vai depender basicamente das características do solo, vegetação, evapotranspiração da região em estudo e disponibilidade de equipamentos.

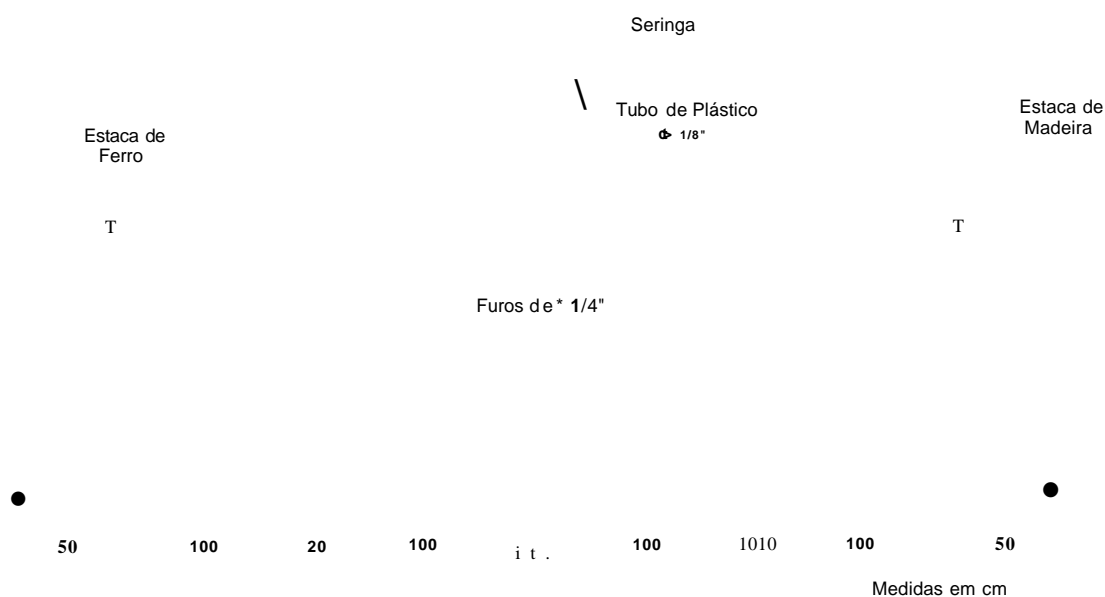


FIGURA 4.2 - Representação esquemática de injeção pontual de água tritiada no solo, vista lateral e em planta, (POLI, 1989).

4.5 Movimentação da água tritiada na zona não-saturada do solo

O movimento da água tritiada (HTO) na zona não-saturada de um solo pode ser analisado considerando-se este traçador como ideal, ou seja, não **há** interação traçador-solo.

A despeito desta vantagem, apresentam-se a seguir, de uma maneira genérica, os mecanismos de deslocamentos dos fluidos miscíveis ou solutos (constituintes naturais, traçadores artificiais ou contaminantes) no solo.

A mobilidade de solutos em meios porosos é controlada basicamente por dois processos físicos: convecção e dispersão/difusão.

A convecção⁶ pode ser definida como o transporte vertical induzido por instabilidade hidrostática, decorrente de gradientes de potencial (FISCHER et al., 1979). A dispersão hidrodinâmica ou simplesmente dispersão é a tendência de espalhamento do soluto em um meio poroso durante a convecção. Os fenômenos de dispersão/difusão ocorrem quando, em um meio poroso, coexistem dois fluidos miscíveis, tendendo então a produzir uma mistura na zona de contato. A difusão molecular é devida à energia cinética e à agitação térmica das partículas do soluto em contato com o meio, ocorrendo quando existem gradientes de concentração.

A teoria do deslocamento miscível assume que o soluto ao ser transportado através do solo pela solução percolante, fica sujeito aos processos de mistura dentro dos poros, o que ocorre como resultado da difusão e da dispersão. Estes dois processos ocorrem simultaneamente no solo, porém a difusão adquire maior importância em condições estáticas da solução, enquanto a dispersão só vai ocorrer em condições dinâmicas e aumenta à medida que a velocidade de deslocamento da solução nos poros aumenta (WAGENET, 1986).

De acordo com CUSTÓDIO & LLAMAS (1976), o movimento vertical de um traçador no solo, considerando os processos dispersivos, difusivos e convectivos, pode ser solucionado através da equação do transporte de solutos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4.3)$$

onde:

Em algumas áreas do conhecimento, a **convecção** é sinônimo de advecção ou fluxo de massa. A **advecção** é o nome dado ao transporte de um constituinte pelo campo de velocidades do meio fluido que o contém. (FISCHER et al., 1979).

$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ representa o transporte por difusão/dispersão, e D é o coeficiente de

difusão/dispersão (medido em $\text{cm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$);

$V \frac{\partial C}{\partial x}$ representa o transporte por convecção, e V a velocidade de deslocamento do

solute nos poros ($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$);

t é o tempo (em anos);

x é deslocamento do traçador (fluxo unidirecional, em cm), e

C é a concentração do soluto ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

4.5.1 Deslocamento de um traçador em um meio poroso homogêneo

Imaginemos, numa situação inicial, o movimento de uma massa de água em um meio poroso homogêneo a uma certa profundidade. Esta camada, na ausência da difusão/dispersão permanecerá uma camada definida durante o movimento descendente se a velocidade vertical for exatamente a mesma em todo o lugar. Neste caso, poder-se-ia tratar o movimento como o de um corpo rígido que se moveria por pulsos, e o fluxo se assemelharia ao movimento de um pistão (fluxo em pistão). Porém, se a velocidade no movimento descendente difere levemente de um lugar para outro, ocorre, então, uma dispersão longitudinal (longitudinal significa na direção do movimento, neste caso, o vertical). O centro de massa da distribuição do traçador se desloca sofrendo uma dispersão lateral com $D_y = D_z$ e uma dispersão longitudinal D_x várias vezes maior que a lateral, FIGURA 4.3.

Consideremos agora a inexistência de movimento da solução no solo (fluxo convectivo), a difusão molecular passa a ser a única forma de transporte do traçador no seio do meio poroso. Desta forma, supondo-se que a direção de variação da concentração do traçador seja no eixo x e, se as variações nas direções y e z forem desprezadas, a Equação 4.4 possibilita o cálculo da concentração (C) de um dado traçador no seio do meio poroso, desde que sejam conhecidas as condições iniciais, as condições de contorno e o valor do coeficiente de difusão molecular (D_m).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dm \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{4.4}$$

A solução analítica da Equação (4.4) é dada por:

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{4Dm \cdot t}} \exp\left[-\frac{x^2}{4Dm \cdot t}\right] \tag{4.5}$$

onde M é a massa do traçador por unidade de área (g.m⁻²).

É interessante notar que a equação acima coincide com uma função densidade de probabilidade gaussiana para M = 1 e variância espacial igual a 2Dm.t.

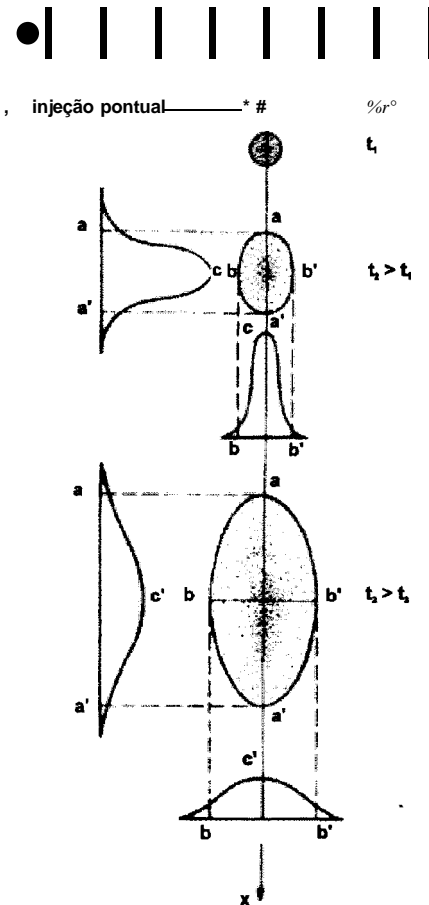


FIGURA 4.3 - Dispersão de uma massa infinitesimal de um traçador em um fluxo uniforme (unidimensional), indicando a forma da mancha em vários tempos e a distribuição de concentrações segundo os eixos do elipsóide originado (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1976)

A característica gaussiana da função sugere que a concentração possa ser encarada como uma medida da probabilidade de se encontrar uma certa quantidade do traçador em uma dada posição, em um determinado instante. CSANADY (1973) mostra que o fenômeno da difusão molecular pode ser abordado através de um ponto de vista estatístico.

Outro aspecto notável mostrado pela Equação 4.5 é o crescimento linear da variância espacial da nuvem do traçador com o tempo. Esta propriedade é de fundamental importância, pois permite que se calcule, na prática, o coeficiente de difusão molecular. Outro aspecto importante é que se esta variância cresce com o tempo, logo, a concentração de pico deve diminuir com o tempo para que haja a conservação da massa do traçador.

As curvas de concentração do traçador em função do tempo, chamadas de curvas de penetração, podem apresentar, como na Estatística, uma conformação aguda (leptocúrtica) ou mais achatada (platicúrtica). A simetria das curvas vai depender do grau de retenção do traçador e do meio poroso como um todo.

4.6 Formulação matemática para o cálculo da recarga de água em zona não-saturada de um solo

O método direto para estimar a medida da infiltração ou recarga em região não-saturada de solos foi desenvolvido por MXJNNICH, na Universidade de Heidelberg (Alemanha), em 1968. É baseado no movimento do traçador radioativo artificial (tritio) no perfil do solo, conforme descrito em capítulos anteriores.

A posição do tritio no perfil do solo pode ser determinada através do centro de gravidade (centro de massa) da pluma do traçador ou pela posição da concentração de maior valor, o qual é denotado por Z_{c_g} , (Equação 4.6).

$$CG = Z_{c_g} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{mi} \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4.6)$$

onde Z_{mi} representa a profundidade do ponto médio do intervalo i ; $S_i = C_i \cdot AZ_i$, a área no histograma do perfil do tritio. C_i e AZ_i representam, respectivamente, a concentração do traçador e a espessura do solo percorrida, no intervalo de tempo i .

A velocidade da água no solo é deduzida a partir do deslocamento do traçador abaixo da superfície do solo. O fluxo médio da água no solo (q), entre a superfície e a profundidade Z_c é dada pela equação:

$$q = \frac{1}{t_r} \cdot \int_0^{\infty} \theta(z) dz \quad (4.7)$$

onde:

q = fluxo médio da água no solo, em $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$;

θ = umidade volumétrica do solo (conteúdo volumétrico de água), adimensional e

t_r = é o tempo decorrido no experimento (geralmente contabilizado por ciclos hidrológicos completos); expresso em anos.

Se considerarmos um tempo relativamente longo, o fluxo através do meio poroso fica em regime permanente. Este regime caracteriza-se pela invariabilidade do sistema solo-água com respeito ao tempo e uma variabilidade com respeito à posição, ou seja, θ não varia com t , mas sim com z , e este gradiente de umidade determina o fluxo q .

A umidade volumétrica θ é função da profundidade e pode ser obtida relacionando-se a umidade gravimétrica (U) e a densidade aparente (ρ_b) através da seguinte expressão:

$$\theta = \rho_b \cdot U \quad (4.8)$$

As Equações 4.6, 4.7 e 4.8 são as equações fundamentais que serão utilizadas para o cálculo da recarga.

SAXENA (1996) mostrou que o modelo de fluxo unidirecional descreve razoavelmente bem o movimento da água tritiada e da umidade do solo.

Em nossos experimentos, foi adotada também esta condição de contorno, ou seja, fluxo unidirecional. O problema do espalhamento da nuvem do traçador é reduzido, podendo ser negligenciável quando o movimento vertical do traçador/umidade do solo é relativamente mais rápido do que a difusão horizontal. Isto, geralmente, ocorre quando se considera período relativamente longo, ou seja, $t > 1$ ano.

CAPÍTULO 5

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aqui apresentada se limita à metodologia empregada de marcação de trítio artificial para o cálculo da infiltração/recarga de água em zona não-saturada de solos. É uma complementação do CAPÍTULO 4, com a apresentação do estado da arte dos principais trabalhos publicados.

Os primeiros trabalhos envolvendo a metodologia de marcação com trítio artificial foram desenvolvidos por ZIMMERMANN et al. (1967) e MUNNICH (1968). Estes autores fizeram uma série de experiências no sul da Alemanha, objetivando verificar a distribuição espacial, tanto vertical como horizontal, do trítio injetado em solos arenosos e argilosos com diferentes conteúdos de umidade. O movimento da água no solo foi monitorado por meio da distribuição do traçador a várias profundidades. Sob a condição de que a água do solo não se desvia do movimento vertical, a infiltração da água de precipitação leva a um deslocamento camada abaixo. Tão logo a capacidade de campo é excedida, uma zona de água gravitacional é produzida. O "front" desta zona inicia o movimento para baixo, num fluxo denominado por estes autores de fluxo em pistão.

ZIMMERMANN et al. (op. cit), mostraram que, após algum tempo da aplicação, o espalhamento do traçador apresenta uma distribuição gaussiana, devido à difusão molecular. No movimento vertical, a dispersão é superimposta pelo movimento lento da umidade. Os perfis do trítio para um solo homogêneo e onde os grãos não são tão diferentes na sua forma e tamanho, devem exibir uma distribuição gaussiana. A largura da distribuição gaussiana (a) possibilita o cálculo do coeficiente de difusão (D_m) da água no solo através da relação $a^2 = 2D_m.t$, onde t é o intervalo de tempo entre a injeção/aplicação do traçador e a amostragem.

COREY (1968), mediu o tempo para a água se evaporar de um solo arenoso quando o traçador é colocado às profundidades de, 15 a 28 cm e 29 - 48 cm. A água tritiada, colocada entre 15 a 28 cm de profundidade, não se evapora antes de 60 horas; no intervalo de 29 - 48 cm, a água não se evapora antes de 200 horas para um solo com 10% de umidade.

DATTA et al. (1973), estudaram o movimento da água em solos após as monções do ano de 1971, em 45 locais situados nas planícies aluvionares Indo Gangetic de Uttar Pradesh, na Índia. A água tritiada foi injetada a uma profundidade de 70 cm para evitar a evaporação e a influência das raízes das plantas. Três conjuntos de injeções foram feitos, cada um com seis furos; 2,5 mL de água tritiada com concentração de 1 pCi.mL^{-1} foram injetados em cada furo. Os perfis dos picos do trítio mostraram uma recarga média de $21,5 \text{ cm.ano}^{-1}$.

GOEL et al. (1977), estudaram o movimento da água na zona não-saturada de solos, utilizando-se a marcação do trítio artificial em 26 locais da região de Haryana (Índia), onde prevalece o clima semi-árido. Neste trabalho, a injeção da água tritiada foi feita em conjunto de cinco pontos distanciados 10 cm e dispostos em forma de cruz. A recarga média foi calculada em 19 cm.ano^{-1} . As variações, nos valores da recarga, foram atribuídas às variações no conteúdo de argila presente nos diferentes solos. Os coeficientes de difusão para a água, em solos da região de Haryana, variavam de $1,0 \times 10^{-5}$ a $1,8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$.

DATTA & GOEL (1977), estudaram a recarga vertical em 21 locais no Estado de Panjab (Índia), devido às monções do ano de 1972. A região é caracterizada por climas árido e semi-árido. A recarga média foi da ordem de $8,5 \text{ cm.ano}^{-1}$ e corresponde a 18% da precipitação média.

DATTA et al. (1980), em trabalhos com o trítio artificial na Bacia Sabamarti (Índia), verificaram que a recarga era limitada a 5-7% do "input" de água (precipitação + irrigação). Os dados mostraram, para todas as regiões com solos argilosos e naqueles que possuem um nível d'água raso, uma deficiência na recarga. Estes autores sugerem também que, para confirmar ou comparar a estimativa de recarga em uma área, é desejável uma coleta de dados de dois ou mais ciclos hidrológicos consecutivos.

CHANDRA & POLI (1980), estimaram a recarga no local de disposição de rejeitos radioativos no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo, por injeção de trítio a 70 cm de profundidade. Neste local, caracterizado por ter um clima tropical, a recarga medida foi de 19 cm, no período de maio de 1979 a maio de 1980.

POLI (1989), em estudos pioneiros com a aplicação da técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial em pesquisas hidrogeológicas no Brasil, apresentou uma série de medições de recarga em terrenos subtropicais úmidos e semi-áridos quentes. A metodologia empregada foi a injeção do trítio a uma profundidade abaixo da zona de raízes (70 cm), em conjuntos de injeção, cada conjunto tendo cinco pontos distanciados 1 metro um

do outro, em linha reta. Em cada ponto, foi injetado 2,5 mL de água tritiada com uma concentração de 1,2 uCi.mL⁻¹. Os resultados obtidos para a recarga nestes trabalhos foram:

Local	Recarga (m)	Período (meses)
Viveiro - SP	0,60	5
Cajati-Jacupiranga - SP	1,90	12
Bacia Costa Leste - RN:		
Goianinha	0,12	12
Campo Limpo	0,27	12
São José do Mipibu*	0,40	12
Nízia Flores*	0,40	12
Posto da Marinha*	0,42	12

* predomínio de solo arenoso.

BOWEN et al. (1990), avaliaram a velocidade de infiltração e a evapotranspiração na Amazônia Central, perto de Manaus (Brazilian Project - IAEA). O trítio artificial em concentração inicial de 60.000 UT.L⁻¹ foi usado como traçador do movimento da água na zona não-saturada. Amostras de solo foram coletadas 139 e 407 dias após a aplicação, e o conteúdo de trítio foi medido na água do solo da região em estudo. Um modelo numérico foi desenvolvido, possibilitando a simulação do movimento da água no solo em intervalos diários. Os resultados deste experimento mostraram uma velocidade média de percolação de, aproximadamente, 1,1 cm.dia⁻¹ e uma evapotranspiração de 40% da precipitação anual.

POLI (1993), estudou a infiltração da precipitação em Abadia de Goiás-GO (Repositório do ¹³⁷Cs) pelo método de marcação da água do solo com trítio artificial. A injeção da água tritiada (concentração de 1,5 uCi.mL⁻¹ por cada injeção) foi realizada a uma profundidade de 50 cm. O valor médio da recarga foi calculado em 27,12 cm.a⁻¹. Este valor de recarga corresponde a uma taxa média anual de 18,28% da precipitação total.

COOK & WALKER (1996), apresentaram os resultados de uma série de estudos para a estimativa do fluxo de água em solo usando ³H e ³⁶Cl em regiões áridas e semi-áridas da Austrália. Estes dois traçadores foram utilizados para cálculos comparativos. Para altas taxas de recarga (> 100 mm. a⁻¹), os valores encontrados foram concordantes numa faixa de ± 25%. Para taxas de recarga moderada (20 a 100 mm. a⁻¹), a concordância ficou, aproximadamente,

da ordem de $\pm 50\%$. Para baixas taxas de recarga ($< 20 \text{ mm. a}^{-1}$), a velocidade do ^3H é maior do que o ^{36}Cl . Os autores sugerem que o ^3H e ^{36}Cl não devem ser usados para estimar a recarga subterrânea, quando a mesma for inferior a 20 mm. a^{-1} ou onde $R/P = 10^{-3}$ ($R =$ recarga, e $P =$ precipitação). Nos casos onde os fluxos de água são muito baixos, a difusão destes traçadores pode levar a uma superestimação do fluxo.

Pode-se verificar que, apesar dos inúmeros trabalhos relacionados ao movimento da água na zona não-saturada dos solos, os diversos autores não enfatizam, do ponto de vista geológico/pedológico, os fatores ou atributos que controlam a percolação ou recarga de água nos solos estudados.

CAPÍTULO 6

METODOLOGIA ESPECÍFICA E TRABALHO EXPERIMENTAL

6.1 *Áreas selecionadas para os experimentos*

A área do futuro Aterro Sanitário de Capitão Eduardo foi selecionado para os ensaios de campo por se tratar de uma área desabitada, cercada e de acesso controlado.

Nos domínios dessa área, foram selecionadas duas sub-áreas para a aplicação do trítio sob a forma de água tritiada, FIGURA 6.1. Os critérios que serviram de base para a escolha destas sub-áreas foram:

- localização em células pré-demarcadas pela Superintendência de Limpeza Urbana - SLU, onde futuramente funcionará o Projeto de Biorremediação⁷ da PMBH, para o tratamento do lixo urbano da região norte e nordeste de Belo Horizonte;
- ocorrência de solos diferentes (textura e mineralogia) tal que permitisse a obtenção do maior número de dados sobre a percolação do trítio, e
- facilidade de acesso tal que possibilitasse a execução da aspensão da água tritiada e dos furos de sondagem para amostragem do solo

Na sub-área 1, a vegetação rasteira presente (gramíneas) foi mantida por ocasião da aplicação da água tritiada; na sub-área 2, a cobertura vegetal foi retirada objetivando uma comparação de dados.

Biorremediação é um processo de disposição e tratamento de lixo urbano, cuja degradação é feita por bactérias alóctones. Tais bactérias aceleram a decomposição do resíduo orgânico. O chorume produzido durante este processo retorna à célula de lixo. A degradação da matéria orgânica dura em média 2 anos.

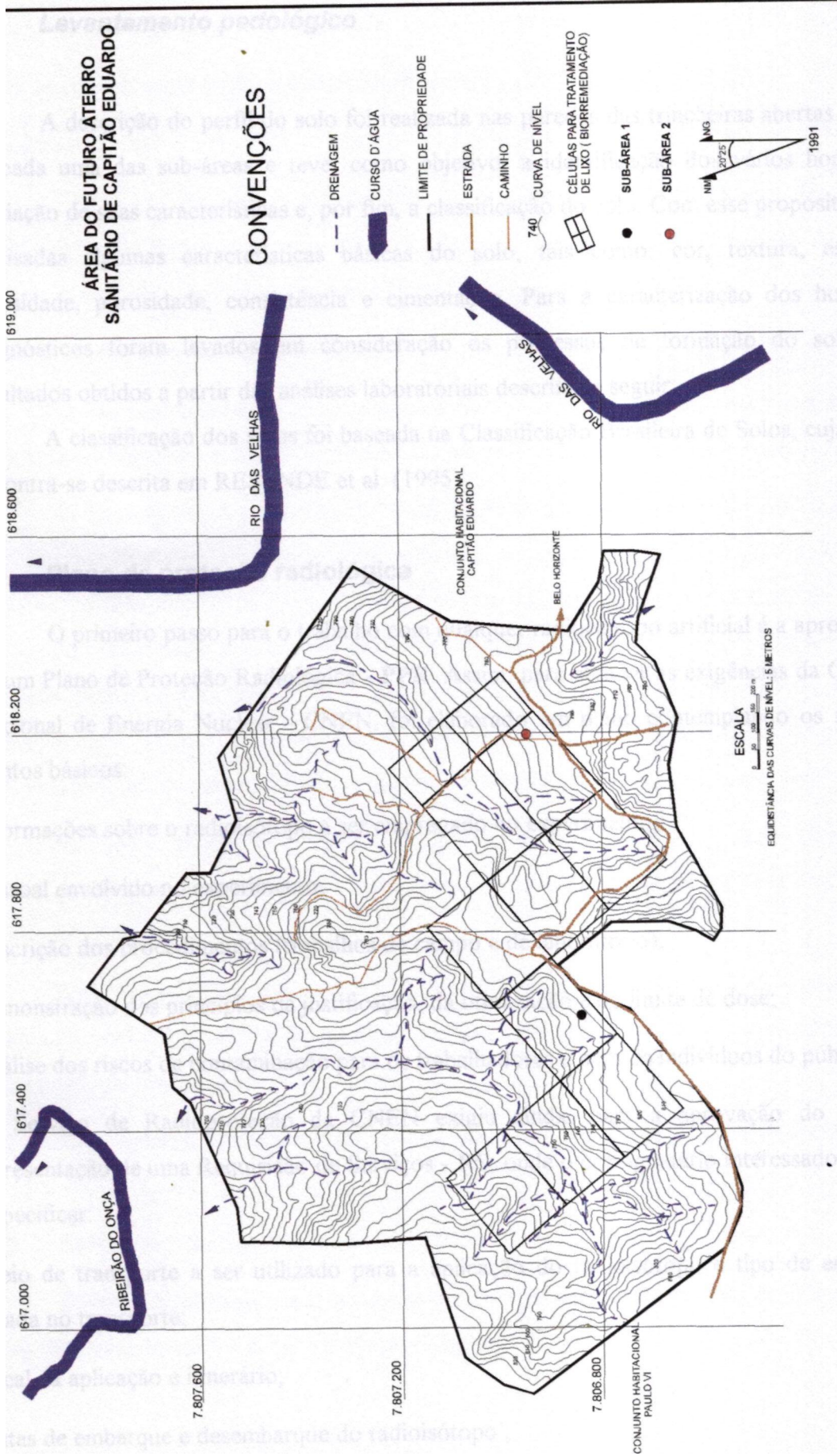


FIGURA 6.1 - Mapa de localização das sub-áreas 1 e 2 (Base de dados: PRODABEL).

6.2 Levantamento pedológico

A descrição do perfil do solo foi realizada nas paredes das trincheiras abertas ao lado de cada uma das sub-áreas e teve, como objetivo, a identificação dos vários horizontes, avaliação de suas características e, por fim, a classificação do solo. Com esse propósito foram analisadas algumas características básicas do solo, tais como: cor, textura, estrutura, cerosidade, porosidade, consistência e cimentação. Para a caracterização dos horizontes diagnósticos foram levados em consideração os processos de formação do solo e os resultados obtidos a partir das análises laboratoriais descritas a seguir.

A classificação dos solos foi baseada na Classificação Brasileira de Solos, cuja síntese encontra-se descrita em RESENDE et al. (1995).

6.3 Plano de proteção radiológica

O primeiro passo para o trabalho com qualquer radioisótopo artificial é a apresentação de um Plano de Proteção Radiológica - PPR. Assim, para atender as exigências da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, foi elaborado um plano contemplando os seguintes pontos básicos:

informações sobre o radioisótopo a ser empregado no experimento;

pessoal envolvido no experimento;

descrição dos procedimentos (trabalhos de campo e de laboratório);

demonstração dos princípios da justificativa, da otimização e do limite de dose;

análise dos riscos de contaminação para os trabalhadores e para os indivíduos do público

O Serviço de Radioproteção da CNEN exigiu ainda, para a aprovação do Plano, a apresentação de uma Requisição de Serviços - RS, onde o consignatário interessado teria que especificar:

meio de transporte a ser utilizado para a aplicação do radioisótopo e tipo de embalagem usada no transporte;

local da aplicação e itinerário;

datas de embarque e desembarque do radioisótopo ;

- ambiente de trabalho e cuidados especiais;
- riscos de contaminação para os trabalhadores e para os indivíduos do público;
- equipe de trabalho.

