

AVALIAÇÃO RADIOSSANITÁRIA DO MEIO AQUÁTICO SOB INFLUÊNCIA DO IPEN/CNEN-SP

Vanusa F. Jacomino, Marcelo F. Maduar, Sandra A. Bellintani e Barbara P. Mazzilli

IPEN/CNEN-SP
Caixa Postal 11.049 - Pinheiros
05422-970 - São Paulo, SP - Brasil
e-mail: vmjacomi@nct.ipen.br

RESUMO

A fim de controlar a descarga de efluentes radioativos líquidos para o meio aquático sob influência das instalações do IPEN-CNEN/SP, um programa de monitoração de efluentes de caráter preventivo é realizado em escala rotineira. Todos os efluentes líquidos autorizados para descarga são liberados para o rio Pinheiros em dois pontos distintos de descarga, separados por uma distância de 2 km. Neste trabalho são apresentados os dados de termo-fonte relativos ao período de 1985 a 1994, bem como os resultados da dose equivalente efetiva nos indivíduos do público levando-se em conta as principais vias de exposição do homem à radiação. Estes resultados demonstram que a atividade total liberada dos efluentes líquidos descarregados no sistema aquático sob influência do IPEN-CNEN-SP representa uma fração não significativa da sua capacidade receptora. As doses estimadas durante todo o período de análise mostraram-se muito inferiores ao limite primário para o indivíduo do público estabelecido nas normas de proteção radiológica.

INTRODUÇÃO

Os rios e estuários constituem uma parte fundamental nos processos de dispersão dos efluentes gerados por diferentes atividades humanas. Conseqüentemente, pode ser de grande importância conhecer com antecipação que tipos e magnitudes de danos podem ocorrer em determinados locais em função do despejo das cargas poluidoras nestes ambientes aquáticos. Tais descargas podem ocorrer de forma controlada ou descontrolada. Em qualquer um dos casos é extremamente importante que seja feita uma previsão de zonas críticas, dentro das quais medidas mitigadoras poderão ser tomadas no sentido de melhorar a qualidade da água, ou mesmo coibir o seu uso⁽⁴⁾.

Projetos de estações de tratamento de esgotos, determinação da influência de obras hidráulicas na qualidade do meio aquático, vazamentos acidentais de resíduos radioativos, a previsão de alterações aquáticas causadas pelo uso do solo da bacia hidrográfica contribuinte, e muitos outros exemplos, podem ser analisados por meio de uso de modelos matemáticos que

descrevem o transporte de poluentes em sistemas fluviais. Tais modelos podem propiciar uma avaliação abrangente dos impactos ambientais gerados por diferentes tipos de atividades humanas.

Os efluentes líquidos radioativos gerados pelas instalações do IPEN/CNEN-SP são, após monitoração e comparação com os limites autorizados de descarga⁽¹⁾, liberados no canal do rio Pinheiros através da rede de esgoto sanitário. No meio aquático, os radionuclídeos passam por processos de mistura na água e posterior concentração nos compartimentos bióticos e abióticos do meio, tornando-se uma fonte potencial de exposição do homem à radiação. Neste caso, a avaliação da dose nos indivíduos do público é obtida relacionando-se a atividade liberada com a concentração resultante no meio. Para isso, são utilizados modelos matemáticos que descrevam o transporte e transferência dos radionuclídeos para outros compartimentos do ecossistema.

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar as doses equivalentes efetivas resultantes da descarga de efluentes líquidos liberados pelas instalações

do IPEN/CNEN-SP, tendo-se como base o termo-fonte relativo ao período de 1985 a 1994. O modelo matemático utilizado para a simulação do transporte de poluentes no canal Pinheiros e conseqüente estimativa das doses naqueles grupos populacionais considerados críticos foi proposto por Fischer e cols.⁽⁵⁾ e adaptado por Della Rocca⁽³⁾ para aplicação no sistema Tietê-Pinheiros.

O IPEN E O MEIO AQUÁTICO SOB SUA INFLUÊNCIA

O IPEN/CNEN-SP é um centro de formação e de desenvolvimento científico e tecnológico nos vários campos da energia nuclear, ocupando uma área de 524.000 m² no "campus" da Universidade de São Paulo. As principais instalações do IPEN/CNEN-SP que geram efluentes líquidos são:

- Departamento do Ciclo do Combustível, onde são realizadas pesquisas nas diferentes etapas do ciclo do combustível, tais como purificação, conversão, enriquecimento de urânio e confecção de elementos combustíveis.
- Departamento de Reatores, sendo a principal instalação desta área o reator IEA-R1, o qual é destinado à produção de radioisótopos para emprego nos campos mais diversos, incluindo a medicina, a engenharia, a indústria e a pesquisa fundamental e aplicada.
- Departamento de Aplicações de Técnicas Nucleares, destinado à produção de substâncias marcadas, geradores de ^{99m}Tc e radioisótopos primários para uso na medicina.
- Departamento de Proteção Radiológica, o qual inclui as áreas de Engenharia de Radioproteção, Monitoração Ambiental, Calibração e Dosimetria e Tratamento de Rejeitos Radioativos.