O **PPR** e a **RS** para a aplicação do trítio artificial no futuro Aterro Sanitário de Capitão Eduardo foram analisados e autorizados pelo Serviço de Radioproteção da CNEN, em Belo Horizonte e encontram-se nesta Dissertação como **ANEXO 1**.

6.4 Preparação da água tritiada

Devido à atividade do trítio requerida para o experimento foi necessária uma pré-diluição em laboratório e uma diluição final no próprio local dos trabalhos de campo.

No laboratório, o manuseio do trítio foi realizado no interior de uma capela com exaustão, localizada em área controlada, onde funciona o reator TRIGA do CDTN/CNEN. O conteúdo de uma ampola de vidro contendo 104,01 mCi de trítio em um volume de 4,73 mL foi vertido em um balão volumétrico de 10 mL, o qual teve seu volume completado com água destilada (água neutra). Da solução deste balão, foi pipetado um volume de 0,19 mL correspondente a 2 mCi. Este volume foi vertido por sua vez em um frasco de polietileno contendo 200 mL de água destilada, o qual foi levado ao campo para a diluição final.

No campo, dividiu -se o volume de 200 mL da água tritiada em duas alíquotas de 100 mL, cada uma contendo então 1 mCi de atividade, para aplicação em cada uma das sub-áreas selecionadas.

Para cada sub-área, tomou-se a alíquota 100 mL da solução pré-diluída e processou-se a diluição final em bombona de plástico, completando-se o volume de água para 50 litros (capacidade da bombona).

Teoricamente, a concentração final da água tritiada seria então de 1 mCi em 50 litros de água ou 20 nCi.mL⁻¹.

6.5 Aplicação da água tritiada no solo

Após a diluição final, cada bombona de 50 litros de água tritiada foi conduzida às sub-áreas denominadas de 1 e 2, para a injeção/irrigação.

A água tritiada foi irrigada, em cada sub-área, em uma única etapa, diretamente na superfície do terreno, em área retangular de 4 x 5 m (20 m²), com o auxílio de um regador comum, com capacidade de 12,5 litros.

Durante a irrigação, procurou-se distribuir a água tritiada da maneira mais uniforme possível por toda a área selecionada. Para a sub-área 1, foi aspergido, adicionalmente, 50 litros de água comum por toda a superfície já irrigada. Uma fina película de água de 2,5 mm de espessura protegeu, desta forma, a água de uma rápida evaporação.

Na distribuição do radionuclídeo diretamente na superfície do terreno, a metodologia de injeção planar foi a escolhida porque no mês de dezembro (época do experimento) a evaporação na região é a menor possível e a precipitação (chuva) apresenta o seu maior índice, o que favorece o deslocamento do traçador camada abaixo. Além do mais esta metodologia é a que melhor retrata as condições naturais de percolação da água de chuva na zona não-saturada de um solo.

6.6 Amostragem de solo

As amostragens de solo foram efetuadas com duas finalidades básicas:

- para a determinação da concentração de trítio e
- para a caracterização físico-mecânica e mineralógica.

6.6.1 Amostragem para a determinação da concentração de trítio no solo

A partir da data de irrigação e de 4 em 4 meses foi executado um furo de sondagem (diâmetro de 6"), em cada sub-área, com auxílio de um trado mecanizado para a coleta de amostras de solo visando ao acompanhamento do posicionamento da pluma do traçador. A amostragem em furos de sondagem foi realizada com intervalos regulares de 10 cm (amostragem contínua) até a profundidade desejada.

Um cuidado especial foi tomado durante a execução dos furos para que as amostras de níveis superiores não contaminassem as amostras de níveis inferiores, o que poderia mascarar e superestimar todo o cálculo de recarga.

As amostras de solo referentes às campanhas de sondagem realizadas nos meses de abril, agosto e dezembro/96 foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao laboratório para a destilação à vácuo.

6.6.2 Amostragem para caracterização físico-mecânica e mineralógica do solo

As amostras de solo utilizadas nas diversas análises de laboratório foram coletadas com estruturas deformadas e indeformadas, cobrindo os diversos horizontes pedológicos mapeados:

- amostras deformadas:

essas amostras foram obtidas nas sondagens verticais realizadas com o auxílio de trado motorizado e nas paredes das trincheiras abertas nas proximidades de cada uma das sub-áreas. Essas amostras foram utilizadas em ensaios que não exigiam a preservação da estrutura do solo, tais como: granulometria, densidade real, análise mineralógica por difratometria de raios X, conteúdo de trítio, umidade gravimétrica do solo, capacidade de campo e ponto de murcha;

- amostras indeformadas:

as amostras indeformadas foram obtidas nas paredes das trincheiras supra-mencionadas. Estas amostras" foram coletadas pelo método do anel volumétrico/cilindro de cravação e pelo método do torrão/saboneteira, sendo utilizadas na determinação da densidade aparente e macroporosidade do solo.

6.7 Ensaios realizados (Trabalhos de Laboratório)

6.7.1 Determinação da concentração de trítio

As amostras de solo provenientes das campanhas de sondagem foram encaminhadas ao Laboratório de Destilação do CDTN para a extração da água contida.

Para a extração da água contida nas amostras de solo montou-se uma linha de destilação a vácuo para o processamento simultâneo de 5 (cinco) amostras. As amostras de solo (peso aproximado de 250 g) foram acondicionadas em balões de destilação e, em seguida, aquecidas, utilizando-se mantas aquecedoras, a temperaturas superiores a 110° C. O vapor d'água gerado no processo foi condensado durante sua passagem pelos condensadores, refrigerados com água corrente. Continuando o processo de destilação, o vapor d'água, já sob a forma líquida, foi recolhido em coletores e mantidos resfriados com nitrogênio líquido em garrafas térmicas - tipo "Dewar".

Com a finalidade de se evitar erros por causa do fracionamento isotópico, procurou-se retirar praticamente toda a água do solo porque a água tritiada tem uma pressão de vapor menor que a da água ordinária e, portanto, se a destilação não for completa, a água remanescente pode ser enriquecida em trítio e o condensado depletado (POLI, 1989).

O processo de destilação demorou, em média, 60 minutos para cada batelada, após o qual obtêve-se uma amostra aquosa de aproximadamente 40 mL, volume este perfeitamente suficiente para a análise requerida e para a obtenção de amostras duplicatas. Um sistema de vácuo, bomba com pressão ajustada a -5 cm de Hg, foi utilizado para agilizar o processo de destilação.

A composição da linha de destilação a vácuo foi esquematizada da seguinte forma, FIGURA 6.2:

gabinete de madeira revestido em fórmica para a destilação simultânea de 5 (cinco) amostras de solo; dimensões: 1,60 m de comprimento, 0,70 m de largura e 0,40 m de altura,

ramal de vidro, 1,80 m de comprimento, com cinco torneiras para vácuo para utilização em operação de rotina e uma torneira para sangria, ou seja, para reequilíbrio da pressão;

balão de destilação, em vidro marca Pirex, capacidade para 1 litro, gargalo curto, fundo redondo e junta esmerilhada 29/32;

condensador reto, em vidro marca Pirex, 30 cm de comprimento, juntas esmerilhadas 29/32 nas extremidades, em ângulos de 45° , com duas "saída/entrada" laterais para circulação de água de refrigeração,

frasco coletor, em vidro marca Pirex, diâmetro de 3,5 cm, junta esmerilhada de 29/32, com saída lateral para conexão à bomba de vácuo;

bomba de vácuo, capacidade de 37 litros.min⁻¹;

erlemayer de 1 litro para coleta do "overflow" (quando existente), conectado à bomba de vácuo e à linha de extração;

garrafa térmica - tipo "Dewar", espelhada, diâmetro de 10 cm e altura de 15 cm' garrafa térmica marca INVICTA, em aço inox, nas mesmas dimensões anteriores, ambas usadas para acondicionar o nitrogênio;

garrafa térmica, marca Taylor-Wharton, capacidade para 10 litros, utilizada para acondicionamento e reservatório de nitrogênio líquido (White Martins);

manta aquecedora, tipo FISATON, 330 W, para balão de fundo redondo de 1 litro, reostato para regulagem de temperaturas;

- sistema de refrigeração para os destiladores, em mangueira de silicone de diâmetro de 3/8", e
- mangueiras de silicone de diâmetro de 3/8" para conexão junto aos frascos coletores e ramal de vácuo;
- balança analítica

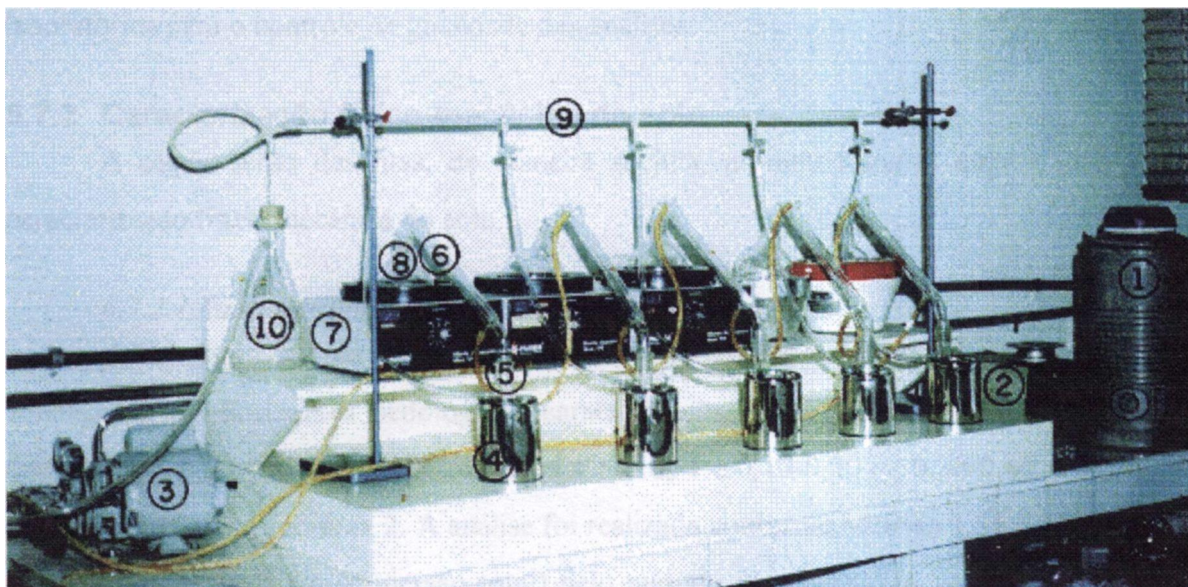


FIGURA 6.2 - Componentes da linha de destilação à vácuo

- | | | | |
|----|--|-----|---|
| 1. | Garrafa de nitrogênio Taylor - Wharton | 6. | Condensador |
| 2. | Balança analítica | 7. | Manta aquecedora |
| 3. | Bomba a vácuo | 8. | Balão volumétrico |
| 4. | Garrafa térmica tipo Devvar | 9. | Ramal c/ torneiras p/ controle de vácuo |
| 5. | Frasco coletor de água tritiada | 10. | Erlemayer |

Após cada operação de destilação, a vidraria passou por um processo de descontaminação, o qual compreendeu uma lavagem das peças em água corrente e secagem em estufa durante, no mínimo, duas horas a temperaturas superiores a 110° C.

As amostras d'água provenientes da destilação foram, então, acondicionadas em frascos de polietileno de 20 mL e enviadas ao laboratório para a determinação da concentração de trítio.

As determinações do conteúdo de trítio nas amostras obtidas durante a destilação à vácuo foram feitas no Laboratório de Trítio do CDTN e no Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas - CEDEX, em Madri (Espanha).

A detecção do trítio foi feita pelo método da cintilação líquida. A contagem por este método envolve uma mistura da amostra a ser analisada (volume de 10 mL) com um material cintilante que serve como detetor, na proporção de 1:1 em volume. Como solução cintilante,

foi utilizado o cintilador líquido denominado Pico Flúor-40 da Packard/Canberra. A contagem foi feita através do espectrômetro de cintilação líquida TPJ-CARB, modelo 2550-TR/LL, fabricado pela Canberra Industries Inc., o qual tem capacidade para analisar 1000 amostras, automaticamente.

Amostras duplicatas, em cada campanha de sondagem, foram enviadas aos laboratórios para o controle de qualidade das análises.

6.7.2 Caracterização físico-mecânica do solo

A seguir serão descritas, de maneira sucinta, as metodologias empregadas para a caracterização físico-mecânica do solo.

6.7.2.1 Análise granulométrica

As amostras de solo destinadas à análise granulométrica foram coletadas em furos de sondagens, nos horizontes pedológicos característicos, às profundidades de 0,20-0,30 m, 0,40-0,50 m, 0,50-0,60 m e 1,50-1,60 m na sub-área 1 e 0,10-0,20 m, 0,30-0,40 m, 0,90-1,00 m e 2,00-2,10 m na sub-área 2. A análise foi realizada conforme Método 1.16 da EMBRAPA - Análise granulométrica (dispersão total) pelo método da pipeta, no Laboratório de Física do Solo da UFV. De acordo com este Método, determinou-se a composição granulométrica do solo após a dispersão com NaOH 0,1 mol.L⁻¹ e agitação durante 15 minutos. A fração areia (> 230 mesh ou > 0,0625 mm) foi separada por tamização. Da fração restante (silte + argila), a fração argila (< 2 µm) foi determinada pelo método da pipeta (sedimentação baseada na Lei de Stokes) e a fração silte por diferença.

6.7.2.2 Densidade real (dr)

Seguiu-se o Método do Balão Volumétrico (Método 1.12 - EMBRAPA, 1979). A massa do solo seco, em amostras de 20 g, foi obtida através da secagem em estufa, enquanto o volume de sólidos foi obtido através do preenchimento de um balão volumétrico (50 mL), com álcool etílico. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Física do Solo, do Departamento do Solo da Universidade Federal de Viçosa. A determinação da densidade real foi realizada em amostras de solo provenientes de furos de sondagem.

6.7.2.3 Densidade aparente - bulk density (pb)

Seguiu-se o Método do Anel Volumétrico/Cilindro de Cravação (Norma NBR 9813 da ABNT, 1987)

Para tal, foi utilizado um amostrador constituído de um cilindro de aço, com volume de 50,1 cm³, com a ponta bixelada para facilitar a cravação no solo, e um soquete. De acordo com esta metodologia, o cilindro foi cravado na parede da trincheira através de sucessivos golpes com o martelo, utilizando-se um soquete para amortecer os golpes. Após a completa cravação do todo o cilindro, desbastou-se o solo em volta do mesmo e, em seguida, retirou-se cuidadosamente o cilindro da parede da trincheira; retirou-se também o excesso de material nas extremidades do cilindro e, depois, transpôs-se todo o material para uma cápsula de alumínio, a qual foi levada ao laboratório para a determinação da massa de solo seco. A determinação da massa de solo seco foi feita em conformidade com a norma da American Society for Testing and Materials - ASTM D2216-1980 (temperatura de secagem em estufa superior a 110° C e tempo de secagem superior a 16 horas).

Este tipo de ensaio foi realizado nos horizontes pedológicos característicos.

6.7.2.4 *Umidade gravimétrica*

A determinação da umidade gravimétrica em amostras de solo foi realizada em laboratório no próprio CDTN. O procedimento adotado foi o da American Society for Testing and Materials-ASTM D2216-1980 (temperatura de secagem em estufa superior a 110° C e tempo de secagem superior a 16 horas).

A umidade gravimétrica foi determinada em todas as amostras procedentes das campanhas de sondagem. Para tal, tomou-se, após um quarteamento da amostra original, uma alíquota de aproximadamente 150 g, acondicionando-a em cápsula de alumínio para posterior pesagem. As determinações das massas de água e de sólidos em cada amostra foram realizadas em laboratório.

6.7.2.5 *Umidade volumétrica*

A umidade volumétrica foi calculada pela Equação 4.8 (Capítulo 4), considerando-se os valores obtidos para a umidade gravimétrica e para a densidade aparente.

6.7.2.6 *Porosidade total (rij)*

Foi calculada a partir dos valores de densidade real (d_r) e densidade aparente (p_b), através da expressão, Método 1.13 - EMBRAPA, 1979:

$$r_{ij} = \frac{d_r}{d_r - p_b} \cdot \frac{w}{100} \quad (6.1)$$

6.7.2.7 Macroporosidade (n_{macro})

Foi obtida através do método do "Funil de Placa Porosa", a partir da utilização de amostras indeformadas coletadas nas paredes das trincheiras (amostras tipo torrão, preservadas em recipientes de plástico). A metodologia empregada corresponde ao Método 1.14 da EMBPvAPA, 1979, sendo a macroporosidade calculada pela seguinte expressão:

$$n_{macro} (\%) = \frac{V_p}{V_{total}} \quad (6.2)$$

onde:

V_p é o volume de poros desocupados da amostra, após aplicação de uma tensão de 60 cm de coluna de H_2O e V_{total} é o volume total da amostra, calculado através da relação do peso seco da amostra e a densidade aparente.

Os macroporos são poros não capilares, com diâmetros > 50 μm , responsáveis pela livre movimentação da água (gravitacional) e do ar no solo. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Física de Solos da UFV.

6.8 Análise mineralógica

A partir da análise granulométrica, foram separadas para fins de análise mineralógica duas frações:

fração areia

para a caracterização mineralógica desta fração foi feita uma separação gravimétrica utilizando-se o bromofórmio (densidade = 2,84). Desta forma, obteve-se uma fração pesada (densidade $> 2,84$) e uma fração leve (densidade $< 2,84$). A fração pesada foi em seguida submetida à uma separação magnética (imã de mão) e o material restante à separação eletromagnética (separador eletromagnético FRANTZ). Lâminas (não orientadas) "com o pó representativo das frações geradas, leve e pesada (magnética e eletromagnética), foram analisadas e os principais constituintes mineralógicos identificados por difração de raios X, utilizando-se o difratômetro PJGAKU Geigerflex, modelo D/MAX-2B;

fração argila

a partir da fração argila obtida na análise granulométrica, foram confeccionadas lâminas orientadas (saturadas com vapor de etileno glycol e aquecidas a $550^\circ C$), as quais foram

irradiadas de 2 a 35° (ângulo θ), em difratômetro de raios X, com tubo de cobre e filtro de níquel, voltagem de 35 mV e corrente de 25 mA, no CDTN.

6.9. Levantamento de *dados meteorológicos e balanço hídrico*

Os dados meteorológicos referentes à precipitação e à evaporação no período do experimento (dezembro/95 a dezembro/96), bem como os dados normais (1961 - 1990) foram levantados junto ao 5° Distrito de Meteorologia, do Instituto Nacional de Meteorologia, do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, em Belo Horizonte.

Para o período do experimento, foi elaborado um balanço hídrico a fim de subsidiar e possibilitar a intercomparação dos dados de recarga obtidos com a técnica de aplicação do traçador radioativo.

Para o cálculo do balanço hídrico, optou-se pelo método de THORNHWAITE, que utiliza, como variável primária, a média mensal das temperaturas diárias. Com esse valor, calcula-se o índice de calor mensal (i), segundo a fórmula:

$$i = (t/5)^{1.5} \quad (6.3)$$

onde.

t representa a temperatura média mensal do ar (°C); o índice de calor anual (I) é dado por $I=2i$.

A evapotranspiração potencial mensal média (λ) é dada pela seguinte fórmula:

$$\lambda = I \cdot (10 \cdot t / I) \quad (6.4)$$

onde.

$$a = 675 \times 10^{-3} t^2 - 771 \times 10^{-3} t + 1792 \times 10^{-3} I + 0,4924.$$

No cálculo da evapotranspiração potencial (ETP), deve-se corrigir o valor de λ em função da insolação máxima diária e do número de dias do mês, conforme a equação:

$$ETP = K \cdot \lambda \quad (6.5)$$

onde:

$K = N/12 \times d/30 \times d$, sendo N é o número de horas de sol (dado variável segundo a latitude) e d , o número de dias do mês.

O balanço hídrico se estabelece para quantificar o "deficit" ou o excesso de água em uma bacia hidrográfica, num determinado intervalo de tempo. Seu equacionamento pode ser expresso por:

$$P = ETR + EX + AR \quad (6.6)$$

em que:

P = precipitação em mm;

ETR = evapotranspiração real, em mm;

EX = excedente de água (escoamento + recarga), em mm e

AR = incremento da reserva de água utilizável pelas plantas, em mm.

Deve-se observar sempre a condição de **ETR < ETP**. Para o cálculo do balanço hídrico foi considerada a capacidade de reserva de água no solo, a qual foi calculada utilizando-se a fórmula:

$$CRA = \frac{cc - pm}{100} \cdot e \cdot \frac{pb}{pa} \quad (6.7)$$

onde:

CRA = capacidade de reserva de água, em mm;

cc = capacidade de campo (% em peso);

pm - ponto de murcha (% em peso);

e = espessura do intervalo considerado (mm);

pb = densidade aparente do solo e **pa** = densidade da água.

A capacidade de campo e ponto de murcha* foram determinados pelo "Método da Placa de Pressão" (extrator de Richards) por compressões de ar de 0,03 e 1,5 MPa, respectivamente. A capacidade de reserva de água no perfil de solo foi calculada, em cada sub-área, até a profundidade de 0,70 m.

Capacidade de campo é a umidade do solo, depois que o excesso de água tenha sido drenado e a sua taxa de movimento vertical descendente tenha decrescido acentuadamente;

Ponto de murcha ou umidade de murchamento é a umidade do solo abaixo da qual as plantas não conseguem retirar a água em quantidade suficiente para satisfazer as suas necessidades de transpiração (MATOS, 1995).

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos e a discussão dos mesmos serão apresentados em seis etapas:

- características pedológicas e mineralógicas dos solos;
- características físico-mecânicas dos solos;
- movimentação do traçador radioativo na zona não-saturada;
- balanço hídrico;
- cálculo da recarga e
- custos envolvidos nos experimentos.

7.1 Características pedológicas e mineralógicas dos solos

Os perfis descritos nas trincheiras escavadas em cada uma das áreas de estudo mostraram a existência de solos do tipo latossolo e podzólico provenientes de materiais de origem diferentes, horizontes alóctones e autóctones e linha de pedra.

O solo da sub-área 1 foi definido como **Latossolo Vermelho-Amarelo Câmbico - LVc** (termo intermediário entre latossolo e cambissolo), de acordo com a classificação brasileira (RESENDE et ai, 1995), TABELA 7.1. Nesta região, apresenta-se raso, com horizontes A e B "alóctones" (material coluvionar proveniente do próprio material de origem) acima da linha de pedra (0,50 m de profundidade) e horizonte C subjacente. A partir de 0,75 m de profundidade, aparece a rocha alterada (saprólito) do material de origem, que neste perfil é o gnaisse do Complexo Belo Horizonte. O horizonte diagnóstico (B) apresenta textura argilosa, teor de argila da ordem de 50%, relação silte/argila de 0,37 e presença de muscovita. A presença deste mineral primário nos levou a adjetivação do latossolo de câmbico, ou seja, o solo é um termo intermediário entre um latossolo e um cambissolo.

O solo da sub-área 2 foi caracterizado como **Podzólico Vermelho-Escuro - PE**, com textura muito argilosa, TABELA 7.2. Trata-se de um solo um pouco mais profundo que o da sub-área 1, com horizontes A e B alóctones posicionados acima da linha de pedra (0,80 m de

profundidade) e horizontes B e C autóctones. O material de origem é a rocha metabásica existente na região. A percentagem da fração argila nos horizontes A e B é da ordem de 63% e a relação silte/argila é de 0,34.

As linhas de pedra (stone line) existentes nas áreas dos experimentos representam descontinuidades erosionais. Possuem inclinação de 20°, espessuras variando de 5 a 10 cm, constituídas predominantemente de quartzo facetado, seixos sub-angulares de quartzo e mais raramente de seixos arredondados de rocha metabásica, variando de milimétrico a centimétrico. Na sub-área 1, os seixos são bem mais selecionados e se limitam ao máximo de 2 cm de diâmetro, enquanto na sub-área 2 podem atingir até 8 cm.

As cores dos solos aqui especificadas foram determinadas com base na Carta de Cores de MUNSELL, em amostras úmidas. As denominações das matizes e tonalidades, para os horizontes diagnósticos foram: 2.5YR vermelho-amarelado (yellowish red) e 2.5YR vermelho-escuro (dark red) para as sub-áreas 1 e 2, respectivamente.

As análises mineralógicas por difração de raios X mostraram a seguinte distribuição:

Para a sub-área 1:

- constituintes predominantes: **quartzo e caulinita,**
- constituinte secundário: **goethita**
- constituintes minoritários: **hematita**
- traços: **magnetita, gibbsita, ilmenita, anatásio, rutilo, monazita e muscovita/sericita**

O perfil de solo é homogêneo, não havendo importantes variações desses minerais constituintes com a profundidade. A cor mais amarelada ao longo do perfil se deve à presença de goethita. A muscovita (mineral primário) foi constatada também no horizonte diagnóstico.

Para a sub-área 2:

- constituintes predominantes: **quartzo, caulinita e goethita;**
- constituintes minoritários: **hematita**
- traços: **magnetita, gibbsita, turmalina, ilmenita, rutilo, monazita, zirconita, plagioclásio (anortita), piroxênio e biotita**

Existe uma redução substancial na percentagem de quartzo a partir de 0,50 m de profundidade. Por outro lado, a percentagem de caulinita aumenta em direção ao material de origem. Quanto à fração pesada, foi observado o predomínio da hematita sobre a magnetita (hematização mais pronunciada). O solo é mais avermelhado quando comparado com o solo da sub-área 1. Os minerais residuais representados por: ilmenita, rutilo, monazita e zirconita

foram identificados nos horizontes alóctones (solo transportado), ao passo que o plagioclásio, piroxênio e biotita nos horizontes abaixo da linha de pedra.

Os registros difratométricos da fração argila (< 2 um), em oito amostras, confirmaram, majoritariamente, a presença de caulinita (argila 1:1) e, secundariamente, a presença de goethita, FIGURAS 7.1 e 7.2.

TABELA 7.1 - Perfil de solo da sub-área 1.

Classificação	Latossolo Vermelho-Amarelo Câmbico - Lvc (2.5YR 4/6, úmido) , textura argilosa
Localização	futuro Aterro Sanitário de Capitão Eduardo - Belo Horizonte
Altitude	791m
Vegetação no local	gramíneas
Vegetação primitiva	zona de transição da floresta tropical subperenifólia/cerrado, atualmente degradada por atividades antrópicas
Clima	Cwa de Köppen (mesotérmico, com verões quentes e úmidos)
Material de origem	gnaisse do Complexo Belo Horizonte

Descrição Morfológica

A	0,00-0,20 m; bruno-avermelhado-escuro (2.5YR 3/4, úmido), textura argilosa, estrutura em bloco que se desfaz em moderada pequena granular, ligeiramente plástico e pegajoso. Horizonte alóctone.
AB	0,20-0,35 m; vermelho-amarelado (2.5YR 4/6, úmido), textura argilosa, estrutura média a pequena granular, cerosidade muito fraca e comum, ligeiramente plástico e pegajoso. Horizonte alóctone.
B	0,35-0,50 m; vermelho-amarelado (2.5YR 4/6, úmido), textura argilosa, estrutura média granular, cerosidade muito fraca, ligeiramente plástico e pegajoso. Horizonte alóctone.
Linha de Pedra	0,50-0,55 m; constituída de quartzo facetado e seixos esparsos de quartzo e rocha metabásica parcialmente intemperizada, arredondados, variando de milimétrico a centimétrico (até 2cm); seixos apresentando certo grau de seleção.
C	0,55-0,75 m; vermelho (2.5YR 4/8, úmido), mosqueado, textura argilosa, cerosidade muito fraca, ligeiramente friável.
Saprólito	0,75-2,50 ⁺ m; vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmido), textura franco-argilosa.

TABELA 7.2 - Perfil de solo da sub-área 2.

Classificação	Podzólico Vermelho-Escuro - PE (2.5YR 3/6, úmido), textura muito argilosa
Localização	Futuro Aterro Sanitário de Capitão Eduardo - Belo Horizonte
Altitude	776m
Vegetação no local	gramíneas
Vegetação primitiva	zona de transição da floresta tropical subperenifólia/cerrado, atualmente degradada por atividades antrópicas
Clima	Cwa de Köppen (mesotérmico, com verões quentes e úmidos)
Material de origem	rocha metabásica

Descrição Morfológica

	0,00-0,20 m; vermelho-escuro (2.5YR 3/6, úmido), textura muito argilosa, estrutura em bloco que se desfaz facilmente em pequena granular; plástico e pegajoso . Horizonte alóctone.
B	0,20-0,80 m; vermelho-escuro (2.5YR 3/6, úmido), textura muito argilosa, estrutura em blocos subangulares, cerosidade presente, plástico e pegajoso. Horizonte alóctone.
Linha de Pedra	0,80-0,90 m; constituída de quartzo facetado e seixos sub-angulares de quartzo e rocha metabásica parcialmente intemperizada, bem arredondados variando de milimétrico a centimétrico (até 8cm).
B	0,90-1,65 m; vermelho (2.5YR 4/8, úmido), textura argilosa, pequena granular, cerosidade fraca e comum, plástico e pegajoso. Horizonte autóctone.
	1,65-2,60 m; vermelho (2.5YR 4/6, úmido), textura franco-argilosa, cerosidade muito fraca, ligeiramente plástico e pegajoso; presejiça de óxidos de ferro.
Saprólito	2,60-2,80 m, vermelho (2.5YR 4/8, úmido), textura franco-argilosa, manchas de caulim, presença de goethita e hematita.

Observações:

- presença de raízes aciculares (finas) até o horizonte B autóctone;
- canais de atividade biológica acima da linha de pedra;
- linha de pedra denotando a presença de solo transportado.

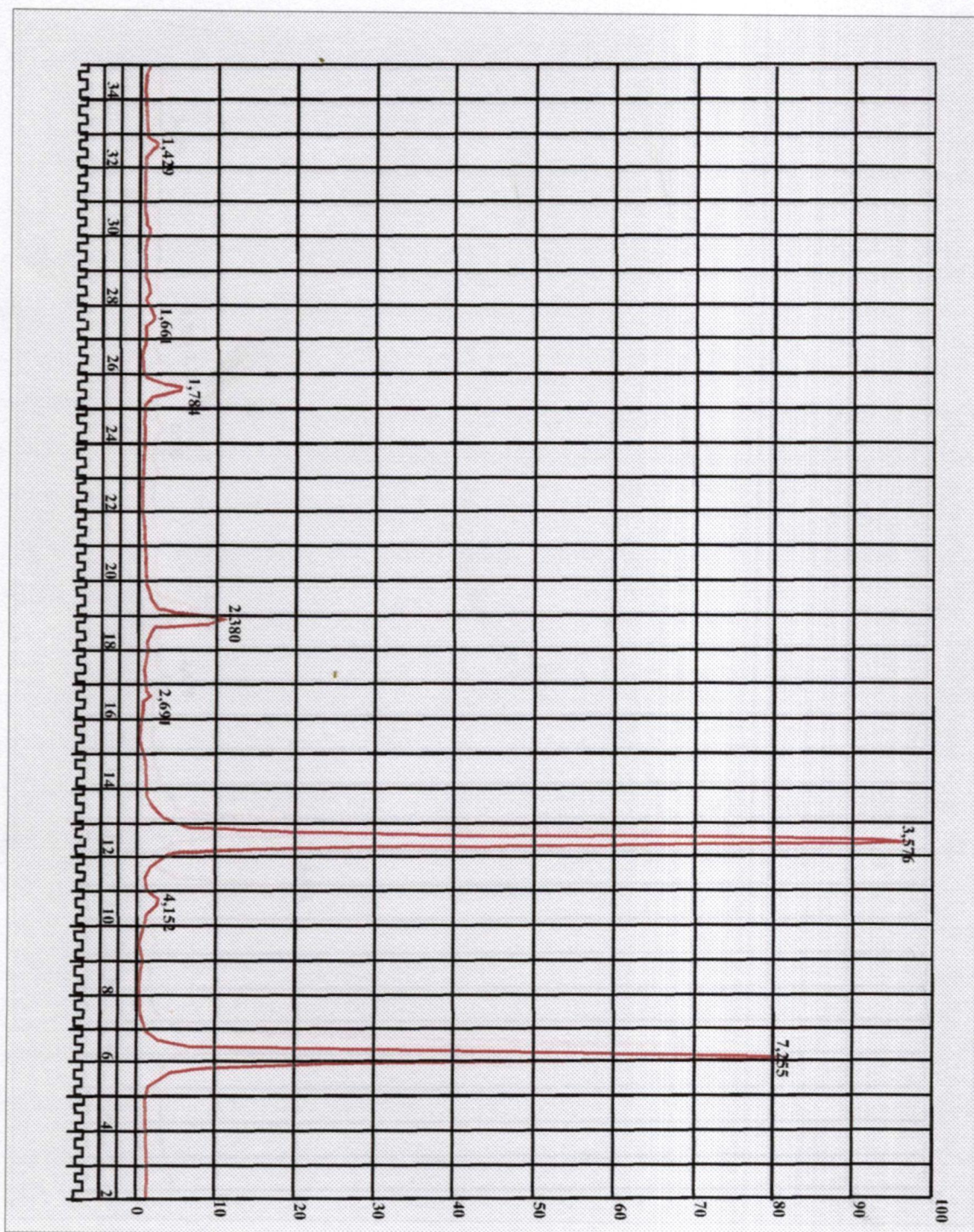


FIGURA 7.1 - Difratoograma de raios X (Cu K α) da fração argila da sub-área 1, em amostra orientada, seca ao ar, mostrando a caulinita (espaçamentos interplamares de 7,25; 3,57; 2,38; 1,78; 1,66 e 1,42 Å) e goethita (4,15 e 2,69 Å), imagem digitalizada.

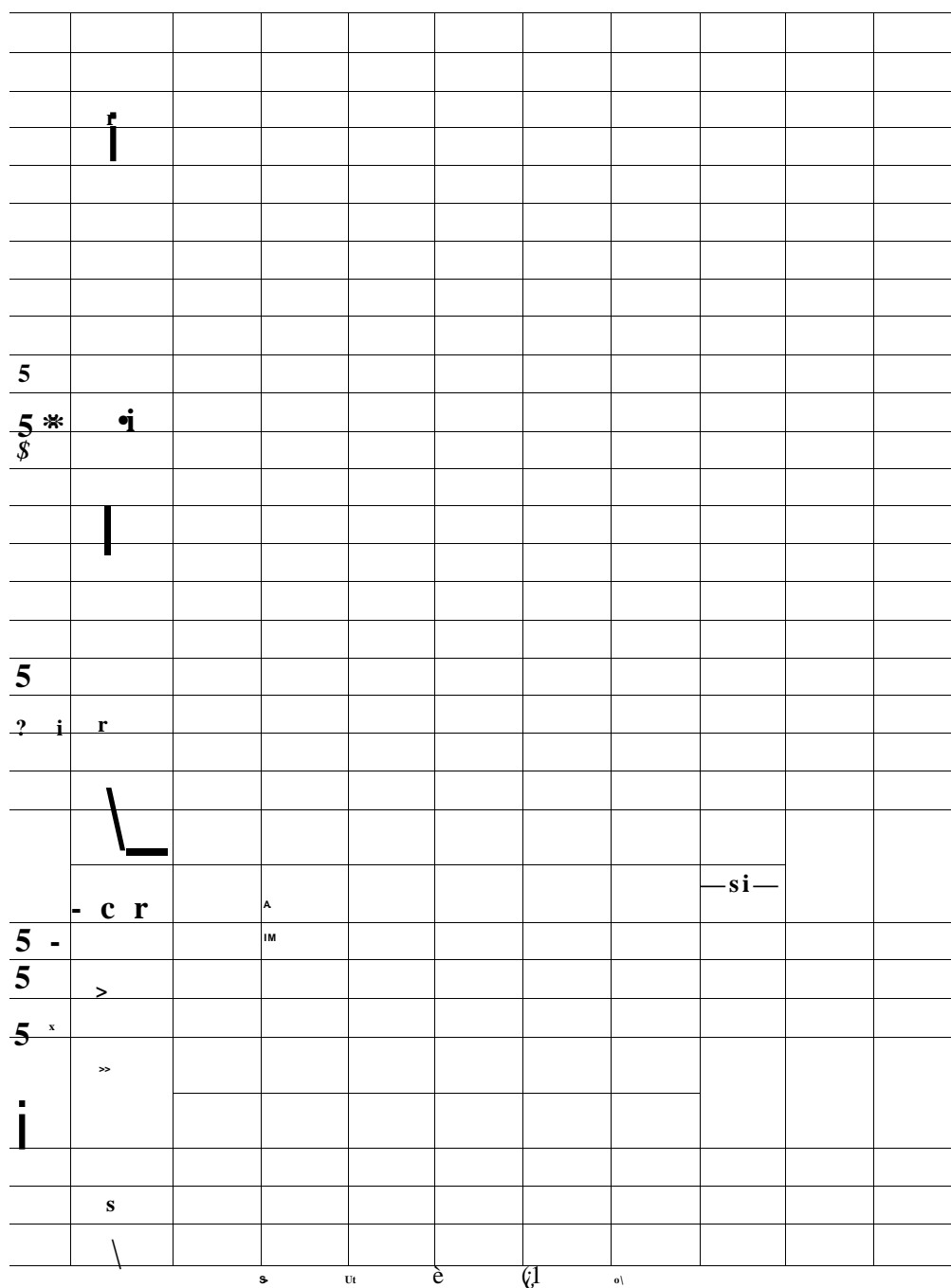


FIGURA 7.2 - Difratoograma de raios X (Cu K α) da fração argila da sub-área 2, em amostra orientada, seca ao ar, mostrando a caulinita (espaçamentos interplamares de 7,19; 3,57; 2,38; 1,78; 1,70 e 1,42 Å) e goethita (4,15 e 2,67 Å), imagem digitalizada.

7.2 Caracterização físico-mecânica dos solos

7.2.1 Análise granulométrica

Na TABELA 7.3 estão apresentados os dados de análise granulométrica para os solos das sub-áreas 1 e 2.

Na sub-área 1, os percentuais de argila, silte e areia variam nos horizontes A e B "alóctones" e no horizonte C de 52 a 47, 13 a 21 e 32 a 35, respectivamente. A variação mais sensível pode ser notada na percentagem de silte do horizonte A (alóctone), quando comparado com o horizonte C. Já o saprólito apresenta uma distribuição equitativa para os percentuais de areia, silte e argila. De acordo com a classificação adotada pela EMBRAPA (1979) e pelo U. S. Dept. Agriculture (triângulo americano), o horizonte diagnóstico (B) pode ser enquadrado na classe textural de argila, enquanto o saprólito na de franco-argilosa, FIGURAS 3 e 4.

Na sub-área 2, os percentuais da fração argila são bem mais elevados (64 a 52) e, conseqüentemente, os percentuais da classe areia são bem mais baixos 17-15%. O saprólito é bem mais siltoso (46%) do que o existente na sub-área 1 (29%). A variação da classe textural de muito argilosa para argilosa nos horizontes B alóctone e B autóctone representa uma redução de 9% da fração argila e, conseqüentemente, acarreta um aumento da fração silte em 12%. A fração areia permanece quase que invariável.

7.2.2 Densidades aparente e real

A TABELA 7.4 mostra os dados de densidades aparente e real. Observa-se que a densidade aparente na sub-área 1 aumenta com a profundidade, com variação de 1,22 (horizonte A) até 1,65 g.cm⁻³ (saprólito). Na sub-área 2, o solo por ser mais profundo, apresenta uma densidade aparente praticamente invariável e em torno de um valor médio de 1,21 g.cm⁻³. A densidade real para os solos da sub-área 1 é da ordem de 2,65 g.cm⁻³, valor coincidente ao da densidade média, do material de origem (gnaisse). Para a sub-área 2, a densidade real média é da ordem de 2,75 g.cm⁻³, valor típico de rochas básicas.

7.2.3 Porosidade total e macroporosidade

Os cálculos de porosidade total, conforme fórmula apresentada no item 6.7.2.6, estão sintetizados na TABELA 7.3.

A porosidade total para os solos da sub-área 1 é da ordem de 53% e permanece praticamente inalterada nos horizontes superficiais. Ao longo do perfil, a porosidade do

material vai decrescendo até atingir no saprólito (1,60 m de profundidade) valores da ordem de 44%.

Na sub-área 2, os valores de porosidade total situam-se em torno de 57%, para os horizontes A e B. O saprólito, à profundidade de 2,00 m possui uma porosidade ainda alta, (59%).

Ensaio de macroporosidade pelo Método do Funil de Placa Porosa, mostraram que os solos nas áreas dos experimentos possuem valores muito diferentes, embora apresentem valores de porosidade total semelhantes. Por exemplo, para uma mesma profundidade de 0,60 cm, os macroporos na sub-área 1 ocupam 26% do volume total do solo, enquanto na sub-área 2 ocupam apenas 14% - TABELA 7.5. A grande diferença existente nas macroporosidades dos solos analisados advém das diferenças de granulometria, maior ou menor percentagem da fração argila e, principalmente, das diferenças nas estruturas.

Os solos da sub-área 1, de estrutura granular, possuem grande quantidade de macroporos. Os solos da sub-área 2, por apresentarem estrutura em blocos, detêm maior quantidade de microporos em detrimento dos macroporos.

7.2.4 Capacidade de campo e ponto de murcha

Os ensaios de capacidade de campo e ponto de murcha foram realizados pelo Método da Placa de Pressão (extrator de Richards), adotando-se compressões de 0,03 e 1,5 MPa, respectivamente. Os solos da sub-área 2, por possuírem maiores quantidades de argila e microporos, apresentam também maiores capacidades de campo e pontos de murcha - TABELA 7.6.

TABELA 7.3 - Dados de análise granulométrica, classificação textural, densidades aparente e real e porosidade total.

SUB-ÁREA 1								
Intervalo (m)	Areia (%)	SUte (%)	Argila (%)	Classe textural	Horizonte	pb (g.cm ⁻³)	Dr (gxm ⁻³)	n _r (%)
0,20 - 0,30	35	13	52	argila	A/Baiócto.	1,22	2,70	55
0,40 - 0,50	33	18	49	argila	Balóctae	1,23	2,63	53
0,60 - 0,70	32	21	47	argila	C	1,28	2,63	51
1,50 - 1,60	36	29	35	franco-argilosa	saprólito	1,46	2,60	44

SUB-ÁREA 2								
Intervalo (m)	Areia (%)	Sihe (%)	Argila (%)	Classe textural	Horizonte	pb (g.cm ⁻³)	Dr (g.cm ⁻³)	n _r (%)
0,10 - 0,20	17	19	64	muito argilosa	A	1,22	2,70	55
0,30 - 0,40	16	21	63	muito argilosa		1,22	2,78	56
0,90 - 1,00	15	33	52	argila		1,14	2,74	58
2,00-2,10	22	46	32	franco-argilosa	saprólito	1,16	2,80	59

TABELA 7.4 - Densidades aparente (pb) e real (Dr).

Amostra n°	Profundidade (m)	Densidade aparente (pb)		Densidade Real (Dr)	
		Sub - Área 1	Sub - Área 2	Sub - Área 1	Sub - Área 2
		g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
1	0.2	1.22	1.22	2.70	2.70
2	0.4	1.23	1.22		2.78
3	0.6	1.28	1.19	2.63	
4	0.8	1.19	1.19		
5	1.0	1.38	1.14		2.74
6	1.2	1.55	1.30		
7	1.4	1.63	1.22		
8	1.6	1.46	1.30	2.60	
9	1.8	1.48	1.22		
10	2.0	1.50	1.16		2.80
11	2.2	1.56	1.23		
12	2.4	1.65	1.11		

Observações:

Densidade aparente determinada pelo Método do Anel Volumétrico;

Densidade real determinada pelo Método do Balão Volumétrico (EMBRAPA)

TABELA 7.5 - Dados experimentais para o cálculo da macroporosidade.

SUBÁREA 1							
Profundidade (m)	Classe	Horizonte	pb (g.cm ⁻³)	Peso seco (g)	Volume total (ml)	Volume de poros (ml)	Macroporosidade (%)
0,40	argila		1,23	301,75	245,33	46,1	18,8
0,60	argila	C	1,28	234,52	183,22	47,6	26,0

SUBÁREA 2							
Profundidade (m)	Classe	Horizonte	pb (g.cm ⁻³)	Peso seco (g)	Volume total (ml)	Volume de poros (ml)	Macroporosidade (%)
0,30	muito argilosa		1,22	397,41	325,75	39,4	12,1
0,60	muito argilosa		1,19	445,42	374,30	53,7	14,3
1,40	argila	E U * * .	1,22	378,86	310,54	58,9	19,0

TABELA 7.6 - Dados de capacidade de campo e ponto de murcha.

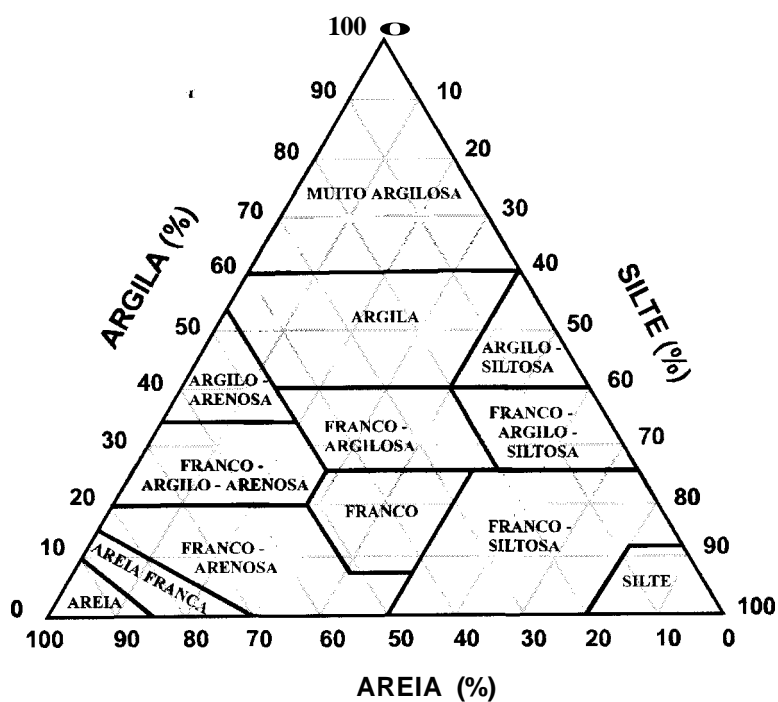
SUB - ÁREA 1		
Intervalo (m)	Capacidade de Campo (% peso)	Ponto de Murcha (%/opeso)
0,00 - 0,45	30.06	18.78
0,45 - 1,00	28.25	18.97

SUB - ÁREA 2		
Intervalo (m)	Capacidade de Campo (% peso)	Ponto de Murcha (%/opeso)
0,00 - 0,20	35.23	22.72
0,20 - 0,70	38.65	22.55

Observações:

Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha (PM) determinados, respectivamente, às pressões de 0,3 e 15 bar;

Determinações realizadas pelo Laboratório de Solos da UFV pelo Método da Placa de Pressão (extrator de Richards).



CLASSES	GRANULOMETRIA
GROSSA	20 - 020 mm
AREIA	
FINA	020 - 005 mm
SILTE	005 - 0002 mm
ARGILA	< 0002 mm

FIGURA 7.3 - Classes texturais de acordo com EMBRAPA (1979).

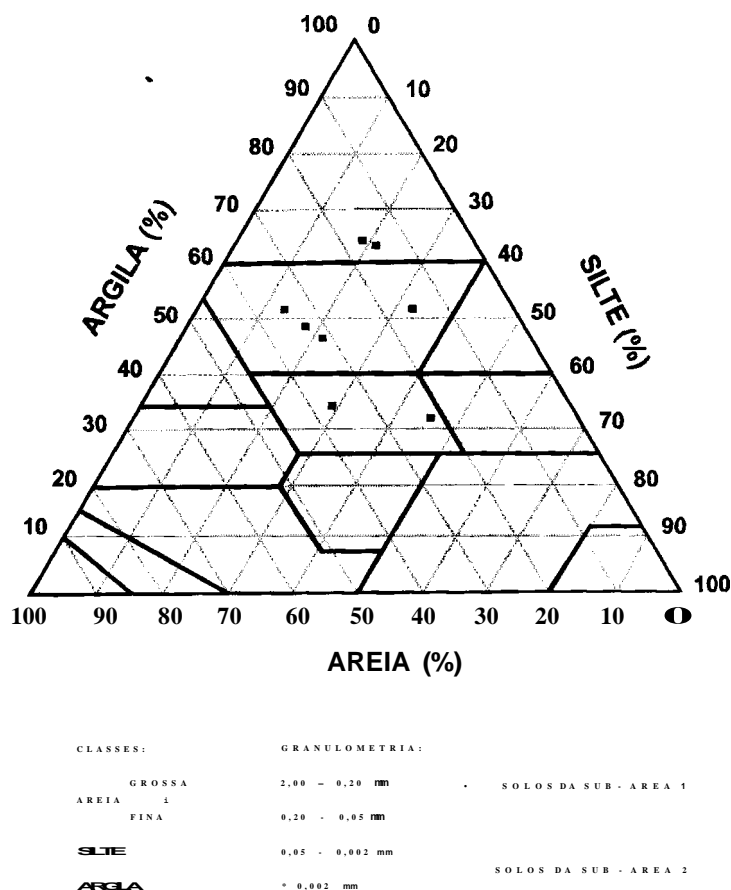


FIGURA 7.4 - Classificação textural dos solos das sub-áreas 1 e 2.

7.2.5 Umidades gravimétrica e volumétrica

Nas TABELAS 7.7 e 7.8 estão relacionados os dados de umidades gravimétrica e volumétrica dos solos das sub-áreas 1 e 2, cujos valores foram calculados com base nas amostragens realizadas em abril/96, agosto/96 e dezembro/96. Os perfis de umidade volumétrica encontram-se representados pelas FIGURAS 7.5 e 7.6, respectivamente para as sub-áreas 1 e 2. Estes perfis mudam de forma devido às entradas de água por ocasião de precipitações e saídas por evapotranspiração, ascensão capilar e por influência da redistribuição no perfil.

A análise destes perfis nos permite identificar a presença de 4 zonas de distribuição de umidades:

zona 1 (0,00 - 0,45 m)

corresponde a uma zona de distribuição normal, em que as umidades apresentadas pelos solos estão em conformidade com o aporte de água de chuva. Em ambas as áreas, esta zona coincide com o horizonte A e transição para o horizonte B;

zona 2 (0,45 - 0,75 m para a sub-área 1 e 0,45 - 0,85 m para a sub-área 2)

caracterizada por uma queda brusca da umidade volumétrica, à qual está associada, na sub-área 1, à passagem transicional do horizonte B para o horizonte C e também ao nível de "stone line"; na sub-área 2, ao horizonte B alóctone e, principalmente, ao importante nível de "stone line" presente na base desta zona;

zona 3 (0,75 - 1,35 m para a sub-área 1 e 0,85 - 1,35 m para a sub-área 2)

para ambas as áreas, esta zona é caracterizada por um acréscimo da umidade volumétrica. Entretanto, este acréscimo é bem mais significativo para a sub-área 2 do que para a sub-área 1. Na sub-área 2, esta zona está relacionada ao horizonte B autóctone, enquanto na sub-área 1, ao horizonte saprolítico;

zona 4 (> 1,35 m)

zona com redistribuição normal da umidade para ambas as sub-áreas. Esta zona está relacionada, na sub-área 1, ao horizonte saprolítico e, na sub-área 2, à transição do horizonte B autóctone para o horizonte Ç.

No que se refere à zona 1, os cálculos de armazenagem de água efetuados pelo método do trapézio (LIBARDI, 1995) mostram, para as amostragens realizadas em abril e agosto, uma variação negativa de 6,01 mm, para os horizontes A e AB da sub-área 2, confirmando a perda de umidade. Esta pequena variação decorre da baixa permeabilidade e da elevada microporosidade apresentadas pelos horizontes argilosos. Considerando as mesmas condições para a sub-área 1, a variação negativa de armazenagem foi da ordem de 25,46 mm, ou seja 4 vezes a mais do que a registrada para a sub-área 2.

TABELA 7.7 - Umidades gravimétrica (U) e volumétrica (0) do perfil da sub-área 1.