Todo o efluente líquido radioativo autorizado para liberação alcança o canal Pinheiros. As liberações são feitas através dos dois sistemas da rede de esgoto do Instituto e entram no canal em dois pontos separados, sendo a distância aproximada entre ambos de 2 km. Os efluentes gerados pelas instalações do Departamento do Ciclo do Combustível são descarregados no córrego do Jaguaré e daí para o canal Pinheiros. Os efluentes provenientes das demais instalações são liberados na rede de esgoto da Cidade Universitária, passando pela Estação de Tratamento de Águas e Esgoto da SABESP, que recebe uma parte significativa dos esgotos da zona sul da cidade de São Paulo. Nesta estação é feita a separação do material sólido, tal como lama sedimentada, areia e plásticos, sendo a parte líquida liberada diretamente no canal Pinheiros.

No canal Pinheiros, os radionuclídeos se distribuem entre o meio líquido e o sedimento em suspensão e de fundo, sendo transportados em direção ao rio Tietê ou à represa Billings⁽³⁾.

No presente trabalho, considerou-se apenas que o regime de escoamento se dá no sentido Billings-Tietê. Esta hipótese conservativa foi baseada no fato que de acordo

com o artigo 46 das disposições transitórias estabelecidas através da Resolução Conjunta SMA-SES Nº 03/92 de 04/09/92, a partir de 05 de outubro de 1992 ficou suspenso por tempo indeterminado o bombeamento das águas do rio Pinheiros para a represa Billings⁽²⁾.

De acordo com o artigo 2 desta Resolução, a retomada do bombeamento só poderá ocorrer em condições especiais, principalmente durante os períodos de grandes enchentes, os quais acontecem durante os meses de janeiro e fevereiro. Neste caso, a vazão média de escoamento é de 70 m³.s⁻¹, enquanto para o escoamento no sentido Billings-Tietê a vazão média é de 10 m³.s⁻¹, implicando portanto numa menor diluição dos poluentes no sistema fluvial em estudo.

MODELO DE TRANSPORTE

O modelo de transporte utilizado para a simulação do transporte de radionuclídeos no canal Pinheiros foi proposto por Fischer e cols.⁽⁵⁾.

De acordo com Fischer, se o efluente descarregado possui densidade igual à da água do meio receptor, o poluente espalha-se mais rapidamente de forma tridimensional na região próxima ao ponto de descarga. Nesta etapa, a mistura é caracterizada por um alto nível de turbulência e é controlada por parâmetros relacionados às características do efluente, tais como densidade, solubilidade e composição química; características do próprio meio receptor, tais como profundidade e fluxo; e também pela estrutura da descarga, em termos da configuração e localização da saída no corpo d'água.

À medida que o poluente se desloca para jusante e se distribui espacialmente, o fenômeno de transporte tende a se tornar bidimensional, ocorrendo uma uniformização da concentração ao longo da direção vertical ao escoamento. Neste ponto, inicia-se a segunda fase de mistura do poluente, na qual a descarga não influencia mais o transporte e este se dá segundo os processos difusivos e advectivos. Simultaneamente à dispersão no meio líquido, os radionuclídeos estão sujeitos a processos físicos, químicos e biológicos, que promovem a sua transferência para outros compartimentos bióticos e abióticos do sistema aquático, como material sólido em suspensão e elementos da fauna e flora aquática⁽³⁾.

Bem mais a jusante o poluente tende a se distribuir de forma aproximadamente uniforme ao longo das seções transversais ao escoamento, sendo razoável considerar o mecanismo de transporte como unidimensional, uma vez que nesta etapa, a distribuição espacial e temporal da nuvem de poluente apresenta uma correlação desprezível com as condições iniciais do ponto de descarga⁽⁴⁾.