Profundidade	Pb	1 - Amostragem		2 - Amostragem		3 ^a Amostragem	
		abr/96		ago/96		dez/96	
m	g/cm ³	U	e	U	e	U	0
		%	%	%	%	%	%
0,00-0,10	1.22	22.96	28.01	14.22	17.35	30.73	37.49
0,10-0,20	1.22	24.02	29.30	20.22	24.67	30.71	37.47
0,20 - 0,30	1.23	23.88	29.37	20.57	25.30	30.52	37.54
0,30 - 0,40	1.23	22.69	27.91	20.00	24.60	28.77	35.39
0,40 - 0,50	1.28	23.54	30.13	21.36	27.34	27.59	35.32
0,50 - 0,60	1.28	23.54	30.13	21.69	27.76	26.64	34.10
0,60 - 0,70	1.19	23.84	28.37	21.31	25.36	26.85	31.95
0,70 - 0,80	1.19	24.51	29.17	19.02	22.63	25.83	30.74
0,80 - 0,90	1.38	24.90	34.36	17.32	23.90	26.78	36.96
0,90 - 1,00	1.38	22.11	30.51	16.56	22.85	26.84	37.04
1,00-1,10	1.55	20.94	32.46	16.61	25.75	26.34	40.83
1,10-1,20	1.55	20.05	31.08	16.81	26.06	24.59	38.11
1,20 - 1,30	1.63	18.92	30.84	18.40	29.99	23.13	37.70
1,30-1,40	1.63	17.92	29.21	18.04	29.41	24.00	39.12
1,40- 1,50	1.46	17.75	25.92	19.17	27.99	24.82	36.24
1,50 - 1,60	1.46	17.63	25.74	21.08	30.78	25.58	37.35
1,60 - 1,70	1.48	17.34	25.66	21.53	31.86	25.98	38.45
1,70 - 1,80	1.48	17.39	25.74	18.92	28.00	25.30	37.44
1,80 - 1,90	1.50	17.16	25.74	19.29	28.94	25.38	38.07
1,90 - 2,00	1.50	17.29	25.94	20.22	30.33	26.09	39.14
2,00-2,10	1.56	17.16	26.77	20.50	31.98	26.21	40.89
2,10-2,20	1.56	17.18	26.80	20.97	32.71	22.85	35.65
2,20 - 2,30	1.65	17.08	28.18	20.73	34.20	21.48	35.44
2,30 - 2,40	1.65	17.45	28.79	20.61	34.01	19.82	32.70

Observação:**pb** = densidade aparente

TABELA 7. 8 - Umidades gravimétrica (U) e volumétrica (0) do perfil da sub-área 2.

Profundidade m	pb g/cm ³	1ª Amostragem abr/96		2ª Amostragem ago/96		3ª Amostragem dez/96	
		u %	e %	u %	e %	u %	e %
0,00-0,10	1,22	26,62	32,48	26,45	32,27	28,67	34,98
0,10-0,20	1,22	26,37	32,17	26,19	31,95	30,44	37,14
0,20 - 0,30	1,22	27,95	34,10	25,94	31,65	30,83	37,61
0,30 - 0,40	1,22	27,63	33,71	25,22	30,77	30,73	37,49
0,40 - 0,50	1,19	27,61	32,86	27,45	32,67	30,60	36,41
0,50 - 0,60	1,19	28,23	33,59	27,17	32,33	30,32	36,08
0,60 - 0,70	1,19	29,07	34,59	24,11	28,69	26,56	31,61
0,70 - 0,80	1,19	28,28	33,65	24,02	28,58	27,27	32,45
0,80 - 0,90	1,14	27,10	30,89	23,44	26,72	26,10	29,75
0,90 - 1,00	1,14	28,20'	32,15	23,81	27,14	26,98	30,76
1,00 - 1,10	1,30	27,50	35,75	25,67	33,37	28,14	36,58
1,10 - 1,20	1,30	26,37	34,28	23,86	31,02	27,73	36,05
1,20 - 1,30	1,22	26,86	32,77	22,50	27,45	27,84	33,96
1,30 - 1,40	1,22	27,64	33,72	26,06	31,79	28,41	34,66
1,40 - 1,50	1,30	21,93	28,51	26,13	33,97	28,80	37,44
1,50-1,60	1,30	20,73	26,95	25,98	33,77	28,06	36,48
1,60 - 1,70	1,22	23,16	28,26	24,12	29,43	27,71	33,81
1,70 - 1,80	1,22	21,38	26,08	24,61	30,02	27,46	33,50
1,80 - 1,90	1,16	22,63	26,25	25,51	29,59	28,04	32,53
1,90 - 2,00	1,16	22,18	25,73	24,63	28,57	28,18	32,69
2,00-2,10	1,23	21,23	26,11	25,75	31,67	28,30	34,81
2,10-2,20	1,23	20,50	25,22	25,57	31,45	26,65	32,78
2,20 - 2,30	1,11	22,26	24,71	23,27	25,83	27,19	30,18
2,30 - 2,40	1,11	19,29	21,41	20,75	23,03	27,42	30,44

Observações:

pb = densidade aparente

Linha de pedra à profundidade de 0,80 - 0,90m

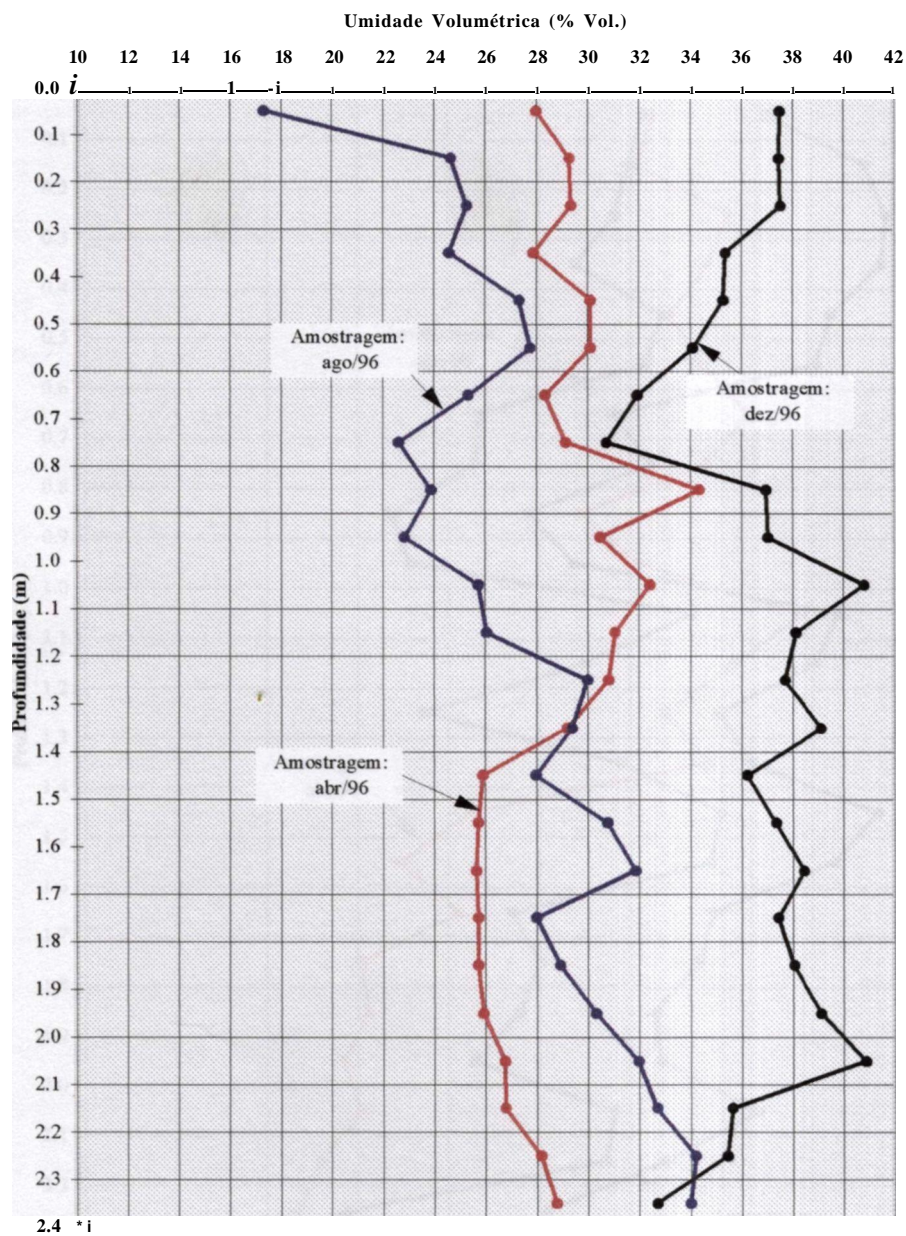


FIGURA 7.5 - Perfis de umidade volumétrica para a sub-área 1.

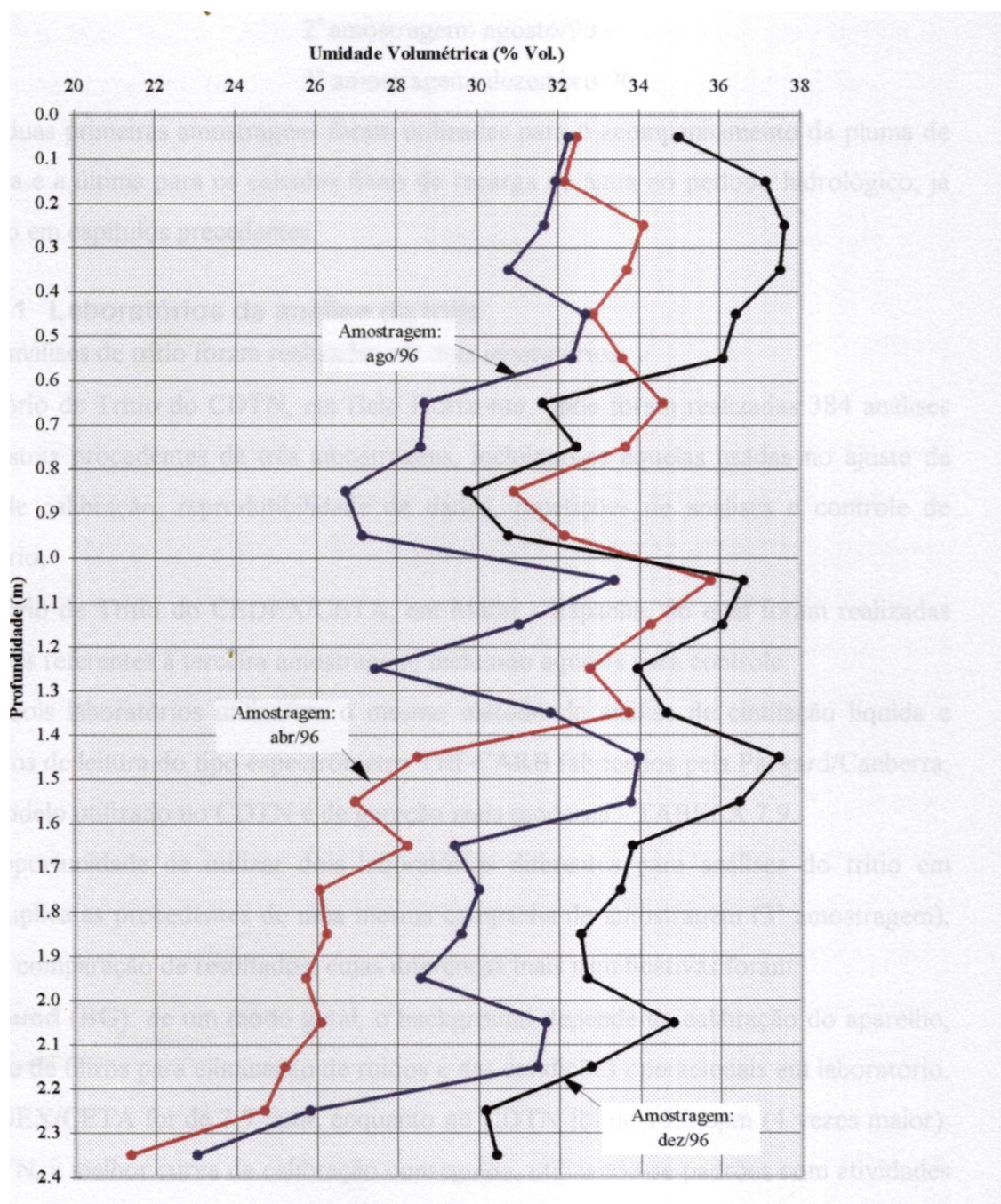


FIGURA 7.6 - Perfis de umidade volumétrica para a sub-área 2.

7.3 Movimentação do traçador radioativo na zona não-saturada

O movimento do traçador radioativo na zona não-saturada dos solos foi monitorado por intermédio de três campanhas de sondagens, com coletas sistemáticas de amostras de solo para as determinações das concentrações de trítio:

1ª amostragem: abril/96;

2ª amostragem: agosto/96 e

3ª amostragem: dezembro/96.

As duas primeiras amostragens foram utilizadas para o acompanhamento da pluma de água tritiada e a última para os cálculos finais de recarga de água no período hidrológico, já especificado em capítulos precedentes.

7.3.1 Laboratórios de análise de trítio

As análises de trítio foram realizadas em dois laboratórios:

- Laboratório de Trítio do CDTN, em Belo Horizonte, onde foram realizadas 384 análises em amostras procedentes de três amostragens, incluindo-se aquelas usadas no ajuste de curvas de calibração, reprodutibilidade de dados, repetições de análises e controle de laboratório;
- Laboratório de Trítio do CEDEX/CETA, em Madri - Espanha, no qual foram realizadas 84 análises referentes à terceira amostragem, incluindo aquelas para controle.

Os dois laboratórios utilizaram o mesmo método de análise de cintilação líquida e equipamentos de leitura do tipo espectrômetro TRI-CARB fabricados pela Packard/Canberra, porém o modelo utilizado no CDTN é de geração mais moderna - TABELA 7.9.

A oportunidade de utilizar dois laboratórios diferentes para análises do trítio em amostras duplicatas procedentes de uma mesma campanha de amostragem (3ª amostragem), propiciou a comparação de resultados, cujas diferenças mais significativas foram:

- **background (BG):** de um modo geral, o background depende da calibração do aparelho, utilização de filtros para eliminação de ruídos e das condições operacionais em laboratório. No CEDEX/CETA foi de 3,7 cpm, enquanto no CDTN foi de 15,3 cpm (4 vezes maior). No CDTN, a melhor curva de calibração conseguida, utilizando-se padrões com atividades conhecidas foi $Y = 1,0632.X + 15,252$ para $R^2=0,9992$, onde X representa a atividade do padrão e Y representa a contagem correspondente. A contagem correspondente a uma atividade zero foi de 15,252 cpm, o que representa o background;
- **limite de detecção (LD):** o limite de detecção depende do BG, volume da amostra, tempo de contagem e da eficiência de detecção. No CDTN, o limite foi de 1,5 pCi.mL⁻¹ para as amostras das 1ª e 2ª amostragens e de 0,7 pCi.mL⁻¹ para 3ª amostragem, enquanto no CEDEX/CETA este limite foi de 0,14 pCi.mL⁻¹;

intervalo de confiança: o intervalo de confiança no cálculo do erro associado foi de 95% no CDTN e de 68,3% no CEDEX/CETA. Na Espanha trabalha-se com um intervalo de confiança menor, porém com limite de confiança de 99,7% na determinação do LD;

tempo de contagem: o tempo de contagem para cada amostra no CEDEX/CETA foi 5 vezes superior ao do CDTN;

eficiência de detecção: a eficiência de detecção no CDTN foi de 45% contra uma eficiência >24% no CEDEX/CETA e

reprodutibilidade de resultados analíticos: a reprodutibilidade de resultados através do controle de amostras duplicatas mostra que as análises realizadas no CEDEX/CETA apresentaram discrepâncias médias da ordem de 2%. No CDTN, as diferenças foram muito variáveis, havendo casos extremos ocasionados pelo uso de frascos contaminados no próprio Laboratório de Análise. Testes realizados com amostras duplicatas e triplicatas mostraram que para concentrações menores que 5 pCi.mL⁻¹ as diferenças nos resultados foram da ordem de 183%; para concentrações de 10 pCi.mL⁻¹ a diferença passou a 17% e para concentrações de algumas dezenas de pCi.mL⁻¹ a reprodutibilidade foi considerada de boa a ótima (< 5%).

Quanto aos resultados analíticos, a TABELA 7.10 e FIGURAS 7.7 e 7.8 mostram que, para uma mesma sub-área, existem diferenças no comportamento dos perfis de trítio. Embora os picos máximos sejam praticamente coincidentes em termos de profundidade, suas intensidades e os formatos das curvas são diferentes. Outra diferença básica importante pode ser observada a partir das análises com os respectivos erros associados. As análises efetuadas pelo CEDEX/CETA obedecem um comportamento mais homogêneo e correspondem à expectativa de uma distribuição gaussiana (normal).

Considerando então as diferenças apontadas, tanto nos procedimentos analíticos, como nos resultados apresentados pelos dois laboratórios, o cálculo da recarga final foi efetuado considerando tão somente os resultados de análises do CEDEX/CETA. *

TABELA 7.9 - Características principais dos laboratórios de análise de trítio.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	CEDEX/CETA - MADRI*	CDTN/CNEN - B. HTE**.
Método de análise	cintilação líquida	cintilação líquida
Equipamento utilizado	Espectrómetro TRI-CARB	Espectrómetro TRI-CARB
Modelo	2000 CA/LL	2550 TR/LL
Fabricante	Packard-Canberra	Packard-Canberra
Cintilador	Instagel	Pico Fluor-40
Volume total da amostra (niL)	22	20
Volume do cintilador (mL)	12	17
Volume de água tritiada (mL)	5	3
Volume de água destilada (mL)	5	
Background (cpm)	3,7	15,3
Limite de detecção (pCi.mL')	0,14 (3ª campanha)	1,5 (1ª e 2ª campanhas) 0,7 (3ª campanha)
Tempo de contagem (minutos)	100	30
Intervalo de confiança	68,3	95
Eficiência de medida (%)	24	

Observações:

•Dados fornecidos por BEDMAR A. P.

**Dados extraídos da Rotina Técnica RT (AT4) CDTN - 0092, 1992.

TABELA 7.10 - Resultados de análises de trítio obtidos nos Laboratórios do CDTN e CEDEX/CETA.

Amostra n ^o	Profundidade m	SUB-AREA 1				SUB-AREA 2			
		CDTN		CEDEX/CETA		CDTN		CEDEX/CETA	
		Valor	Erro +/-	Valor	Erro +/-	Valor	Erro +/-	Valor	Erro +/-
1	0,00-0,10	3.3	0.7	0.61	0.11	7.4	0.8	7.38	0.23
2	0,10 - 0,20	5.1	1.1	0.21	0.08	12.9	1.8	5.18	0.19
3	0,20 - 0,30	2.3	0.4	1.42	0.12	16.1	2.2	6.47	0.20
4	0,30 - 0,40	5.2	1.1	0.22	0.08	15.8	2.2	9.16	0.27
5	0,40 - 0,50	2.9	0.6	0.94	0.10	11.3	1.5	9.23	0.29
6	0,50 - 0,60	5.7	1.2	0.71	0.08	14.5	2.1	7.75	0.25
7	0,60 - 0,70	4.2	0.9	1.11	0.10	4.4	0.2	6.05	0.22
8	0,70 - 0,80	0.5	0.8	1.38	0.10	2.1	0.3	3.27	0.15
9	0,80 - 0,90	1.0	0.6	2.06	0.12	2.4	0.2	1.87	0.12
10	0,90 - 1,00	2.3	0.3	2.65	0.13	0.8	0.7	0.86	0.09
11	1,00-1,10	4.9	1.1	3.48	0.18	0.3	0.2	0.52	0.08
12	1,10-1,20	3.3	0.1	3.16	0.17	0.3	0.2	0.36	0.07
13	1,20 - 1,30	4.8	0.5	5.52	0.19	0.3	0.2	0.23	0.07
14	1,30-1,40	4.9	1.1	5.95	0.21	1.0	0.1	0.15	0.06
15	1,40-1,50	4.5	0.9	6.43	0.21	0.0	0.0	0.12	0.06
16	1,50- 1,60	9.6	2.0	7.18	0.23	0.5	0.1	0.03	0.06
17	1,60 - 1,70	3.1	0.6	6.96	0.22	1.3	0.5	0.01	0.06
18	1,70-1,80	1.5	0.2	5.96	0.20	1.0	0.6	0.00	0.06
19	1,80 - 1,90	2.5	0.5	3.72	0.15	1.7	0.4	0.00	0.06
20	1,90 - 2,00	2.8	0.6	3.68	0.15	1.5	0.4	0.00	0.06
21	2,00-2,10	1.7	0.2	2.74	0.14	0.0	0.8	0.00	0.06
22	2,10-2,20	1.3	0.1	3.23	0.14	1.0	0.6	0.00	0.06
23	2,20 - 2,30	0.9	0.1	3.36	0.15	0.4	1.0	0.00	0.06
24	2,30 - 2,40	2.1	0.4	2.93	0.14	0.2	0.3	0.00	0.06
25	2,40 - 2,50	0.7	0.1	2.04	0.12	0.2	0.3	0.00	0.06
26	2,50 - 2,60	0.3	0.2	1.45	0.10	0.3	0.2	0.00	0.06
27	2,60 - 2,70	0.8	0.7	1.05	0.09	0.5	0.2	0.00	0.06
28	2,70 - 2,80	1.0	0.1	0.37	0.08	0.3	0.2	0.00	0.06
29	2,80 - 2,90	0.5	0.1	0.22	0.07	0.3	0.2	0.00	0.06
30	2,90 - 3,00	0.7	0.1	0.31	0.07	0.3	0.2	0.00	0.06

Observações:

Laboratório CDTN (Belo Horizonte)

Laboratório CEDEX/CETA (Madri - Espanha)

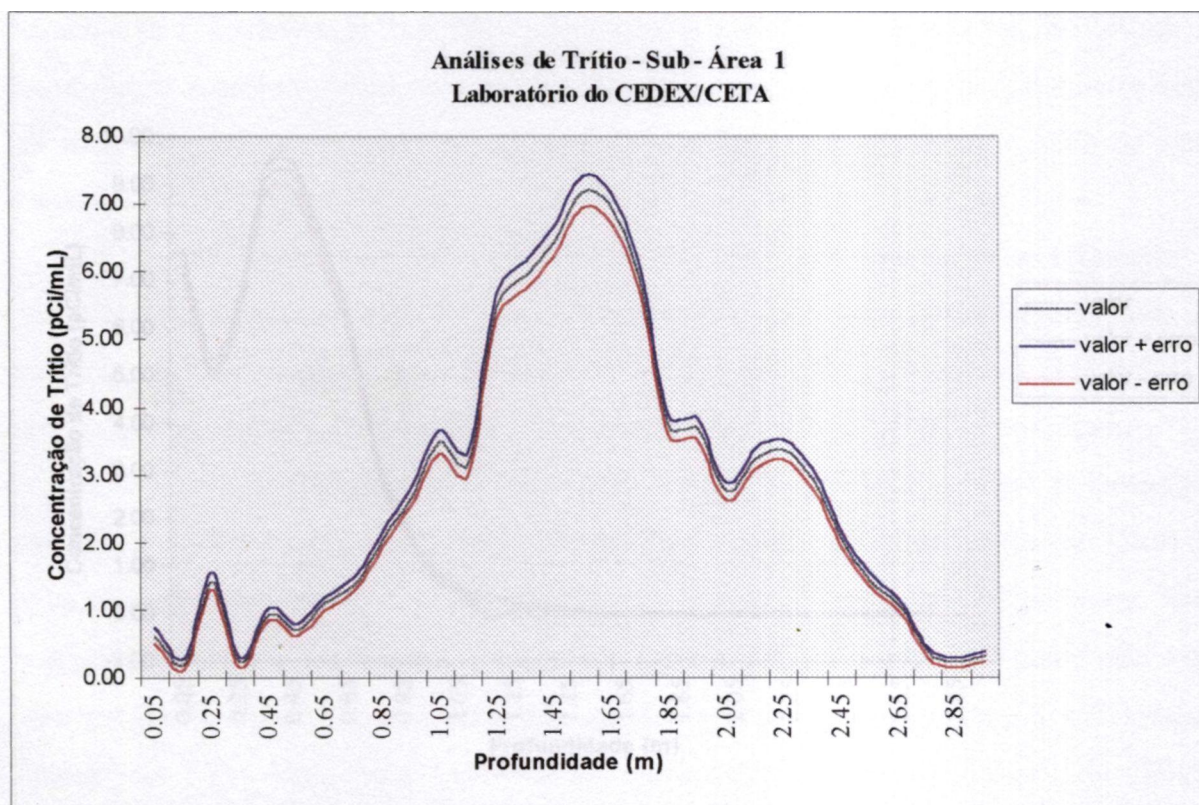
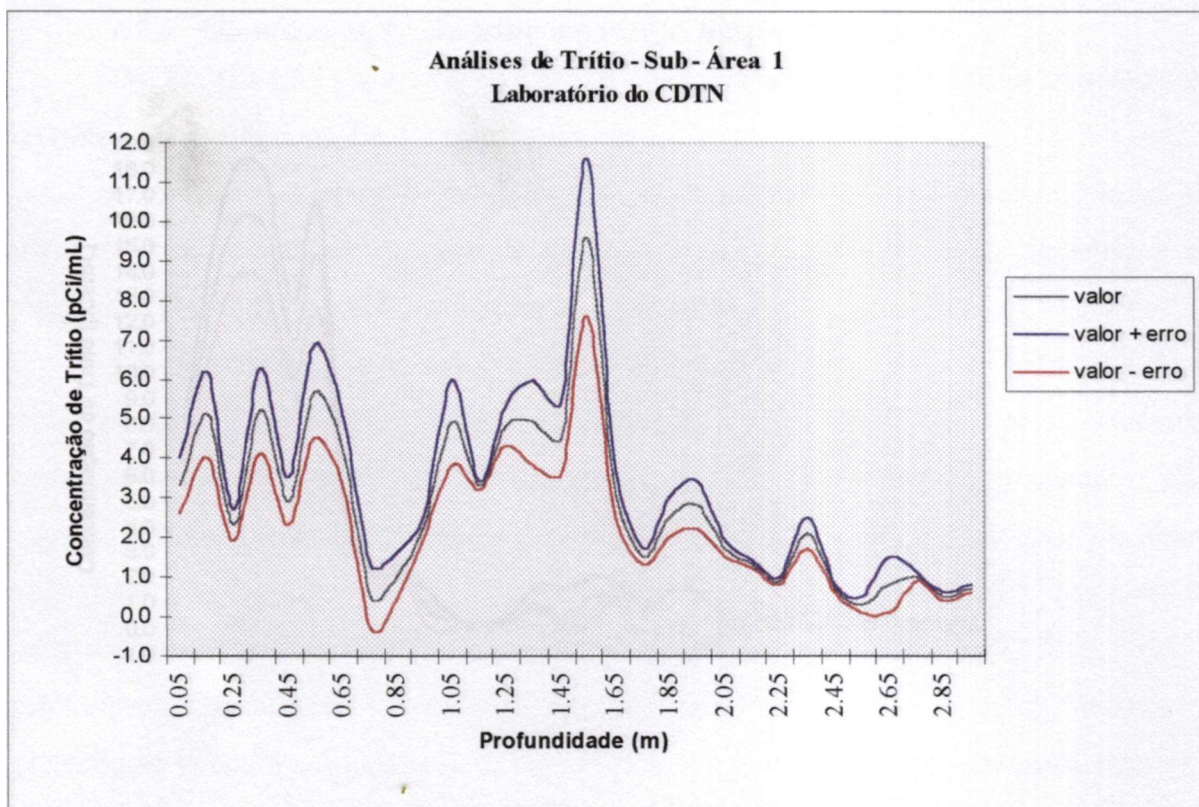
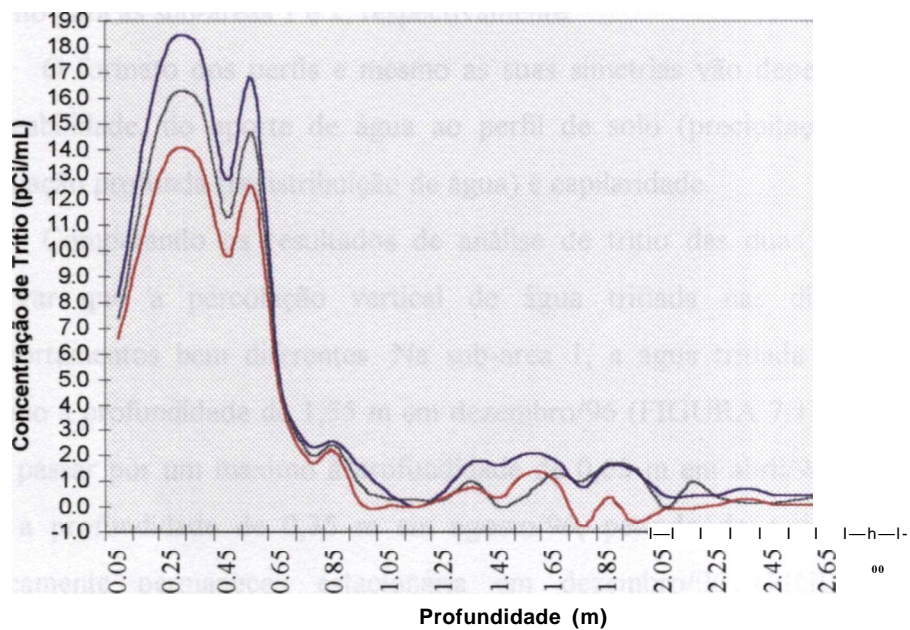


FIGURA 7.7 - Concentração de trítio ao longo do perfil do solo da sub-área 1 para comparação de resultados analíticos.

Análises de Trítio - Sub-Área 2
Laboratório do CDTN



Análises de Trítio - Sub-Área 2
Laboratório do CEDEX/CETA

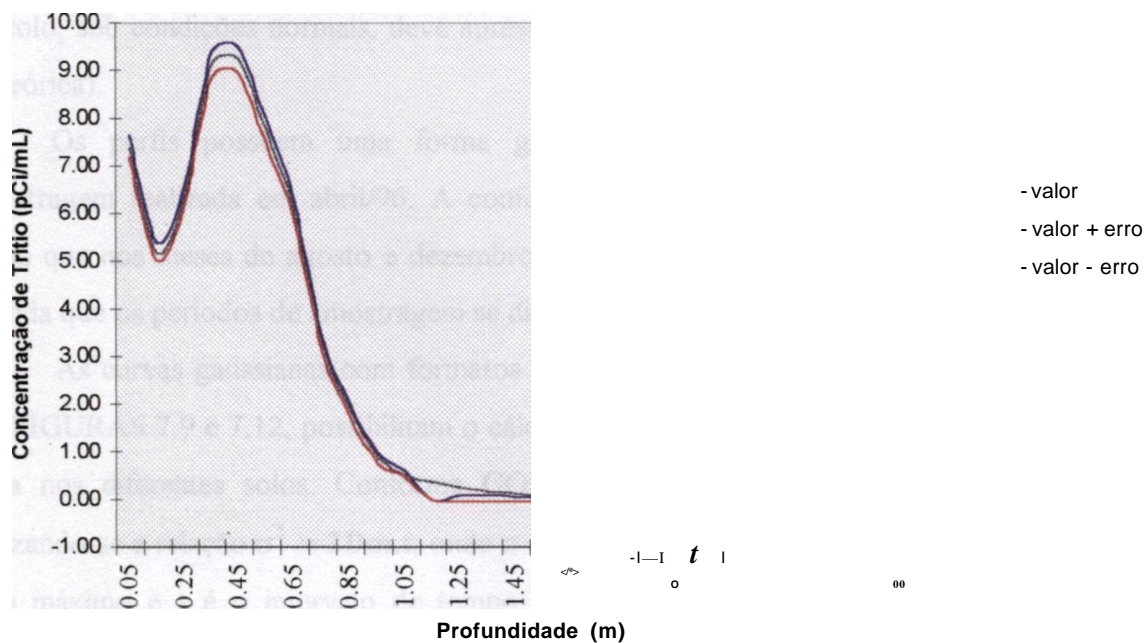


FIGURA 7.8 - Concentração de trítio ao longo do perfil do solo da sub-área 2 para comparação de resultados analíticos.

7.3.2 Concentração de trítio ao longo do perfil do solo

Nas FIGURAS 7.9 a 7.11 e 7.12 a 7.14 estão representados os perfis de concentração de trítio para as sub-áreas 1 e 2, respectivamente.

O formato dos perfis e mesmo as suas simetrias vão depender do meio poroso, da permeabilidade, do aporte de água ao perfil de solo (precipitação) e dos fenômenos de percolação profunda (redistribuição de água) e capilaridade.

Comparando os resultados de análise de trítio das duas áreas de estudo pode-se observar que a percolação vertical de água tritiada nas diferentes áreas apresenta comportamentos bem diferentes. Na sub-área 1, a água tritiada conseguiu atingir o pico máximo à profundidade de 1,55 m em dezembro/96 (FIGURA 7.11); na sub-área 2, a pluma após passar por um máximo à profundidade de 0,65 m em abril/96 (FIGURA 7.12), refluíu para a profundidade de 0,35 m em agosto/96, período de estiagem (FIGURA 7.13), e praticamente permaneceu estacionária em dezembro/96 (FIGURA 7.14), quando a precipitação voltou a normalizar-se. É interessante observar a partir dos resultados referentes à 3ª amostragem, que uma pequena quantidade de trítio chegou até a profundidade de 3,00 m na sub-área 1. Na sub-área 2, o trítio ficou limitado à profundidade máxima de 1,60 m. A partir daí, as análises revelam que o conteúdo de trítio está próximo do background (a água do solo, sob condições normais, deve apresentar o mesmo conteúdo de trítio que uma água meteórica).

Os perfis possuem uma forma gaussiana, principalmente aqueles referentes à amostragem realizada em abril/96. A conformação é mais aguda (forma leptocúrtica), ao passo que nos meses de agosto e dezembro as formas exibem uma tendência platicúrtica, à medida que os períodos de amostragem se distanciam da época de aplicação do traçador.

As curvas gaussianas com formatos leptocúrticos bem definidos, como as mostradas nas FIGURAS 7.9 e 7.12, possibilitam o cálculo do coeficiente de difusão molecular (**Dm**) de água nos diferentes solos. Conforme GOEL et al. (1977), este cálculo pode ser feito utilizando-se a relação $c^2 = 2Dm.t$, onde a representa a largura da curva no ponto médio do pico máximo e t é o intervalo de tempo entre a aplicação do traçador e a amostragem considerada. Com base nesta conceituação, verificou-se que os coeficientes de difusão molecular diferem de uma área para a outra, sendo $2,67 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a sub-área 1 e $1,68 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a sub-área 2. Os coeficientes aqui encontrados estão bem próximos dos valores publicados na literatura para solos silto-argilosos e argilosos, respectivamente (SMITH et al., 1970).

Concentração de Tritio (pCLmLf')

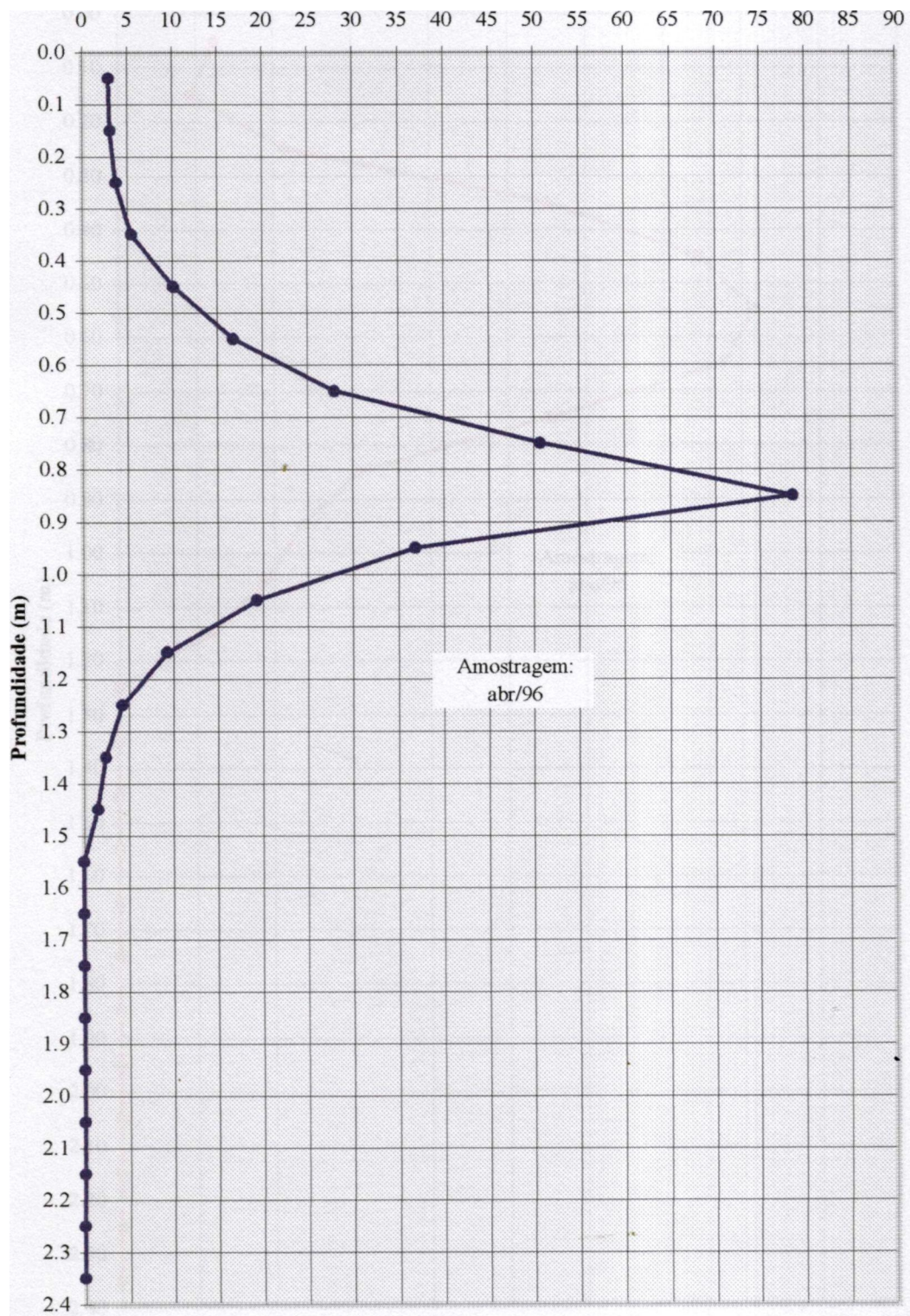


FIGURA 7.9 - Perfil de trítio no solo da sub-área 1. Amostragem de abril/96.

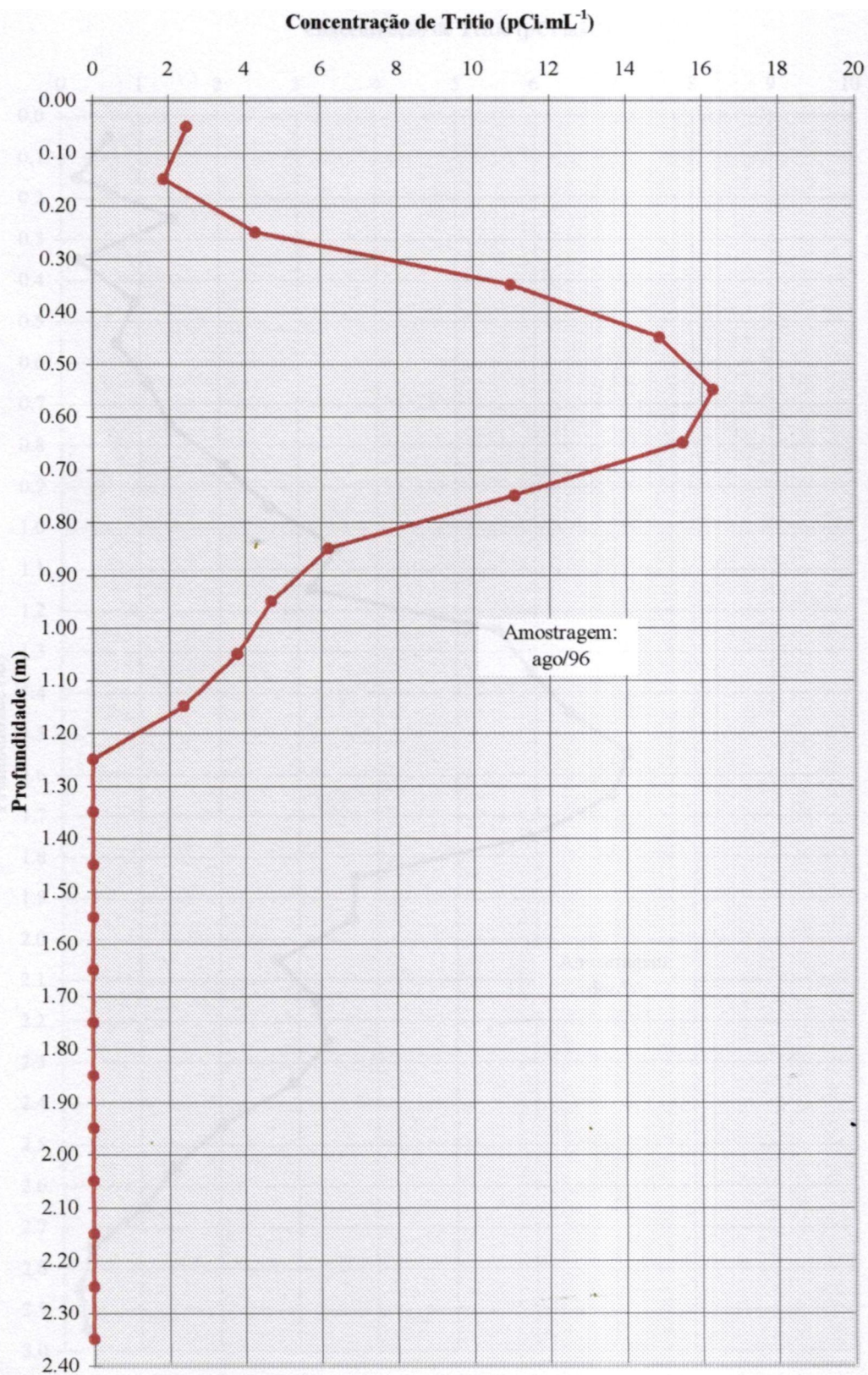


FIGURA 7.10 - Perfil de trítio no solo da sub-área 1. Amostragem de agosto/96.

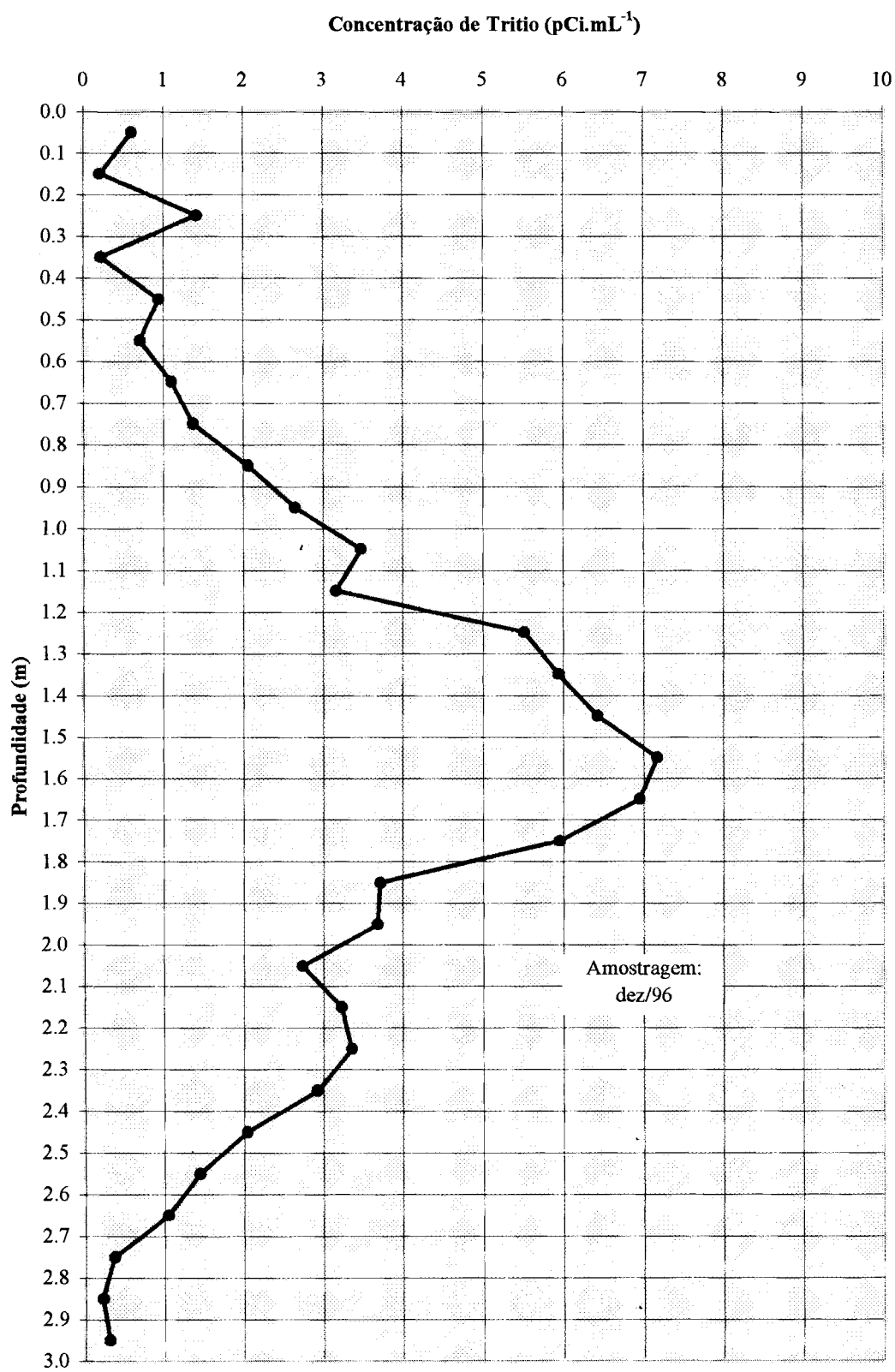


FIGURA 7.11 - Perfil de trítio no solo da sub-área 1. Amostragem de dezembro/96.

Concentração de Tritio (pCi.mL⁻¹)

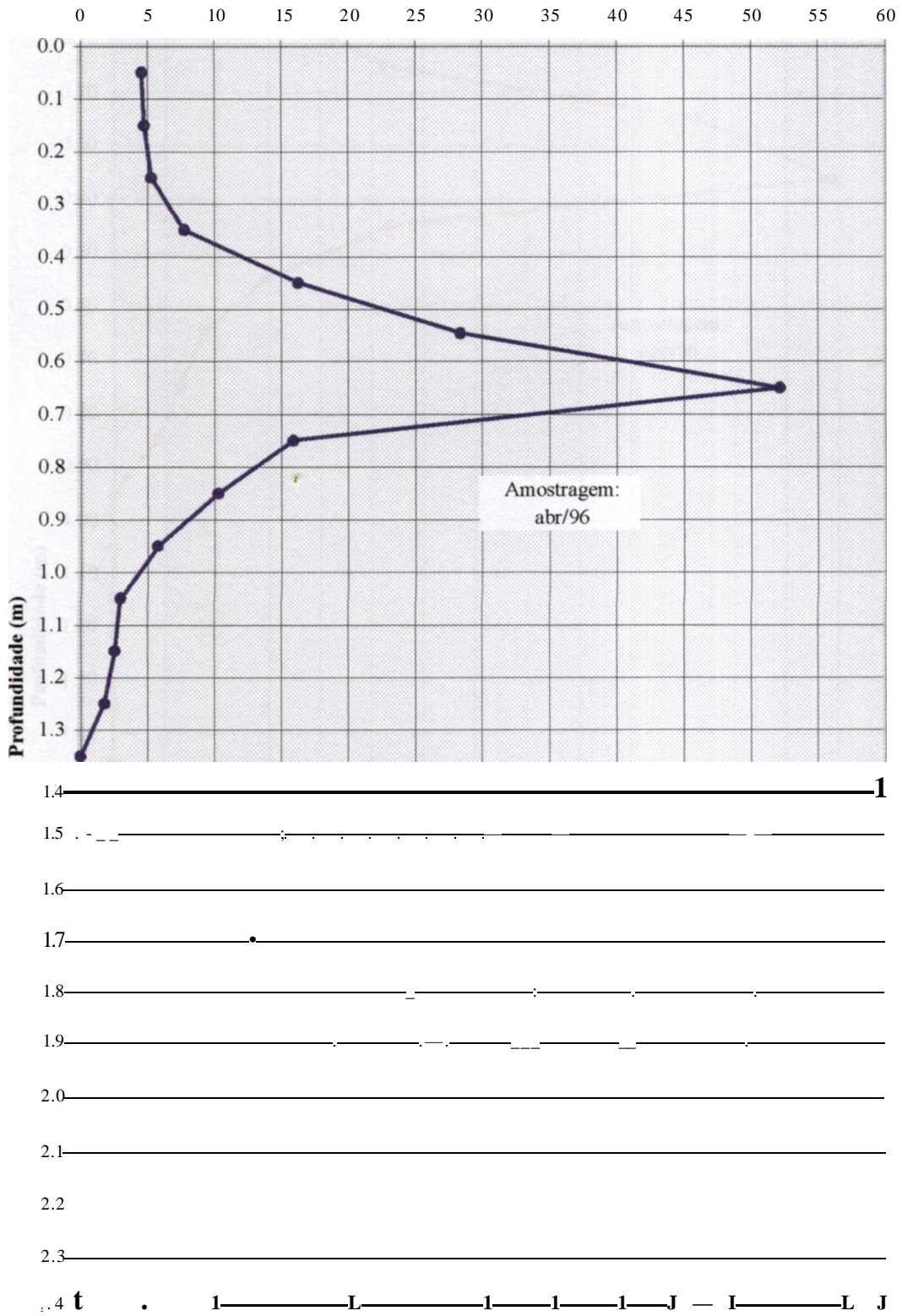


FIGURA 7.12 - Perfil de tritio no solo da sub-área 2. Amostragem de abril/96.

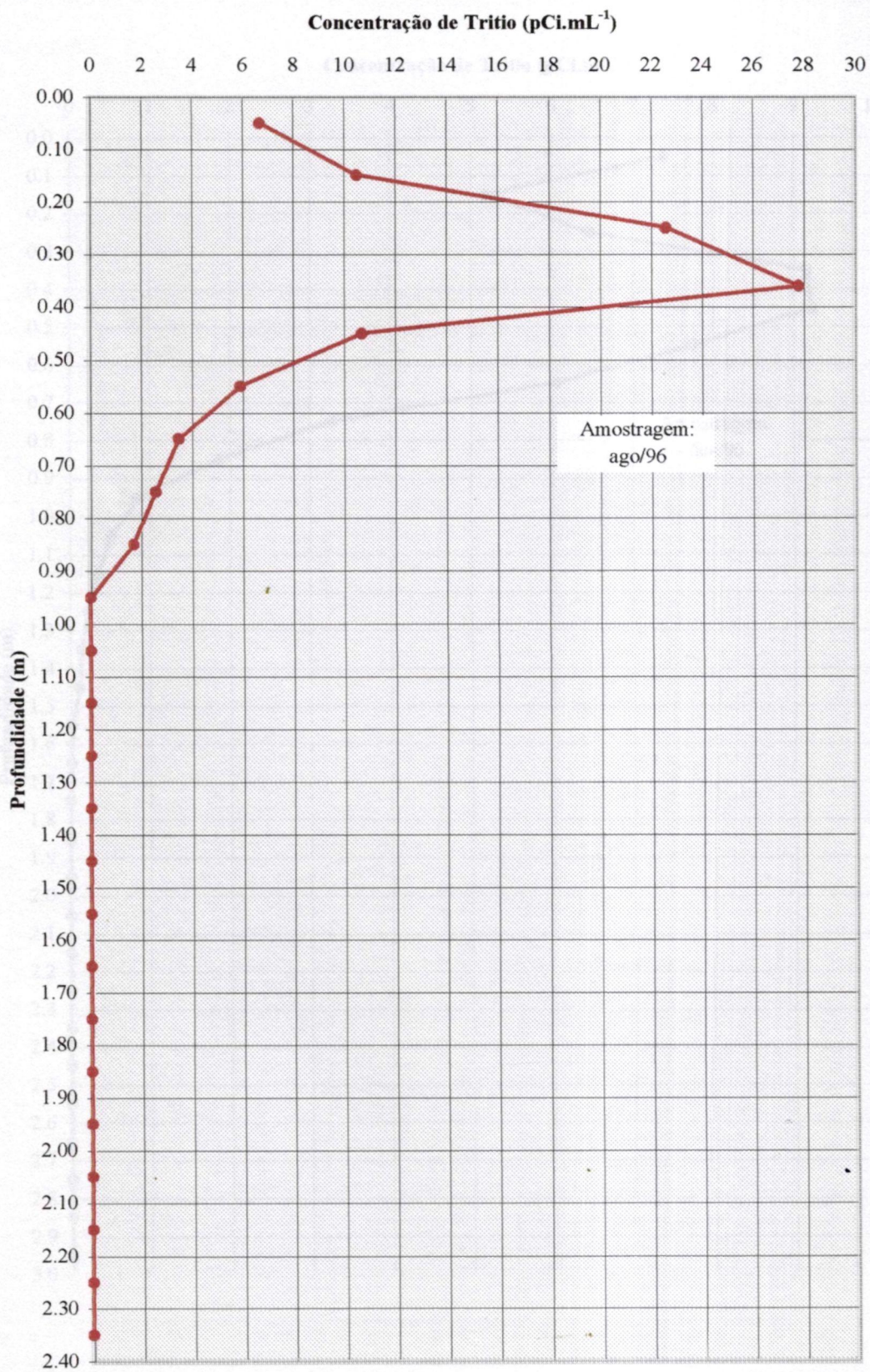


FIGURA 7.13 - Perfil de trítio no solo da sub-área 2. Amostragem de agosto/96.