O modelo matemático adotado para a simulação dos radionuclídeos no canal Pinheiros baseia-se na resolução analítica do modelo de transporte proposto por Fischer e cols.⁽⁵⁾, adotadas certas hipóteses simplificadoras

de modo a se obter uma equação de transporte bidimensional válida para escoamentos unidimensionais. Estas hipóteses são:

- O poluente se distribui muito mais rapidamente na direção vertical de escoamento do que ao longo da direção transversal. Desta forma, é razoável supor que o poluente mistura-se instantaneamente na direção vertical, e o transporte pode ser tratado de forma bidimensional. Esta aproximação é bastante razoável para rios e canais, onde a largura é geralmente maior que a profundidade.
- A descarga de efluentes pelo IPEN, para fins de avaliação radio sanitária, é considerada contínua.
- O fenômeno de difusão molecular é desprezível quando comparado ao de difusão turbulento.
- Os efeitos de margens e do leito na distribuição das velocidades internas do fluido podem ser desprezados.

Desta forma, o escoamento turbulento se dá em regime permanente, ou seja, as velocidades nas direções transversal e vertical são consideradas desprezíveis com relação à velocidade longitudinal, portanto o escoamento é considerado unidimensional.

Logo, tem-se que a equação bidimensional de transporte de um poluente não conservativo num escoamento unidimensional⁽⁵⁾, levando-se em conta a geração e extinção de poluentes durante o processo de transporte é dada por:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \bar{\varepsilon}_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + S \quad (1)$$

onde o segundo termo da equação representa o efeito de advecção decorrente da velocidade média do escoamento, o terceiro termo, o efeito de difusão turbulenta representada pelos fluxos de flutuações turbulentas. O termo S engloba a geração e extinção do poluente do meio. No caso de um radionuclídeo, ele pode a qualquer momento sofrer decaimento espontâneo ou interagir com constituintes abióticos e bióticos do meio, resultando destas processos uma redução da concentração no meio fluido.

Fischer e cols.⁽⁵⁾ apresentaram a solução deste problema, utilizando para isso o método das imagens⁽⁴⁾. Assumindo-se que o lançamento dos efluentes se dá na origem do sistema de coordenadas ($x_0=0$ e $y_0=0$), tem-se em forma adimensional:

$$\bar{C}_i = \frac{2 \dot{M}_i}{\bar{u} h T} \frac{\exp\left(\frac{-\lambda_i x}{\bar{u}(1 + K d_i S_s)}\right)}{\sqrt{\frac{4 \pi x \bar{\varepsilon}_y}{\bar{u} T^2 (1 + K d_i S_s)}}} \quad (2)$$

sendo:

- \bar{C}_i o valor médio da concentração do radionuclídeo *i* na água num intervalo de tempo Δt ($Bq.m^{-3}$);
- \dot{M}_i a taxa de descarga ($Bq.s^{-1}$);
- \bar{u} a velocidade média de escoamento na direção longitudinal ($0,03 m/s$)⁽³⁾;
- $\bar{\varepsilon}_y$ o coeficiente de difusão turbulenta transversal médio ($5,22 \times 10^{-3} m^2/s$)⁽³⁾;
- x a coordenada na direção de escoamento;
- $K d_i$ o coeficiente de distribuição entre as concentrações do radionuclídeo *i* nos meios sólido e líquido em condições de equilíbrio ($L.kg^{-1}$)⁽⁸⁾;
- S_s a concentração de sedimento em suspensão na água ($0,4 g/L$)⁽³⁾.

Definida a concentração dos radionuclídeos na água, a atividade adsorvida no material sedimentar pode ser definida a partir de uma concentração inicial na água, considerando-se que no equilíbrio estas grandezas estão relacionadas por meio do coeficiente de distribuição $K d_i$, definido como⁽⁶⁾:

$$K d_i = \frac{\bar{C}_{s,i}}{\bar{C}_i} \quad (3)$$

sendo:

- $\bar{C}_{s,i}$ a concentração do radionuclídeo *i* no sedimento (Bq/kg de sedimento seco);
- \bar{C}_i a concentração do radionuclídeo *i* na água (Bq/L).

ESTIMATIVA DA DOSE EQUIVALENTE EFETIVA NOS INDIVÍDUOS DO PÚBLICO

As doses equivalentes efetivas nos grupos críticos foram calculadas por meio de modelos dosimétricos que relacionam o valor da concentração no compartimento ambiental com a dose resultante no homem.

Como mencionado anteriormente, no presente estudo foi adotado que o escoamento do canal Pinheiros se dá no sentido Billings-Tietê. A péssima qualidade da água do canal Pinheiros impossibilita o seu uso para consumo humano e também a existência de vida aquática; por outro lado, a dragagem do sedimento de fundo destes rios e a sua posterior disposição nas margens permite o contato humano com o material sedimentar. Estas características particulares fazem do sedimento o compartimento ambiental mais importante⁽³⁾.