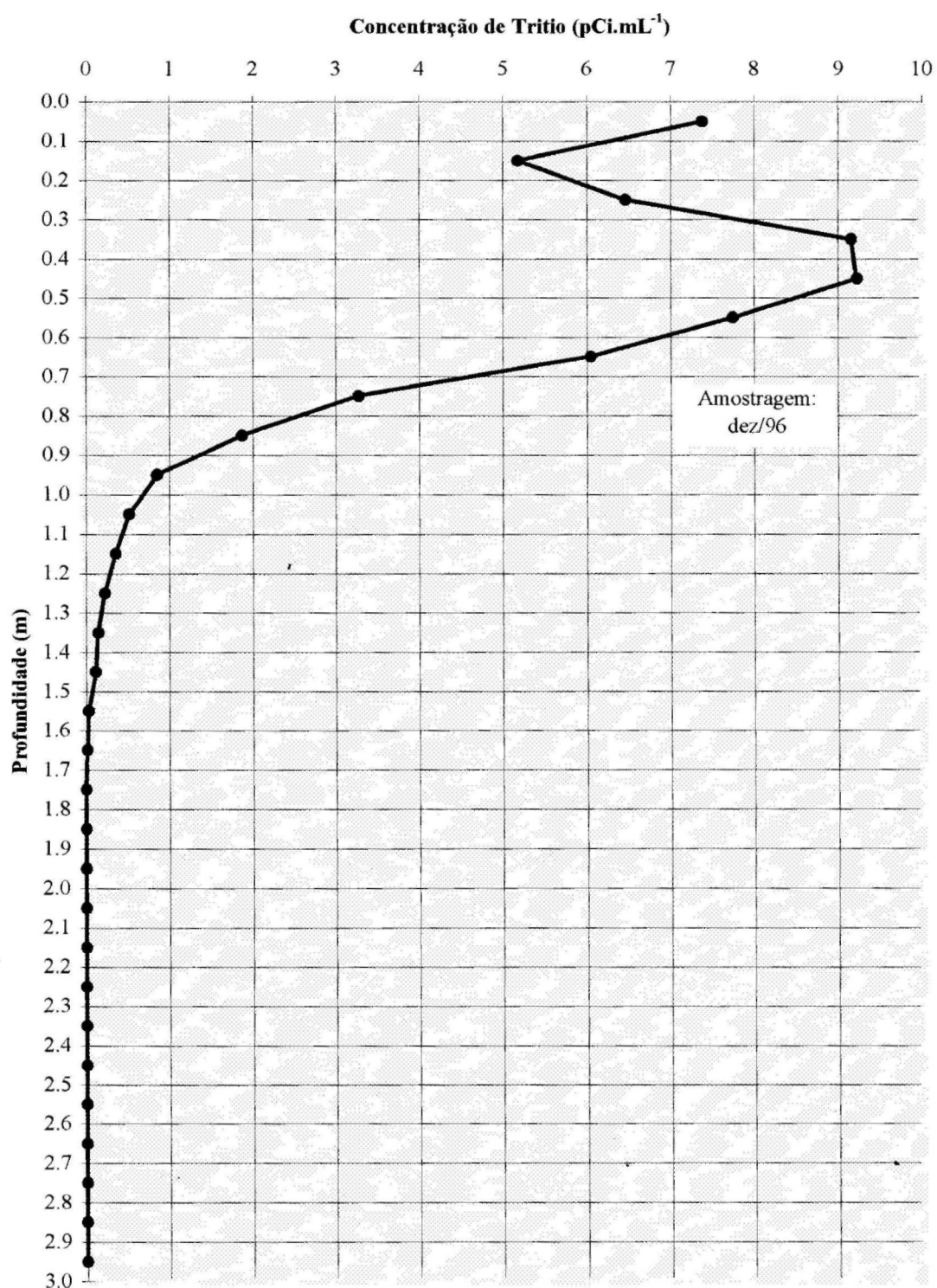


FIGURA 7.14 - Perfil de trítio no solo da sub-área 2. Amostragem de dezembro/96.

Nas TABELAS 7.11 e 7.12 estão sintetizados os resultados de análise de trítio e os dados de umidade volumétrica para as 3 campanhas de amostragem, para as sub-áreas 1 e 2, respectivamente.

TABELA 7.11 - Umidade volumétrica e concentração de trítio no perfil da sub-área 1.

Profundidade m	1ª Amostragem*		2ª Amostragem*		3ª Amostragem**	
	Abr/96		Ago/96		Dez/96	
	e %	Trítio pCi.mL ^{'''}	e %	Trítio pCi.mL ^{'''}	e %	Trítio pCi.mL ^{'''}
0,00-0,10	28.01	3.0	17.35	2.5	37.49	0.61
0,10-0,20	29.30	3.2	24.67	1.9	37.47	0.21
0,20 - 0,30	29.37	3.8	25.30	4.3	37.54	1.42
0,30 - 0,40	27.91	5.5	24.60	11.0	35.39	0.22
0,40 - 0,50	30.13	10.2	27.34	14.9	35.32	0.94
0,50 - 0,60	30.13	16.8	27.76	16.3	34.10	0.71
0,60 - 0,70	28.37	28.0	25.36	15.5	31.95	1.11
0,70 - 0,80	29.17	50.7	22.63	11.1	30.74	1.38
0,80 - 0,90	34.36	78.6	23.90	6.2	36.96	2.06
0,90- 1,00	30.51	36.9	22.85	4.7	37.04	2.65
1,00- 1,10	32.46	19.3	25.75	3.8	40.83	3.48
1,10- 1,20	31.08	9.4	26.06	2.4	38.11	3.16
1,20-1,30	30.84	4.3	29.99	<L.D.	37.70	5.52
1,30-1,40	29.21	2.5	29.41	<L.D.	39.12	5.95
1,40- 1,50	25.92	1.6	27.99	<L.D.	36.24	6.43
1,50- 1,60	25.74	<L.D.	30.78	<L.D.	37.35	7.18
1,60-1,70	25.66	<L.D.	31.86	<L.D.	38.45	6.96
1,70- 1,80	25.74	<L.D.	28.00	<L.D.	37.44	5.96
1,80-1,90	25.74	<L.D.	28.94	<L.D.	38.07	3.72
1,90-2,00	25.94	<L.D.	30.33	<L.D.	39.14	3.68
2,00-2,10	26.77	<L.D.	31.98	<L.D.	40.89	2.74
2,10 - 2,20	26.80	<L.D.	32.71	<L.D.	35.65	3.23
2,20 - 2,30	28.18	<L.D.	34.20	<L.D.	35.44	3.36
2,30 - 2,40	28.79	<L.D.	34.01	<L.D.	32.70	2.93
2,40 - 2,50						2.04
2,50 - 2,60						1.45
2,60 - 2,70						1.05
2,70 - 2,80						0.37
2,80 - 2,90						0.22
2,90 - 3,00						0.31

Observações:

L.D. = Limite de Detecção

* Análises realizadas pelo CDTN - Belo Horizonte

** Análises efetuadas pelo CEDEX/CETA - Madri (Espanha)

TABELA 7.12 - Umidade volumétrica e concentração de trítio no perfil da sub-área 2.

Profundidade m	1 ^a Amostragem*		2 - Amostragem*		3 - Amostragem**	
	Abr/96		Ago/96		Dez/96	
	e %	Trítio pCi.mL ^{'''}	0 %	Trítio pCi.mL ^{'''}	e %	Trítio pCi.mL ^{'''}
0,00 - 0,10	32.48	4.6	32.27	6.7	34.98	7.38
0,10 - 0,20	32.17	4.8	31.95	10.5	37.14	5.18
0,20 - 0,30	34.10	5.3	31.65	22.6	37.61	6.47
0,30 - 0,40	33.71	7.8	30.77	27.8	37.49	9.16
0,40 - 0,50	32.86	16.3	32.67	10.7	36.41	9.23
0,50 - 0,60	33.59	28.4	32.33	5.9	36.08	7.75
0,60 - 0,70	34.59	52.2	28.69	3.5	31.61	6.05
0,70 - 0,80	33.65	15.9	28.58	2.6	32.45	3.27
0,80 - 0,90	30.89	10.3	26.72	1.7	29.75	1.87
0,90- 1,00	32.15	5.8	27.14	<L.D.	30.76	0.86
1,00-1,10	35.75	3.0	33.37	<L.D.	36.58	0.52
1,10-1,20	34.28	2.6	31.02	<L.D.	36.05	0.36
1,20- 1,30	32.77	1.8	27.45	<L.D.	33.96	0.23
1,30- 1,40	33.72	<L.D.	31.79	<L.D.	34.66	0.15
1,40-1,50	28.51	<L.D.	33.97	<L.D.	37.44	0.12
1,50- 1,60	26.95	<L.D.	33.77	<L.D.	36.48	0.03
1,60-1,70	28.26	<L.D.	29.43	<L.D.	33.81	0.01
1,70-1,80	26.08	<L.D.	30.02	<L.D.	33.50	0.00
1,80-1,90	26.25	<L.D.	29.59	<L.D.	32.53	0.00
1,90-2,00	25.73	<L.D.	28.57	<L.D.	32.69	0.00
2,00-2,10	26.11	< L.D.	31.67	<L.D.	34.81	0.00
2,10-2,20	25.22	<L.D.	31.45	<L.D.	32.78	0.00
2,20 - 2,30	24.71	<L.D.	25.83	<L.D.	30.18	0.00
2,30 - 2,40	21.41	< L.D.	23.03	<L.D.	30.44	0.00
2,40 - 2,50						0.00
2,50 - 2,60						0.00
2,60 - 2,70						0.00
2,70 - 2,80						0.00
2,80 - 2,90						0.00
2,90 - 3,00						0.00

Observações:

L.D. = Limite de Detecção

* Análises realizadas pelo CDTN - Belo Horizonte

** Análises realizadas pelo CEDEX/CETA - Madri (Espanha)

Linha de pedra à profundidade de 0,80 - 0,90 m

Relacionando estes resultados de trítio com os perfis de umidade volumétrica mostrados nas FIGURAS 7.5 e 7.6, foram constatados comportamentos diferenciados para as duas sub-áreas, no que se refere à movimentação da pluma de água tritiada. Para a sub-área 1, um avanço da pluma de água tritiada, com pico máximo do trítio posicionado na zona 3 (topo do horizonte saprolítico), em abril/96; em seguida, um recuo desta pluma para a zona 2 (horizontes BC - C) em agosto/96 e finalmente, em dezembro/96, um novo avanço da pluma, com posicionamento na zona 4 (horizonte saprolítico). Já na sub-área 2, o pico máximo, em abril/96, situou-se na zona 2 (horizonte B), recuou em seguida para a zona 1 (horizonte AB), em agosto/96 e permaneceu nesta zona, quando da amostragem final. Desta forma, pode-se observar que as oscilações das plumas de água tritiada estão intimamente relacionadas às características texturais e estruturais dos perfis de solo presentes nas áreas de estudo. Com efeito, na sub-área 1, o solo é do tipo Latossolo, com textura argilosa, estrutura granular e macroporosidade da ordem de 18,8% no horizonte diagnóstico e 26,0% a 0,60 m de profundidade. Na sub-área 2, o solo é do tipo Podzólico, textura muito argilosa, estrutura em blocos e com 12,1 e 14,3% de macroporosidade, a 0,30 e 0,60 m de profundidade, respectivamente. Em suma, pode-se concluir que o maior ou menor aprofundamento da pluma de trítio perfil adentro esteve relacionada com as diferenças na macroporosidade dos solos.

7.3.3 Deslocamento do traçador

O deslocamento do traçador em cada perfil de solo foi determinado através do cálculo do centro de gravidade, conforme Equação 4.6 - Capítulo 4. As planilhas correspondentes a estes cálculos encontram-se sintetizadas no Apêndice B.

Na TABELA 7.13 estão apresentados os dados do deslocamento do trítio calculados de duas maneiras: posição do centro de gravidade (centro de massa) da pluma do traçador e posição da concentração de maior valor (pico). Existe uma aproximação muito estreita para as duas metodologias empregadas. Isto se deve à boa distribuição do trítio nos perfis de solo, embora os mesmos apresentem formas variando de leptocúrtica a planocúrtica.

TABELA 7.13 - Deslocamento do traçador (cm)

	SUB - ÁREA 1		SUB - ÁREA 2	
	Pico Máximo	Centro de Gravidade	Pico Máximo	Centro de Gravidade
1ª Amostragem* - Abril/96	85,0	79,5	65,0	60,7
2ª Amostragem* - Agosto/96	55,0	59,1	35,0	33,7
3ª Amostragem** - Dezembro /96	155,0	156,7	45,0	42,4

Observações:

*Cálculos efetuados com base nas análises de trítio realizadas pelo CDTN;

**Cálculo realizado com base nas análises realizadas pelo CEDEX/CETA.

7.4 Balanço hídrico

As TABELAS 7.14 e 7.15 mostram, respectivamente, os dados de precipitação, evaporação e temperatura do ar registrados pela Estação Meteorológica de Belo Horizonte nos períodos de 1961 a 1990 (dados normais) e dezembro/95 a novembro/96. Estes dados estão sendo extrapolados para a região de Capitão Eduardo devido a ausência de outra estação meteorológica mais próxima.

Os dados mostram que a precipitação total de 1921,8 mm no período do experimento foi bem superior à precipitação média anual de 1491,3 mm da série histórica. A diferença de aproximadamente 430 mm é devida, quase que exclusivamente, por conta das precipitações registradas nos meses de dezembro/95 e novembro/96 e mostra que a precipitação no período do experimento foi atípica. À despeito desta situação, foram elaborados os balanços hídricos para as sub-áreas 1 e 2, considerando tão somente o período hidrológico, compreendido entre a aplicação do traçador e a última amostragem.

Para os cálculos dos balanços, foram ainda considerados como dados de entrada as capacidades de reserva de água no solo (CRA), cujos valores encontram-se apresentados na TABELA 7.16.

TABELA 7.14 - Dados meteorológicos do município de Belo Horizonte, para o período de 1961 a 1990.

Meses	Temperatura do Ar (°C)	Precipitação Total (mm)	Evaporação Total (mm)
dez	22.2	319.4	84.1
jan	22.8	296.3	86.7
fev	23.2	188.4	84.7
mar	23.0	163.5	95.3
abr	21.1	61.2	92.4
mai	19.8	27.8	92.8
jun	18.5	14.1	92.4
jul	18.1	15.7	105.7
ago	19.0	13.7	132.1
set	21.0	40.5	137.2
out	21.9	123.1	117.7
nov	22.2	227.6	96.3
TOTAL		1491.3	1217.4

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - 5º Distrito de Meteorologia (Belo Horizonte)

TABELA 7.15 - Dados meteorológicos do município de Belo Horizonte, para o período de dezembro/95 a novembro/96.

Meses do Ano	Temperatura do Ar (°C)	Precipitação Total (mm)	Evaporação Total (mm)
Dez/95	22.3	547.7	104.6
Jan/96	24.6	211.0	169.6
Fev/96	24.3	205.0	152.2
Mar/96	24.2	295.2	140.8
Abr/96	22.3	112.4	151.8
Mai/96	19.8	20.0	139.2
Jun/96	18.8	3.0	151.4
Jul/96	19.0	0.0	164.2 *
Ago/96	19.5	21.7	179.1
Set/96	20.8	70.4	182.1
Out/96	27.2	65.1	190.7
Nov/96	21.5	370.3	122.5
TOTAL		1921.8	1848.2

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - 5 "Distrito de Meteorologia (Belo Horizonte)

TABELA 7.16 - Capacidade de reserva de água nos solos (CRA).

SUB - ÁREA 1					
Intervalo (m)	Capacidade de Campo (% peso)	Ponto de Murcha (%peso)	Densidade aparente média (g.cm ³)	e (mm)	CRA (mm)
0,00 - 0,45	30.06	18.78	1.23	450	62
0,45 - 0,70	28.25	18.97	1.28	250	30
Capacidade de reserva de água para a profundidade de 0,70 m					92

SUB - AREA 2					
Intervalo (m)	Capacidade de Campo (% peso)	Ponto de Murcha (%peso)	Densidade aparente média (g.cm ³)	e (mm)	CRA (mm)
0,00 - 0,20	35.23	22.72	1.22	200	31
0,20 - 0,70	38.65	22.55	1.21	500	97
Capacidade de reserva de água para a profundidade de 0,70 m					128

Observações:

espessura (e)

Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha (PM) determinados, respectivamente, às pressões de 0,03 e 1,5 MPa;

Determinações realizadas pelo Laboratório de Solos da UFV - Método da Placa de Pressão (extrator de Richards).

Os dados disponíveis e os resultados de balanço hídrico foram agrupados nas TABELAS 7.17 e 7.18. Os fatores de correção da evapotranspiração potencial mensal, dada pelo nomograma de Thornthwaite, usados para ajustá-la ao número de dias do mês e a duração do brilho solar diário nos vários meses do ano e em latitudes entre 15° N e 37° S, encontram-se tabulados no Apêndice C. Nesta Dissertação foram utilizados os fatores de correção para a latitude de 20° S.

No período compreendido entre as 2ª e 3ª amostragens (abril até agosto) pode-se verificar que:

- a precipitação foi superada pela evapotranspiração, o que proporcionou um decréscimo da quantidade de água armazenada no perfil;
- a capacidade de reserva de água no perfil decresceu no período seco, tendo sido zerada nos meses de maio e junho e
- as deficiências de umidade ocorreram nos meses de julho a outubro, época em que a evapotranspiração ficou, forçosamente, reduzida e limitada à quantidade de água capaz de ser retirada do solo por convecção e difusão de vapor. Durante este tempo, ocorreu então a evapotranspiração efetiva ou real.

De uma maneira geral, um valor fixo de taxa média de escoamento é estabelecido para uma determinada região ou bacia hidrográfica. Segundo FREEZE & CHERRY (1979), um valor de 30% pode ser considerado quando não se dispõe de dados mais precisos ou indicativos de uma bacia, como é o nosso caso. Aplicando então esta taxa fixa e,

considerando os valores de excedentes de 1026,7 e 990,7 mm calculados pelos balanços hídricos (TABELAS 7.17 e 7.18), as recargas representariam 450,2 e 414,2 mm, ou 23,4 e 21,6% da precipitação, respectivamente, para as sub-áreas 1 e 2.

A consideração acima postulada teve por objetivo a comparação de dados das taxas de recarga calculadas pelos métodos do Balanço Hídrico e da técnica do trítio. Não obstante, é interessante deixar registrado que os dados de precipitação, escoamento e recarga, quando extrapolados para uma região inteira, sem a devida delimitação dos domínios de aplicabilidade e seleção, devem ser vistos com reserva.

TABELA 7.17 - Balanço hídrico para a sub-área 1.

BALANÇO HÍDRICO ; SUB-ÁREA 01												
ESTAÇÃO: Belo Horizonte			Cota: 896 m					Latitude: 19°56' S				
PERÍODO: DEZ/95 - NOV/96	Dez/95	Jan/96	Fev/96	Mar/96	Abr/96	Mai/96	Jun/96	Jul/96	Ago/96	Set/96	Out/96	Nov/96
Temperatura média (°C)	22.3	24.6	24.3	24.2	22.3	19.8	18.8	19.0	19.5	20.8	27.2	21.5
índice de calor mensal (i)	9.62	11.16	10.95	10.89	9.62	8.03	7.43	7.55	7.85	8.66	12.99	9.10
Fator cor. LAT. mês (K)	1.15	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09
ε	87.6	112.3	108.9	107.8	87.6	64.9	56.9	58.4	62.4	73.5	144.8	79.9
ETP(mm)	100.8	128.0	108.9	113.1	85.0	62.3	51.8	55.5	61.8	73.5	156.4	87.1
Precipitação (mm)	547.7	211.0	205.0	295.2	112.4	20.0	3.0	0.0	21.7	70.4	65.1	370.3
ETReal (mm)	100.8	128.0	108.9	113.1	85.0	62.3	51.8	1.0	21.7	70.4	65.1	87.1
CRA (mm)	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	49.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.0
Variação da Reserva (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-42.3	-48.8	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Excedentes (mm)	446.9	83.0	96.1	182.1	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	191.2
Deficiências (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.6	40.1	3.1	91.3	0.0

Dado de entrada:

BELO HORIZONTE

CRA (mm):

92.0

Precipitação Anual 1921.8 mm*Evapotr. Pot. Anual* 1084.1 mm*Evapotr. Real Anual* 895.1 mm*Excedente Anual* 1026.7 mm

TABELA 7.18 - Balanço hídrico para a sub-área 2.

BALANÇO HÍDRICO : SUB-ÁREA 02												
ESTAÇÃO: Belo Horizonte			Cota: 896 m					Latitude: 19°56' S				
PERÍODO: DEZ/95 - NOV/96	Dez/95	Jan/96	Fev/96	Mar/96	Abr/96	Mai/96	Jun/96	Jul/96	Ago/96	Set/96	Out/96	Nov/96
Temperatura média (°C)	22.3	24.6	24.3	24.2	22.3	19.8	18.8	19.0	19.5	20.8	27.2	21.5
índice de calor mensal (i)	9.62	11.16	10.95	10.89	9.62	8.03	7.43	7.55	7.85	8.66	12.99	9.10
Fator cor. LAT. mês (K)	1.15	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09
ϵ	87.6	112.3	108.9	107.8	87.6	64.9	56.9	58.4	62.4	73.5	144.8	79.9
ETP(mm)	100.8	128.0	108.9	113.1	85.0	62.3	51.8	55.5	61.8	73.5	156.4	87.1
Precipitação (mm)	547.7	¹ 211.0	205.0	295.2	112.4	20.0	3.0	0.0	21.7	70.4	65.1	370.3
ETReal (mm)	100.8	128.0	108.9	113.1	85.0	62.3	51.8	37.0	21.7	70.4	65.1	87.1
CRA(mm)	128.0	128.0	128.0	128.0	128.0	85.7	37.0	0.0	0.0	0.0	0.0	128.0
Variação da Reserva (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-42.3	-48.8	-37.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Excedentes (mm)	446.9	83.0	96.1	182.1	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	155.2
Deficiências (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.6	40.1	3.1	91.3	0.0

Dado de entrada:

BELO HORIZONTE

CRA (mm) : 128.0

Precipitação Anual 1921.8 mm*Evapotr. Pot. Anual* 1084.1 mm*Evapotr. Real Anual* 931.1 mm*Excedente Anual* 990.7 mm

7.5 Cálculo da recarga

Na TABELA 7.19 está consolidado os resultados dos cálculos de recarga, após decorridos 4, 8 e 12 meses da aplicação da água tritiada.

TABELA 7.19 - Dados de recarga.

Aplicação	Amostragem	Período (meses)	Deslocamento do traçador centro de gravidade - Zcg (cm)	Umidade volumétrica média (% vol.)	Recarga (R) (cm)	Precipitação (P) (cm)	R/P %
04/12/95	04/04/96	4	79.5	29.05	23.09	125.89	18.34
04/12/95	04 08/96	8	59.1	24.50	14.48	139.43	10.39
04/12/95	04/12/96	12	156.7	36.46	57.13	192.18	29.73
04/12/95	04/04/96	4	60.7	33.15	20.12	125.89	15.98
04/12/95	04/08/96	8	33.7	31.96	10.77	139.43	7.72
04/12/95	04/12/96	12	42.4	36.81	15.61	192.18	8.12

Os resultados parciais, correspondentes à 1ª amostragem, mostram que, nos primeiros 4 meses do período hidrológico, as recargas nas áreas dos experimentos foram muito próximas, correspondendo a uma lâmina de cerca de 20 cm de água. Neste período, a precipitação foi maior que a evapotranspiração e a umidade do solo foi mantida ligeiramente acima da capacidade de campo.

Na 2ª amostragem, época caracterizada pela deficiência hídrica, a evapotranspiração supera a precipitação e o movimento do trítio foi ascendente nas duas sub-áreas. No solo da sub-área 2, este movimento "per ascensum" representou uma redução de 50% da recarga anterior. Uma parcela significativa do traçador foi perdida por evapotranspiração da água contida no solo, FIGURA 7.13. Os solos da sub-área 2 são mais argilosos, com microporosidade preponderante, razão porque proporcionaram maior ascensão de água. Já na sub-área 1, onde a macroporosidade é importante, o movimento ascendente representou uma redução de 40% da recarga inicial. A ascensão capilar nas duas áreas baseia-se, primeiro no recuo da pluma de água tritiada mostrada nos perfis (FIGURAS 7.10 e 7.13) e segundo pela perda de atividade do traçador (diminuição na intensidade dos picos).

Para a 3ª amostragem, época em que houve a retomada da precipitação, os cálculos mostram que as recargas, ao final do período hidrológico, correspondem a 29,7 e 8,1% da precipitação anual, respectivamente, para os solos das sub-áreas 1 e 2. Estes valores tão discrepantes vêm reforçar ainda mais a diferença apontada para as duas áreas, tanto sob o ponto de vista geológico/pedológico, como das características físico-mecânicas dos solos.

Um estudo comparativo dos resultados de recarga obtidos pelos métodos do balanço hídrico e do traçador radioativo é mostrado na TABELA 7.20.

TABELA 7.20 - Comparação dos resultados de recarga/precipitação (R/P) pelos métodos do balanço hídrico e do traçador radioativo.

Sub-área	R/P pelo Balanço Hídrico (%)	R/P pela Técnica do Trítio(%)
1	23,4	29,7
2	21,6	8,1

A comparação acima mostra uma boa aproximação de valores para as taxas de recarga para a sub-área 1 e uma grande divergência para a sub-área 2. Basicamente isto se deve a dois fatos básicos:

- considerar como dado de entrada, nos cálculos do Balanço Hídrico, um escoamento fixo de 30% da precipitação, indistintamente para as duas sub-áreas e
- o Método de Thornthwaite é um método empírico, que não leva em consideração as propriedades físico-mecânicas, nem a dinâmica da água nos solos.

De acordo com a equação $EXCEDENTE = ESCOAMENTO + RECARGA$ e, considerando os valores de recarga obtidos pela técnica do trítio (TABELA 7.19) e os valores dos excedentes apresentados pelas TABELAS 7.17 e 7.18, obtém-se taxas de escoamento diferentes de 23,7 e 43,4%, respectivamente para as sub-áreas 1 e 2. Estes valores de escoamento são mais coerentes com as características texturais e estruturais apresentadas pelos solos nas áreas do experimentos, nos levando a concluir que solos desenvolvidos sobre materiais de origem diferentes devem ser analisados separadamente.

Analisando os dados de recarga obtidos com a técnica do trítio e os de escoamento deduzidos a partir destes e, considerando os dados texturais e estruturais dos solos presentes nas áreas dos experimentos, pode-se individualizar dois domínios distintos para a região do aterro sanitário de Capitão Eduardo:

Domínio 1

representado pelas características da sub-área 1 (solo proveniente da alteração de rochas gnáissicas), com 29,7% para a taxa de recarga e 23,7% para a taxa de escoamento de águas superficiais. Este domínio apresenta razoável capacidade de infiltração de água e, conseqüentemente, vulnerável, do ponto de vista ambiental à contaminação às águas subterrâneas, por poluentes;

Domínio 2

representado pelas características da sub-área 2 (solo proveniente da alteração de rocha metabásica), com taxa de recarga da ordem de 8% e taxa de escoamento de 43,4%. Este Domínio, por ser mais microporoso e impermeável, oferece menor vulnerabilidade à contaminação às águas subterrâneas. O solo presente neste Domínio poderá ser utilizado, por exemplo, como barreira de impermeabilização nas células de biorremediação, localizadas em solos do Domínio 1, para evitar a percolação de poluentes.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

O objetivo central desta Dissertação foi desenvolver e firmar competência em uma técnica específica de avaliação de recarga de água, na camada não-saturada de um solo, através da aplicação de um traçador isotópico artificial.

O trítio (^3H) foi escolhido por ser um traçador praticamente ideal, pois as moléculas isotópicas de água comportam-se como as não-isotópicas. Duas áreas de 20 m² cada uma, designadas de sub-área 1 e sub-área 2, localizadas nos domínios do futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo, município de Belo Horizonte, foram escolhidas para o trabalho experimental. O traçador, sob a forma de água tritiada, foi aspergido diretamente nas superfícies das duas sub-áreas; o monitoramento da pluma de água tritiada na zona não-saturada dos solos foi realizado por meio de três campanhas de sondagens/amostragens, após decorridos 4, 8 e 12 meses da aspersão. Para cada amostra, foram determinados o conteúdo de trítio e a umidade volumétrica. De posse das análises de trítio, foram construídos perfis de distribuição do traçador e calculados os deslocamentos da pluma. A recarga, após um período hidrológico completo (chuva-seca-chuva), foi expressa em relação à precipitação pluviométrica ocorrida no período e comparada com o Balanço Hídrico, calculado pelo Método de Thornthwaite.

Do ponto de vista geológico/pedológico, as principais características das áreas selecionadas são:

sub-área 1

caracterizada por solo proveniente da alteração de rochas gnáissicas do Complexo Belo Horizonte, definido de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS) como Latossolo Vermelho-Amarelo Câmbico (LVc), com horizontes A e B alóctones, linha de pedra (descontinuidade erosional), horizonte C e nível saprolítico à profundidade de 0,75 metro, textura argilosa, estrutura granular e macroporosidade variando de 18,8 a 26,0%;

sub-área 2

caracterizada por solo proveniente da alteração de rocha metabásica, definido também pelo SBCS como Podzólico Vermelho-Escuro (PE), apresentando horizontes A e B alóctones, linha de pedra, horizontes B e C autóctones e horizonte saprolítico à profundidade de 2,60 m, textura muito argilosa, estrutura em bloco e macroporosidade variando de 12,0 a 14,3%.

Através dos perfis de umidade volumétrica pode-se individualizar, para as duas sub-áreas, 4 zonas:

zona 1 - zona de distribuição normal, em que as umidades estão em conformidade com o aporte das águas de precipitação. Esta zona coincide com o horizonte A e com a transição para o horizonte B;

zona 2 - caracterizada por uma queda brusca da umidade, à qual está associada, na sub-área 1, à passagem transicional do horizonte B para o horizonte C e ao nível de linha de pedra; e, na sub-área 2, ao horizonte B alóctone e ao importante nível de linha de pedra (10 cm de espessura);

zona 3 - caracterizada por um aumento da umidade, sendo mais significativo para a sub-área 2 (relacionada ao horizonte B autóctone) do que para a sub-área 1 (relacionada ao horizonte saprolítico);

zona 4 - zona de redistribuição normal da umidade.

Quanto à técnica do traçador radioativo, a sua aplicação diretamente na superfície dos solos, contrapondo àquela de uso corrente, onde o traçador é aplicado abaixo da zona de raízes das plantas (profundidade de 0,70 - 1,00 m), além de retratar as condições naturais de percolação da água de chuva na zona não-saturada, possibilitou verificar que as oscilações das plumas de água tritiada estão intimamente relacionadas às características texturais e estruturais dos perfis de solo presentes nas áreas de estudo. Na sub-área 1, a pluma de água tritiada oscilou de acordo com o aporte de água de precipitação, posicionando-se à profundidade de 1,56 m - horizonte saprolítico, ao final do experimento (novembro/96); já na sub-área 2, apesar de uma oscilação importante, marcada, principalmente, por um recuo da pluma no período em que a evapotranspiração superou a precipitação (período de abril a agosto/96), pode-se constatar uma estagnação desta no horizonte B, posicionando o seu centro de gravidade à profundidade de apenas 0,42 m (horizonte B alóctone), ao final do experimento.

Em conformidade com os perfis de trítio e, como consequência das características texturais/estruturais das duas sub-áreas, os valores de recargas finais no período hidrológico

de dez/95 a nov/96, calculados pela metodologia do trítio, são bem discrepantes: 29,7 e 8,1% da precipitação no período, respectivamente para as sub-áreas 1 e 2.

Comparando estes valores de recarga com aqueles calculados pelo método de Thornthwaite (23,4% para a sub-área 1 e 21,6% para a sub-área 2) constata-se uma boa aproximação de valores para a sub-área 1 e uma divergência para a sub-área 2. A divergência se deve, primeiro por considerar como dado de entrada, nos cálculos do balanço, uma taxa fixa de escoamento de 30%, indistintamente para as duas sub-áreas e, segundo, porque o Método de Thornthwaite é um método empírico que não leva em consideração as propriedades físico-hídricas dos solos.

As taxas de escoamento de 23,7 e 43,4%, respectivamente para as sub-áreas 1 e 2, calculadas a partir da equação clássica $EXCEDENTE = ESCOAMENTO + RECARGA$, considerando os dados de recarga calculados pela técnica do trítio e os de excedente calculados pelo balanço hídrico, são mais coerentes com as características texturais e estruturais apresentadas pelos solos existentes nas áreas dos experimentos.

Analisando os dados de recarga e os de escoamento deduzidos a partir destes e, considerando as características texturais e estruturais dos solos, pode-se individualizar dois domínios diferentes para a região do futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo:

Domínio 1, representado pelas características da sub-área 1 (solo de alteração de rochas gnáissicas), com razoável capacidade de infiltração de água e vulnerável, do ponto de vista ambiental, à contaminação das águas subterrâneas, por poluentes;

Domínio 2, representado pelas características da sub-área 2 (solo de alteração de rocha metabásica), com reduzida capacidade de infiltração. Este Domínio por ser mais microporoso e impermeável, oferece menor vulnerabilidade à contaminação às águas subterrâneas. O solo aí presente poderá ser utilizado, por exemplo, como barreira de impermeabilização nas células de biorremediação localizadas em solo do Domínio 1, evitando-se com isto a percolação de poluentes perfil adentro.

Diante dos resultados obtidos e da discussão apresentada concluiu-se que:

1. o objetivo central proposto nesta Dissertação foi plenamente alcançado;
2. a técnica de marcação com o trítio artificial mostrou ser uma ferramenta útil, de aplicação simples, rápida e relativamente barata, capaz de fornecer informações aos trabalhos de hidrogeologia. Esta técnica permite obter determinações que levam em consideração características físico-hídricas específicas dos perfis de solo ou unidades litológicas. Por esta razão gera dados mais precisos e confiáveis;

3. para a interpretação dos dados de recarga é imprescindível o conhecimento prévio da área de trabalho através de levantamento geológico/pedológico e da caracterização físico-mecânica dos solos;
4. para fins de implantação efetiva do aterro sanitário, sugere-se que sejam realizados trabalhos adicionais para se obter uma distribuição espacial da recarga na área, permitindo, com isto, o traçado de mapas de vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos. Os solos, tais como os existentes na sub-área 1, cuja abrangência atinge a quase totalidade da área do aterro, representam um risco para o meio ambiente, necessitando de barreiras de impermeabilização para evitar a percolação de poluentes.
5. finalmente, recomendamos que os valores das taxa de recarga de 30% e 8% obtidos com a técnica nuclear sejam adotados em outras atividades de pesquisa, ou mesmo projetos que venham ser instalados em terrenos com geologia semelhante à área investigada, isto é, constituídos por solos de alteração de gnaisses pertencentes ao Domínio do Complexo Belo Horizonte e desenvolvidos a partir de rocha metabásica, respectivamente.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, L. W. & CORNOG, R. - Radioactive hydrogen, Phys. Rev. [2] 57 : 248 (feb 1,1940)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - Standard method for laboratory determination of water (moisture) content of soil, rock, and soil-aggregate mixtures - ASTM-D2216-80.1980. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - Solo - Determinação da massa específica in situ, com o emprego de cilindro de cravação. NBR 9813.1987.5p.
- ATARAN, Y; ROETHER, W.; MUNNICH, KO.; MATTHESS, G. - The sandhausen shallow -groundwater tritium experiment. In: Isotope Techniques in groundwater hydrology: Proceedings of a symposium, Vienna, 11-15 march 1974, vol I, Vienna, 1974. p. 21-43.
- BEDMAR, A.P. - Isótopos em hidrologia - Editorial Alhambra S.A., Madrid, 1972.328p.
- BEDMAR, A.P.& MOSER, A. - Guide to the safe handling of radioisotopes in hidrology. Reproduced by the IAEA, Vienna, 1990.119p.
- BLUME, HP.; ZIMMERMANN, U.; MUNNICH, K.O. - Tritium tagging of soil moisture: The water balance of forest soils. In: Internacional Atomic Energy Agency. Isotopes and radiation techniques in soil physics and irrigation studies: Proceedings of a symposium, Istambul, 12-16 june 1967. Vienna, 1967. p. 315-332.
- BOWEN, G; ROZANSKI, K.; VOSE, P. - Isotopes in environmental research - IAEA Bulletin, nº 4.1990, p.5-8.
- CHANDRA, U. & POLI, D.CR. - 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 Aguas Subterrâneas. Aguas Subterrâneas: Anais do Congresso Brasileiro sobre realizado em Recife, nov. 1980. Recife, 1980. p. 545-555.
- CHARAMATIEU, A. - Le tritium en radioprotection Gifsur Yvette, CEA -Centre d'Études Nucléaires de Saclay, CEA- BIB - 131, 1968.

- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - Diretrizes básicas de radioproteção. CNEN-NE 3.01, Rio de Janeiro, 1988.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - Curso de Proteção Radiológica, Belo Horizonte, 1992,76p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Água subterrânea e poços tubulares. São Paulo, 1978.
- COOK, P.G. & WALKER, G. - Evaluation of the use of ^3H and ^{14}C to estimate groundwater recharge in arid and semi-arid environments. In: IAEA Isotopes in Water resources management: Proceedings of a Symposium held in Vienna, 20-24 march 1995. Vienna, 1996. p. 397-403 (IAEA-SM-336/11)
- 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).
- CUSTÓDIO, E & LLAMAS, M.R. - Hidrologia subterrânea, Capítulo 12.1, Tomo II. Ediciones Omega S.A. - Barcelona, 1976, p. 1167.
- CSANADY, G.T. - Turbulent diffusion in the environment. Dordrech, Holland, D. Reidel Publishing Company, 1973.
- DATTA, P.S.; GOEL, P.S.; RAMA, F.A. Sc.; SANGAL, S.P. - Ground water recharge in western Uttar Pradesh. Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Vol LXXVIII - Section A, Bangalore Press, 1973, India, p. 1-12.
- DATTA, P.S. & GOEL, P.S. - Groundwater recharge in Panjab State (India) using tritium tracer. Nordic Hydrology, vol 8, 1977, India, p.25-236.
- DATTA, P.S.; DESAI, B.I.; GUPTA, S.K. - Hydrological investigation in Sabamarti Basin. In: Groundwater recharge estimation using tritium tagging method. Proceedings Indian Natl. Sci. Acad., Part A n° 46 (1), 1980. p. 84-98.
- DICTIONARY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Academic Press Inc., San Diego - California, 1992, p. 1784
- DORR II, J.V.N. - Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil, U.S. Geol. Survey; Prof. Paper (641-A), Washington, 1969. 1ip.

- EMBRAPA - Manual de Métodos de Análise de solos - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (SNLCS), 1979. snp (sem nota de paginação).
- FISCHER, H.B.; LIST, E.J.; KOH, R.C.Y.; IMBERGER, J ; BROOKS, N.H. - Mixing in inland and coastal waters. New York, Academic Press, Inc., 1979.
- FREEZE, RA & CHERRY, J.A. - Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1979. p.219.
- GOEL, P S ; DATTA, P.S.; TANWAR, B.S. - Measurement of vertical recharge to groundwater in Haryana State (India) using tritium tracer. Nordic Hydrology, n° 8, 1977 p.211-224.
- HAVEL Y, E. & NIR, A. - The determination of aquifer parameters with the aid of radioactive tracers, J. Geophys. Res., 61, 1962. p.2403.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO) - Sistema Internacional de Unidades. 3ª ed. Duque de Caxias (RJ). 72p.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) - Basic safety standards for radiation protection. Vienna, 1982.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) - Guide on nuclear techniques in hydrology (Technical Reports Series n° 91, Vienna, 1983.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) - Handbook on nuclear activation. Technical Report Series, n° 273, Vienna, 1987.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) - Safe handling of tritium. Technical Report Series, n° 324, Vienna, 1991.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP) - Limits for intakes of radionuclides by workers. Oxford, 1982. (ICRP-30).
- JACOBS, D.G - Sources of tritium and its behavior upon release to the environment. U.S.Atomic Energy Commission OAK Ridge National Laboratory. AEC Critical Review Series, Virginia, 1968. 90p.
- KAUFMANN, W.J. & ORLOB, G.T. - An evaluation of groundwater tracers, Tans. Amer. Geophys Union, 37, 1956, p.297.

- LANGE, NA. & FORKER - Handbook of chemistry, 10th ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1961.
- LIBARDI, P. L. - Dinâmica da água no solo. ESALQ/USP - Piracicaba, SP., 1995. 497p.
- LIMA, L.M.Q. - Documento 02 (Sondagens). Prefeitura Municipal de Belo Horizonte - Superintendência de Limpeza Urbana, 1996. 75p.
- MATOS, A. T. - Física do solo. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA), Universidade Estadual do Norte Fluminense. 1995. 63p.
- MARSILY, G. - Quantitative Hydrogeology: Groundwater hydrology for engineers. Academic Press, Inc. San Diego, 1986, 435p.
- MUNNICH, K.O. - Moisture movement measured by isotope tagging. In: International Atomic Energy Agency. Guide-book on nuclear techniques in hidrology. Vienna, 1968, p. 112-118 (Technical Reports Series n° 91).
- MUNSELL COLOR - Munsell Soil Color Charts, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation. Baltimore, Maryland. 1975 edition.
- NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP), Tritium in the environment. NCRP Report n° 62, Washington, 1979. 125p.
- NOCE, CM.; MACHADO, N; TEIXEIRA, W. - O complexo Belo Horizonte e a evolução arqueana do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, 1994. Camboriú, 1994. Boletim de resumos expandidos.....Porto Alegre, SBG/DNPM/CPRM, vol 1, 1994. p.68-69.
- POLI, D.CR. - Aplicação e avaliação da técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial em pesquisas hidrogeológicas no Brasil. São Paulo, USP/Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1989. 178p. (Tese de Doutorado).
- POLI, D.CR. - Estudo da infiltração da precipitação e determinação da recarga do aquífero em Abadia de Goiás - Goiânia pelo método de marcação da umidade do solo com trítio artificial IPEN/CNEN - São Paulo, 1993. 51p. (Relatório Interno).
- REICHARDT, K. - Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 3. Ed. Rev. Campinas: Fundação Cargill, 1975.285p.

- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. - Pedologia: base para distinção de ambientes. NEPUT. Viçosa, 1995.304p.
- ROMANO, A. W.; VIANA, C. S.; FANTINEL, L. M.; LAUREANO, F. V. - Estruturação geológica do sítio de Belo Horizonte - MG. O papel das estruturas antigas no comportamento neotectônica. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, 1994, Camboriú. Boletim de resumos expandidos. Porto Alegre, SBG/DNPM/CPRM, vol 2, 1994, p. 260-261.
- SAXENA, R. K. - Use of a mechanistic model to simulate soil moisture and tritiated water transport in a wheat field In: International Atomic Energy Agency. Isotopes in water resources management: Proceedings of a symposium held in Vienna, 20-24 march 1995. Vienna, 1996. p.327-338. (IAEA-SM-336/38).
- SILVA, A. B.; CARVALHO, E. T.; FANTINEL, L. M.; ROMANO, A. W.; VIANA, C. S. - Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no Município de Belo Horizonte. Relatório Final. Belo Horizonte. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. UFMG/IGC/FUNDEP, 1995. 150p.
- SILVEIRA, A. L. L. - Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: Hidrologia: Ciência e Aplicação. TUCCI, CEM. (organizador). Editora da Universidade de São Paulo/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. São Paulo, 1993, p 35-40.
- SILVEIRA, A. L. L; LOUZADA, J. A ; BELTRAME, L. - Infiltração e armazenamento no solo - In: Hidrologia: Ciência e Aplicação. TUCCI, CEM. (organizador). Editora da Universidade de São Paulo/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. São Paulo, 1993, p. 335-365.
- SMITH, B. D.; WEARN, P. L.; RICHARDS, H. J.; ROWE, P. C. - Water movement in the unsaturated zone of high and low permeability strata by measuring natural tritium. Proc. Symp. Isotope Hydrology. IAEA, Vienna, 1970. p 73-87.
- STEENHUIS, T. S.; JACKSON, C. D. ; KUNG, S. K. J. & BRUTSAERT, W. - Measurement of groundwater recharge on eastern Long Island. New York (USA) Journal of Hydrology, 79 (1/2), 1985 p. 145-169.
- VEIHMEYER, F. J. & HENDRICKSON, A. H - Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. Soil Sci. 68, 1949. p. 75-94.

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.

WAGENET, R. J. - Water and solute flux. In: KLUTE, A. (ed). Methods of soil analysis. Part I: Physical and mineralogical methods Madison, ASA, SSSA. 1986. p. 1055-1085.

ZIMMERMANN, U; EHHALT, D., MUNNICH, KO. - Soil-water movement and évapotranspiration 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. 567-585.

ANEXO 1

PLANO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - PPR

REQUISIÇÃO DE SERVIÇOS - RS

**PLANO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA A APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE
MARCAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO COM TRÍTIIO ARTIFICIAL**

AUTOR:

Cláudio Raposo

Supervisão de Meio Ambiente

CDTN/CNEN

NOVEMBRO/1995

PLANO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

1. ÓRGÃO EXECUTOR

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/CNEN, Supervisão de Meio Ambiente - CT6.

2. LOCAL

Área do futuro aterro sanitário de Capitão Eduardo, situada a 11,5 km do centro de Belo Horizonte.

A área pertence à Prefeitura de Belo Horizonte e encontra-se desabitada.

3. OBJETIVO DO TRABALHO

O trabalho objetiva a determinação da taxa de recarga de águas pluviais na camada não saturada do solo, através da aplicação da técnica de marcação com o trítio artificial.

Este trabalho é parte integrante da Dissertação de Mestrado do geólogo Cláudio Raposo.

4. RADIOISÓTOPO A SER EMPREGADO

O radioisótopo a ser empregado é o trítio artificial ^3H , cujos principais parâmetros encontram-se sumarizados na TABELA 1 (POLI - 1989 e IAEA - 1991).

A quantidade de trítio (^3H) é geralmente expressa em unidades de trítio, onde 1 UT é definida como um átomo de ^3H por 10^{18} átomos de ^1H ; uma UT equivale a 7,2 dpm.L⁻¹ de água ou 3,2 pCi.L⁻¹, ou 120 mBq.L⁻¹ de água.

- Data de aplicação da água tritiada: dezembro/1995;
- Período de monitoração: dezembro/95 a dezembro/96;
- N° de áreas de aplicação: 2;
- Dimensão de cada área: 5 m x 4 m (20 m²);
- Atividade total: 1 mCi (37 MBq) por aplicação;
- Concentração, o radionuclídeo, diluído em 50 L de água, será lançado na superfície do terreno com o auxílio de um regador, numa área de 20 m², com concentração de 20 nCi.mL⁻¹ (0,74 x 10³ Bq.mL⁻¹);
- Meio de transporte: rodoviário, em veículo próprio do CDTN.

TABELA I - Sumário dos Principais Parâmetros para o Trítio

Parâmetro	Valor	Fonte
Radiação	P (100%)	EVANS, 1974
Produto de Decaimento	³ He	EVANS, 1974
T _{1/2}	12,38 +/- 0,03 anos 12,33 anos	OLIVER, 1989 TRS n° 273, 1987 TABLE OF ISOTOPES, 1987
Peso Atômico	3,016997 +/- 0,000001	JACOBS, 1968
EP _{ax}	18,610 +/- 0,016 keV	OLIVER, 1989
EP _{med}	5,6928 +/- 0,0033 keV	OLIVER, 1989
Radiação Acima de 17 keV	0,05%	EVANS, 1974
Partículas P:		
alcance no ar	4,5 - 6 mm	EVANS, 1974
penetração máxima	0,6 mg. cm ⁻²	
meia espessura	0,049 mg.cm ⁻² ou 18 um para o Al	AIEA-1991

Fonte: POLI (1989); AIEA (1991)

5. PESSOAL ENVOLVIDO

Cláudio Raposo - CT6

Duarte Augusto Costa - CT6

Nayron Cosme de Lemos - CT6/CT7

Yvon Chausson - AT4 (Análises Laboratoriais)

Técnico a ser designado pelo Serviço de Radioproteção do CDTN (se necessário).

6. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

Na aplicação da técnica nuclear, para a estimativa de recarga subterrânea, tem sido utilizado normalmente o trítio artificial sob a forma de água tritiada (HTO).

A detecção do trítio será feita pelo método dos detectores líquidos de cintilação utilizando-se um Espectrômetro TRICARB 2550 TR/LL - Packard, Canberra Industries Inc.. O cintilador líquido será o Pico-Fluor 40 da Packard.

6.1 Pré-Diluição

Uma pré-diluição do radionuclídeo será feita em laboratório, no próprio CDTN, enquanto a diluição final processar-se-á no campo. O manuseio será feito cuidadosamente utilizando-se luvas de proteção para evitar o contato com a pele.

No laboratório, o manuseio será realizado no interior de uma capela com exaustão, localizada na área controlada do reator TRIGA/CDTN. O conteúdo de uma ampola de vidro contendo 104,01 mCi de trítio em 4,73 mL será vertido em balão volumétrico de 10 mL, o qual terá seu volume completado com água destilada, ou seja, praticamente isenta de trítio (concentração menor do que 3-4 UT.L⁻¹). Da solução do balão, será pipetado um volume de 0,19 mL correspondente à atividade de 2 mCi, o qual será vertido em um frasco de polietileno contendo 200 mL de água natural.

Esse frasco será devidamente acondicionado para o transporte até o campo, da seguinte maneira: primeiramente será inserido em um saco plástico, cuja extremidade aberta será vedada (amarrada); esse procedimento será repetido para um segundo saco plástico; o conjunto será colocado em uma caixa de papelão e os espaços vazios desta caixa serão preenchidos com material absorvente.

A solução restante no balão de vidro será distribuída em duas ampolas de quartzo com capacidade para cerca de 9 mL cada. Essas ampolas serão hermeticamente vedadas, soldando-se as suas extremidades abertas através do maçarico, e entregues ao Serviço de Proteção Radiológica do CDTN para serem guardadas.

6.2 Trabalho de Campo

No campo, a diluição do trítio será processada a partir de uma alíquota previamente preparada no CDTN, a qual será transportada em embalagem dupla, com material absorvedor de água para proteção. A diluição final será obtida através da adição de 100 mL da solução pré-diluída, com atividade de 1 mCi, em uma bombona de plástico contendo 50 litros de água, para cada aplicação, ou seja, 20 nCi.mL⁻¹. O radionuclídeo diluído em água será irrigado com auxílio de um regador, numa área de 20 m².

Durante a aplicação, a área será mantida sob segurança, sem acesso aos indivíduos do público.

6.3 Amostragem

A amostragem do solo, para a determinação da umidade gravimétrica e do conteúdo de trítio, será realizada a cada quatro meses, a partir da data de aplicação, até completar um ciclo anual de chuvas.

As amostras de solo serão tomadas com um trado motorizado, com execução de furos de sondagem de 6" de diâmetro. A amostragem será feita em intervalos regulares de 10 cm até a

profundidade desejada. Quantidades adequadas de solo serão armazenadas em frascos bem vedados, os quais serão levados ao laboratório para as determinações analíticas.

6.4 Detecção do Trítio pelo Método dos Detectores Líquidos de Cintilação

A contagem por cintilação líquida envolve uma mistura da amostra com um material cintilante (cintilador) que serve como detector, na proporção de 1:1. A principal vantagem é a geometria 4TC, que resulta em altas eficiências de medição.

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

6.5 Espectrômetro de Cintilação Líquida

O espectrômetro de cintilação líquida a ser empregado para a determinação do conteúdo de trítio será o TRICARB 2550 TR/LL - Packard, Canberra Company. Como solução cintiladora será utilizado o cintilador líquido Pico Fluor-40, também da Packard.

6.6. Preparação das amostras

As amostras a serem analisadas serão preparadas com 10 mL de solução cintiladora (Pico Fluor-40) e 10 mL de água tritiada. Após rigorosa agitação, o recipiente de contagem será colocado no TRICARB, que para melhor eficiência de medição, deverá estar instalado em uma sala climatizada (temperatura de 10° C).

As amostras serão mantidas no cintilador pelo menos por uma hora antes de serem iniciadas as contagens, para refrigeração e decaimento da fosforescência.

6.7 Estudo da Recarga de Aquíferos

Esse trabalho pretende estudar a infiltração/recarga de água na zona não saturada de solos, utilizando-se a técnica de marcação da água com radioisótopos artificiais (trítio).

O deslocamento do traçador é indicado pelo pico em sua concentração ou pelo centro de gravidade no perfil de trítio. A lâmina de água deslocada da profundidade de injeção até a água subterrânea é a medida de recarga do aquífero no intervalo de tempo entre a marcação e a amostragem.

7. RADIOPROTEÇÃO

O trítio é certamente um dos radionuclídeos de menor toxicidade, estando 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 II fornece o limite de incorporação anual (LIA) e as concentrações derivadas no ar (CDA), para o trabalhador, baseada numa semana de 40h para a água tritiada.

TABELA II - Limites Anuais para Ingestão e Inalação de Água Tritiada

Radionuclídeo	Unidade		Oral	Inalação
	³ H (água tritiada)	LIA	Bq	3×10^9
	CDA	Bq.m ⁻³	-	8×10^5

7.1 Princípios da Justificação, da Otimização e Limite de Dose

Da justificação:

A técnica que utiliza o trítio artificial como traçador em estudos hidrogeológicos tem sido a mais indicada em áreas onde não se dispõe de um inventário de dados hidrometeorológicos.

Além do mais, o trítio é o único radioisótopo radioativo do hidrogênio, seguindo praticamente as mesmas reações químicas do hidrogênio ordinário, (BEDMAR.,1972).

As vantagens do traçador radioativo, como o trítio, são, em síntese: extraordinária sensibilidade de detecção, permite diluições extremas, seletividade e custo relativamente baixo.

Da otimização:

De acordo com POLI (op. cit), os principais parâmetros que devem ser levados em consideração para a aplicação da metodologia de marcação com o trítio artificial são:

- tempo máximo "t" após o qual o traçador ainda pode ser detectado = 1 ano;
- sensibilidade de detecção do espectrômetro de cintilação $w 12 \text{ Bq.L}^{-1}$ (100 UT.L^{-1});
- distribuição gaussiana da concentração do traçador;
- nenhuma perda do traçador por decaimento radioativo;

De acordo com os regulamentos de segurança, deve-se manter a concentração do traçador tão baixa quanto possível.

Para a aplicação da água tritiada sob a forma de irrigação/aspersão, foi sugerido pelo Dr. Plata A. Bedmar (Perito da AIEA) que fosse usada uma atividade da ordem de 1 mCi.

Essa atividade foi calculada admitindo-se:

- umidade do solo de 25% ;
- concentração média desejada de 10.000 UT.m³.

Considerando uma distribuição Gaussiana e uma espessura da nuvem de traçador de, no máximo 6 metros, a quantidade de água contida em um prisma de 1 m² seria de 0,25 x 6 m x 1 m³ = 1,5 m³. Para uma concentração desejada de 10.000 U.T.m³ (32 uCi.rn³), a atividade de trítio no prisma unitário seria de 32 uCi.m³x1,5 m³ = 48 uCi. Para uma parcela 20 m², seriam necessários então: 20 x 48 uCi = 960 uCi, ou aproximadamente 1 mCi.

Do limite de dose:

Para o trabalhador:

A comparação dos dados da atividade total a ser usada (1 mCi = 37 MBq) e os apresentados na TABELA II, mostra que, mesmo que todo o trítio, sem diluição, fosse ingerido ou inalado, ainda assim, estaríamos muito abaixo do LIA (81 mCi) para este radionuclídeo, ou seja, 81 vezes menor. A concentração de trítio no solo baixará a níveis muito menores se levarmos em consideração as diluições adicionais por águas de chuvas, por perdas devido à evaporação natural e percolação no terreno, o que reforça todos os aspectos de segurança radiológica aqui apresentados.

Para indivíduos do público:

Considerando que o limite de dose para indivíduos do público (1 mSv.ano⁻¹) é 50 vezes menor que o limite para o trabalhador (50 mSv.ano⁻¹), e considerando, como se informou acima, que será utilizada uma atividade de 81 vezes inferior ao LIA, pode-se concluir, por analogia, que a dose para o indivíduos do público será menor, cerca de 1,6 vezes, que a estabelecida nas normas da CNEN.

7.2 Controle da Área de Trabalho e Cuidados Especiais

A área de trabalho será demarcada, sinalizada e mantida sem perturbação. Os trabalhadores envolvidos no processo de aspersão da água tritiada deverão usar luvas de proteção para evitar o contato com a pele.

7.3 Riscos de Contaminação

Não há risco de contaminação significativa para os trabalhadores, haja vista a diluição inicial do radionuclídeo e a atividade total abaixo do LIA. Entretanto, será feita coleta de urina antes e após os trabalhos para o cálculo de dose recebida por estes indivíduos. Na eventualidade de algum acidente durante a manipulação e aplicação da água tritiada, o trabalho será afastado de seu trabalho quando o nível de trítio na urina for igual ou superior a 850 kBq.L⁻¹ de urina (nível de intervenção - IRCP n° 30, 1982).

No caso de indivíduos do público, o risco de contaminação significativa será ainda menor, pois além da diluição inicial do radionuclídeo, há também de se considerar as perdas por incorporação e infiltração no terreno e as diluições ocasionadas por águas de chuvas. Além do mais, a área objeto de estudo, localiza-se em região desabitada, cercada e de acesso controlado.

Acrescenta-se que as aplicações serão realizadas em duas áreas distintas, separadas uma da outra de 800 m, em cotas de 791 e 776 m, distando aproximadamente 200 e 250 m das drenagens secas mais próximas, cujos talvegues médios estão em desníveis de cotas de 65 e 40 metros, respectivamente. A possibilidade do traçador atingir, em cada caso, a drenagem principal é nula, em nossa avaliação.

8. REFERÊNCIAS

BEDMAR, AP. - Isótopos em Hidrologia - Madrid, Alhambra, 1972.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, 1988 (CNEN-NE-3.01).

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - Licenciamento de instalações radiativas. Rio de Janeiro, 1984 (CNEN-NE-6.02).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY-AIEA - Safe handling of tritium. Technical Reports Series, n° 324, Vienna, 130p., 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP) - Limits for intakes of radionuclides by workers. Oxford, 1982 (ICRP - 30).

POLI, D.CR. - Aplicação e avaliação da técnica de marcação da umidade do solo com trítio artificial em pesquisas hidrogeológicas no Brasil. São Paulo, USP/IPEN, 1989, 178 p. (Tese de Doutorado).

REQUISIÇÃO DE SERVIÇOS

NÚMERO: CT6-018/95

DATA: 17.11.95

Expedidor:

- CDTN (Supervisão de Meio Ambiente - CT6).

Consignatário:

- CDTN - Cláudio Raposo - CT6.

Transportador:

- CDTN.

Meio de Transporte:

- Rodoviário.

Fonte de Radiação:

- Trítio, sob a forma de água tritiada;
- atividade = 1 mCi por aplicação; concentração = 20 nCi.mL⁻¹.

Pré-Diluição:

- Em laboratório, no próprio CDTN; a alíquota preparada será transportada em embalagem dupla, com material absorvedor de água para proteção.

Local de Diluição:

- No próprio campo, para evitar riscos de contaminação durante o transporte.

Material para Diluição:

- Bombonas de plástico de 50 litros.

Tipo de Veículo de Transporte:

- Mercedes Bens, modelo 608; Placa OF-8652, pertencente ao CDTN.

Intinerário:

- CDTN - BR 262 até a ponte do Rio das Velhas - Conjunto Habitacional Capitão Eduardo
- Futuro Aterro da SLU/PMBH;
- distância aproximada de 11,5 km.

Data e Local de Embarque:

- Dezembro/95; CDTN.

Desembarque:

- Futuro Aterro Sanitário da Fazenda Capitão Eduardo, no limite nordeste do município de Belo Horizonte.

Objetivo:

- Determinação da taxa de recarga de águas pluviais na camada não saturada do solo, através da marcação com trítio artificial. O trabalho é parte integrante da Dissertação de Mestrado do geólogo Cláudio Raposo.

Equipe de Trabalho:

- Cláudio Raposo - CT6,
- Duarte A. Costa - CT6,
- Nayron Cosme de Lemos -,CT6/CT7.

Local de Aplicação da Água Tritiada:

- Futuro Aterro Sanitário da SLU/PMBH, localizado na Fazenda Capitão Eduardo, município de Belo Horizonte.

Ambiente de Trabalho

- A céu aberto, em área desabitada, cercada e de acesso controlado pela SLU/PMBH.

Estimativa de Dose:

- Abaixo dos limites de incorporação anual - LIA, conforme Plano de Radioproteção (em anexo).

Controle da Área de Trabalho:

- A área de trabalho será demarcada, sinalizada e mantida sem perturbação.

Cuidados Especiais:

- O pessoal envolvido no processo de aspersão da água tritiada no solo deverá usar luvas de proteção para evitar o contacto com a pele. Durante a aplicação, a área será mantida sob segurança, sem acesso de indivíduos do público.

Riscos de Contaminação para os Trabalhadores:

- Não há risco de contaminação significativa, principalmente quando se considera a diluição inicial do radionuclídeo em água (50 litros). Caso ocorra algum acidente a ser observado pela equipe de trabalho durante a manipulação/aplicação da água tritiada, o trabalhador será afastado de seu trabalho, quando o nível de trítio na urina for igual ou superior a 850 kBq de trítio por litro de urina (nível de intervenção - ICRP n° 30, 1982). Será feita coleta de urina antes e após os trabalhos para o cálculo de dose recebida pelos trabalhadores envolvidos.

Riscos de Contaminação para os Indivíduos do Público:

- O risco de contaminação significativa para indivíduos do público será ainda menor, pois além da diluição inicial do radionuclídeo, há também as perdas por evaporação e infiltração no terreno e as diluições ocasionadas por águas de chuvas. Além do mais, a área objeto de estudo localiza-se em região desabitada, cercada e de acesso controlado pela SLU/PMBH.

APÊNDICE A

- *Definições matemáticas - densidades real e aparente e umidades gravimétrica e volumétrica*

Desenvolvimento da Equação 4.7

Considerem-se as definições a seguir:

- umidade gravimétrica (U) com base em peso

$$U = \frac{M_a}{M_s}$$

adimensional

onde M_a = massa de água

M_s = massa do solo seco

- umidade volumétrica (θ) com base em volume

$$\theta = \frac{V_a}{V_t}$$

adimensional

onde: V_a = volume de água

V_t = volume total (volume de sólidos + volume de poros)

- densidade aparente (ρ_b)

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t}$$

g.cm^{-3}

onde: M_s = massa de solo seco

V_t = volume total da amostra

- densidade da água

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_a}$$

g.cm^{-3}

onde: M_a = massa de água e V_a = volume de água

Pode-se chegar à seguinte relação:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t} = \frac{\rho_a V_a}{V_t}$$

Como $m_a = U \cdot m_s$ então, substituindo-se na relação anterior, tem-se:

$$\frac{p_b - p_a}{\rho_a} = \frac{V_a}{V_t} \cdot \frac{m_s}{m_a} \cdot \frac{p_a}{\rho_a} \cdot \frac{V_t}{U}$$

entretanto, $\frac{V_a}{V_t} = \bar{\alpha}$

Substituindo-se novamente, tem-se:

$$\frac{p_b - p_a}{\rho_a} = \frac{U}{\rho_a} \cdot \bar{\alpha} \cdot \frac{p_a}{\rho_a} \cdot \frac{V_t}{U} \quad \text{ou} \quad \frac{p_b - p_a}{\rho_a} = \bar{\alpha} \cdot \frac{p_a}{\rho_a} \cdot \frac{V_t}{U}$$

adimensional

Finalmente, considerando a densidade da água (ρ_a) igual a 1 g.cm^{-3} , tem-se:

$$0 = p_b \cdot U \quad (4.8)$$

De volta à Equação 4.7, ela pode ser obtida a partir da definição de fluxo volumétrico ou velocidade de Darcy. O fluxo volumétrico (q) é o volume de água (Q) que passa por unidade de tempo (t) pela unidade de área de seção transversal (A), perpendicular ao movimento. Assim:

$$q = \frac{Q}{A \cdot t} \quad \frac{L^3}{L^2 \cdot T} = \frac{L}{T}$$

Apesar deste fluxo ter dimensões de uma velocidade, ele não representa a velocidade com que a água se move dentro do solo. A velocidade real (V) da água no solo é o volume de água (Q) que passa por unidade de tempo (t), pela área disponível ao fluxo, isto é, seção transversal de poros.

Para um solo saturado, esta seção transversal de poros é o produto da área efetiva (A) pela porosidade (α). Assim:

$$v = A \cdot a \cdot t$$

e é fácil verificar que

a

Se o solo não está saturado, a área disponível ao fluxo é: $A \cdot \theta$, onde θ é a umidade volumétrica definida anteriormente, e

θ

porém, por definição:

dt

Igualando-se os dois valores de V , tem-se:

$$\frac{q}{e} - \frac{dz}{dt} \quad \text{ou} \quad q dt = e dz$$

Integrando-se dos dois lados:

$$q \cdot J dt = J \theta dz$$

ou

$$q - i = \int_0^z f e(z) dz,$$

o que nos conduz à Equação 4.7.

APÊNDICE B

Memórias de cálculo do centro de gravidade do perfil do trítio

CENTRO DE GRAVIDADE DO PERFIL DO TRÍTIO (Zcg)
SUB-ÁREA 1
Amostragem: Abril/96

Intervalo (i)	Concentração (Ci)	Zmi	Si	Zmi . Si
cm	pCi.mL ⁻¹	cm	cm.pCi.mL ⁻¹ .	cm ² .pCi.mL ⁻¹
0-10	3.0	5	30	150
10-20	3.2	15	32	480
20-30	3.8	25	38	950
30-40	5.5	35	55	1925
40-50	10.2	45	102	4590
50-60	16.8	55	168	9240
60-70	28.0	65	280	18200
70-80	50.7	75	507	38025
80-90	78.6	85	786	66810
90 - 100	36.9	95	369	35055
100 - 110	19.3	105	193	20265
110- 120	9.4	115	94	10810
120 - 130	4.3	125	43	5375
130 - 140	2.5	135	25	3375
140 - 150	1.6	145	16	2320
150-160				
160 - 170				
170 - 180				
180 - 190				
190-200				

∑ Si = 2738

S Zmi. Si = 217570

Zcg = 79.5

Observações:

Zmi = profundidade do ponto médio do intervalo i.

Si = Ci.AZi (área no histograma do perfil do trítio); AZi espessura do intervalo i.

CENTRO DE GRAVIDADE DO PERFIL DO TRITIO (Zcg)

SUB-ÁREA 1

Amostragem: Agosto/96

Intervalo (i)	Concentração (Ci)	Zmi	Si	Zmi . Si	
	<u>pCi.mL"</u>		<u>cm.pCi.mL"</u>	<u>cm~.pCi.mL~</u>	
0- 10	2.5		25	125	
7580	1.9	15	19	285	
20 - 30	4.3	25	43	1075	
30-40	11.0	35	110	3850	
40-50	14.9	45	149	6705	
50-60	16.3	55	163	8965	
60-70	15.5	65	155	10075	
70-80	11.1	75	111	8325	
80-90	6.2	85	62	5270	
90 - 100	4.7	95	47	4465	
100-110	3.8	105	38	3990	2 Si = 946
110- 120	2.4	115	24	2760	S Zmi. Si = 55890
120 - 130					Zcg= 59.1
130- 140					
140- 150					
150-160					
160- 170					
170 - 180					
180- 190					
190 - 200					

Observações:

Zmi = profundidade do ponto médio do intervalo i.

Si = Ci.AZi (área no histograma do perfil do trítio); AZi espessura do intervalo i.

CENTRO DE GRAVIDADE DO PERFIL DO TRITIO (Zcg)

SUB-ÁREA 1

Amostragem: Dezembro/96

Intervalo (i)	Concentração (Ci)	Zmi	Si	Zmi . Si
cm	pCi.mL ⁻¹	cm	cm.pCi.mL ⁻¹	cm .pCi.mL ⁻¹
0 - 10	0,61	5	6.1	30.5
10 - 20	0.21	15	2.1	31.5
20 - 30	1.42	25	14.2	355.0
30 - 40	0.22	35	2.2	77.0
40 - 50	0.94	45	9.4	423.0
50 - 60	0.71	55	7.1	390.5
60 - 70	1.11	65	11.1	721.5
70 - 80	1.38	75	13.8	1035.0
80 - 90	2.06	85	20.6	1751.0
90 - 100	2.65	95	26.5	2517.5
100 - 110	3.48	105	34.8	3654.0
110 - 120	3.16	115	31.6	3634.0
120 - 130	5.52	125	55.2	6900.0
130 - 140	5.95	135	59.5	8032.5
140 - 150	6.43	145	64.3	9323.5
150 - 160	7.18	155	71.8	11129.0
160 - 170	6.96	165	69.6	11484.0
170 - 180	5.96	175	59.6	10430.0
180 - 190	3.72	185	37.2	6882.0
190 - 200	3.68	195	36.8	7176.0
200 - 210	2.74	205	27.4	5617.0
210 - 220	3.23	215	32.3	6944.5
220 - 230	3.36	225	33.6	7560.0
230 - 240	2.93	235	29.3	6885.5
240 - 250	2.04	245	20.4	4998.0
250 - 260	1.45	255	14.5	3697.5
260 - 270	1.05	265	10.5	2782.5
270 - 280	0.37	275	3.7	1017.5
280 - 290	0.22	285	2.2	627.0
290 - 300	0.31	295	3.1	914.5

$$E Si = 810.5$$

$$\sum Zmi.Si = 127021.5$$

$$Zcg = 156.7$$

Observações:

Zmi = profundidade do ponto médio do intervalo i.

Si = Ci.AZi (área no histograma do perfil do trítio); AZi espessura do intervalo i.

CENTRO DE GRAVIDADE DO PERFIL DO TRÍTIO (Zcg)**SUB-ÁREA 2****Amostragem: Abril/96**

Intervalo (i)	Concentração (Ci)	Zmi	Si	Zmi . Si
cm	pCi.mL ⁻¹	cm	cm.pCi.mL ⁻¹	cm ² .pCi.mL ⁻¹
0-10	4.6	5	46	230
10-20	4.8	15	48	720
20-30	5.3	25	53	1325
30-40	7.8	35	78	2730
40-50	16.3	45	163	7335
50 - 60	28.4	55	284	15620
60-70	52.2	65	522	33930
70-80	15.9	75	159	11925
80-90	10.3	85	103	8755
90 - 100	5.8	95	58	5510
100- 110	3.0	105	30	3150
110- 120	2.6	115	26	2990
120-130	1.8	125	18	2250
130 - 140				
140-150				
150-160				
160- 170				
170 - 180				
180 - 190				
190 - 200				

$$2 \text{ Si} = 1588$$

$$\Sigma Zmi.Si = 96470$$

$$Zcg = 60.7$$

Observações:

Zmi = profundidade do ponto médio do intervalo i.

Si = Ci.AZi (área no histograma do perfil do trítio); AZi espessura do intervalo i.

CENTRO DE GRAVIDADE DO PERFIL DO TRÍTIO (Z_{cg})

SUB-ÁREA 2

Amostragem: Agosto/96

Intervalo (i)	Concentração (Ci)	/mi	Si	Zmi . Si
cm	pCi.mL ^{'''}	cm	cm.pCi.mL ^{'''}	cm ² .pCi.mL ^{'''}
0-10	6.7	5	67	335
7580	10.5	15	105	1575
20-30	22.6	25	226	5650
30-40	27.8	35	278	9730
40-50	10.7	45	107	4815
50-60	5.9	55	59	3245
60-70	3.5	65	35	2275
70-80	2.6	75	26	1950
80-90	1.7	85	17	1445
90- 100				
100- 110				
110 - 120				
120 - 130				
130- 140				
140- 150				
150-160				
160 - 170				
170 - 180				
180- 190				
190 - 200				

$$E \text{ Si} = 920$$

$$S \text{ Zmi. Si} = 31020$$

$$Z_{cg} = 33.7$$

Observações:

Zmi = profundidade do ponto médio do intervalo i.

Si = Ci.AZi (área no histograma do perfil do trítio); AZi espessura do intervalo i

CENTRO DE GRAVIDADE DO PERFIL DO TRÍTIO (Zcg)**SUB-ÁREA 2**

Amostragem: Dezembro/96

Intervalo (i)	Concentração (Ci)	Zmi	Si	Zmi. Si
cm	pCi.mL ⁻¹	cm	cm.pCi.mL ⁻¹	cm ² .pCi.mL ⁻¹
0 - 10	7.38	5	73.8	369.0
10 - 20	5.18	15	51.8	777.0
20 - 30	6.47	25	64.7	1617.5
30 - 40	9.16	35	91.6	3206.0
40 - 50	9.23	45	92.3	4153.5
50 - 60	7.75	55	77.5	4262.5
60 - 70	6.05	65	60.5	3932.5
70 - 80	3.27	75	32.7	2452.5
80 - 90	1.87	85	18.7	1589.5
90 - 100	0.86	95	8.6	817.0
100 - 110	0.52	105	5.2	546.0
110 - 120	0.36	115	3.6	414.0
120 - 130	0.23	125	2.3	287.5
130 - 140	0.15	135	1.5	202.5
140 - 150	0.12	145	1.2	174.0
150 - 160	0.03	155	0.3	46.5
160 - 170	0.01	165	0.1	16.5
170 - 180	0.00	175	0.0	0.0
180 - 190				
190 - 200				
200 - 210				
210 - 220				
220 - 230				
230 - 240				
240 - 250				
250 - 260				
260 - 270				
270 - 280				
280 - 290				
290 - 300				

$$2 \text{ Si} = 586.4$$

$$2 \text{ Zmi. Si} = 24,864$$

$$\text{Zcg} = 42.4$$

Observações:

Zmi = profundidade do ponto médio do intervalo i.

Si = Ci.ΔZi (área no histograma do perfil do trítio); ΔZi espessura do intervalo i.

APÊNDICE C

- . *Fatores de correção de evapotranspiração - Balanço*

Fatores de correção da evapotranspiração potencial mensal, dada pelo nomograma de Thornthwaite para ajustá-la ao número de dias do mês e a duração do brilho solar diário, nos vários meses do ano e latitudes entre 15 graus norte e 37 graus sul.

Lai.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set	Out.	Nov.	Dez.
15°N.,	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
1 M L	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.05	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
5°N.,	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
Eq -	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5°S.,	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10°S..	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15°S..	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20°S..	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
22°S..	1.14	1.00	1.05	0.97	0.95	0.90	0.94	0.99	1.00	1.09	1.10	1.16
23°S..	1.15	1.00	1.05	0.97	0.95	0.89	0.94	0.98	1.00	1.09	1.10	1.17
24°S..	1.16	1.01	1.05	0.96	0.94	0.89	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.17
25°S.,	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
26°S..	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.87	0.92	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
27°S.	1.18	1.02	1.05	0.96	0.93	0.87	0.92	0.97	1.00	1.11	1.12	1.19
28°S..	1.19	1.02	1.06	0.95	0.93	0.86	0.91	0.97	1.00	1.11	1.13	1.20
29°S	1.19	1.03	1.06	0.95	0.92	0.86	0.90	0.96	1.00	1.12	1.13	1.20
30°S..	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
31°S..	1.20	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.89	0.96	1.00	1.12	1.14	1.22
32°S..	1.21	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.89	0.95	1.00	1.12	1.15	1.23
33°S..	1.22	1.04	1.06	0.94	0.90	0.83	0.88	0.95	1.00	1.13	1.16	1.23
34°S..	1.22	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.16	1.24
35°S..	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
36°S	1.24	1.04	1.06	0.94	0.88	0.81	0.86	0.94	1.00	1.13	1.17	1.26
37°S..	1.25	1.05	1.06	0.94	0.88	0.80	0.86	0.93	1.00	1.14	1.18	1.27

APÊNDICE D

Custos envolvidos nos experimentos

A fim de dar uma idéia a respeito dos custos envolvidos nos experimentos, foram levantados:

- **água tritiada:** o custo da água tritiada varia de acordo com a atividade, sendo de R\$200,00 por cada lmCi, (POLI - 1989);
- **linha completa de destilação a vácuo:** o preço da linha completa para destilação simultânea de 5 amostras de solo ficou em R\$1.650,00;
- **análise de trítio:** para clientes externos, o custo unitário da análise no CDTN é de R\$13,80;
- **trado motorizado completo:** R\$4.500,00, com amostradores de 6" e 4";
- **nitrogênio líquido:** o consumo de nitrogênio líquido durante a etapa de destilação foi de 0,6 litros /amostra. Segundo informações da White Martins S.A., o preço é de R\$0,69/m³, e que cada m³ contém 1.547 litros de nitrogênio;

Os custos dos dados hidrometeorológicos necessários à estimativa do cálculo de recarga pelo método do balanço hídrico, envolvendo informações sobre os parâmetros de temperatura do ar, precipitação e evaporação total, para um período de 12 meses, é da ordem de R\$90,00 (noventa reais), junto ao 5° Distrito de Meteorologia.