O canal Pinheiros é caracterizado por uma baixa capacidade de transporte; sendo assim, a maior parte do material em suspensão deposita-se neste corpo de água. Por este motivo, o material dragado do seu leito é, em termos radiológicos, mais importante do que aquele retirado do rio Tietê.

Portanto, os principais caminhos críticos de exposição do homem à radiação decorrente da liberação dos radionuclídeos liberados pelo IPEN/CNEN-SP são:

- Exposição externa ao sedimento dragado do leito do canal Pinheiros e depositado nos botaforas existentes ao longo de suas margens;
- Exposição externa ao material sedimentar das margens do canal Pinheiros;
- Exposição interna decorrente da inalação de particulados ressuspensos.

O grupo crítico é constituído por trabalhadores adultos que retiram o sedimento do leito do rio para colocá-lo em botaforas existentes ao longo do canal, para posterior disposição em aterros definitivos. O grupo exposto ao sedimento das margens do rio Pinheiros é constituído por funcionários da ELETROPAULO, que por conta de suas obrigações profissionais permanecem junto às margens do canal.

Para a estimativa da concentração dos radionuclídeos na água, considerou-se que para todo o efluente gerado pelo Departamento do Ciclo Combustível, onde são manuseados principalmente compostos contendo U e Th e seus descendentes, a descarga se dá junto à margem esquerda do canal, no ponto em que o córrego do Jaguaré desemboca no canal Pinheiros. A extensão total de 4000 m, desde o ponto de descarga até a confluência com o rio Tietê foi dividida em seções de 1000 m cada. Neste caso, a dose equivalente efetiva foi estimada levando-se em conta todos os caminhos críticos de exposição.

Para os efluentes provenientes das outras instalações, foi assumido que o ponto de descarga se dá na margem direita do canal, junto à estação de Tratamento de Esgotos da SABESP, o qual se encontra a uma distância de 6000 m da confluência com o rio Tietê. Neste caso, a estimativa da dose foi feita levando-se em conta apenas aqueles caminhos críticos que levam à exposição externa do homem ao sedimento contaminado, já que todos os radionuclídeos liberados nesta condição são emissores γ .

A concentração dos radionuclídeos no sedimento foi estimada levando-se em conta a concentração média de cada radionuclídeo de interesse na água ao longo do trecho em estudo. Este procedimento foi adotado levando-se em conta que os trabalhadores que executam o serviço de dragagem do sedimento e posterior deposição nos botaforas podem permanecer em qualquer ponto, não existindo portanto uma posição preferencial ao longo da extensão de 6000 m.

A dose equivalente efetiva anual H_E foi calculada de acordo com as equações descritas abaixo^(3,6):

- **Exposição externa ao sedimento depositado em botaforas no canal do rio Pinheiros:**

$$H_E = \sum_i \bar{C}_{s,i} I_S FCD_i w_s p \quad (4)$$

sendo:

H_E dose equivalente efetiva anual (Sv. ano⁻¹);

$\bar{C}_{s,i}$ a concentração do radionuclídeo i no sedimento dragado do rio Pinheiros (Bq.kg⁻¹);

FCD_i o fator de conversão de dose externa para o radionuclídeo i (Sv.h⁻¹ por Bq.m⁻³)⁽⁷⁾;

w_s o fator de modificação para a geometria da fonte para atividades no botafora (adimensional) (1,0)

I_S a taxa de ocupação por atividade no botafora (500 h/ano);

p densidade superficial efetiva do sedimento (40 kg/m²)

- **Exposição externa ao sedimento nas margens do canal do rio Pinheiros:**

$$H_E = \sum_i \bar{C}_{s,i} \rho 0,025 I_M FCD_i w_m \quad (5)$$

sendo:

ρ a densidade do material sedimentar (1600 kg/m³)

0,025 corresponde à espessura em metros da camada de sedimento considerada para o cálculo da contaminação superficial;

w_m o fator de geometria da fonte para atividades na margem do canal (adimensional) (0,2);

I_M a taxa de ocupação para atividades nas margens do rio (2000 h/ano).

- **Exposição interna decorrente da inalação de particulados ressuspensos**

$$H_E = \sum_i C_{a,i} I_{r,ex} F_{ex} FCD_{in,i} \quad (6)$$

$$C_{a,i} = M \bar{C}_{s,i} \quad (7)$$

sendo:

$C_{a,i}$ a concentração do radionuclídeo i no ar (Bq.m⁻³);

M a massa de particulado ressuspensado por m³ de ar (kg.m⁻³);

$I_{r,ex}$ a taxa de respiração do indivíduo adulto (2,4.10³ m³/ano);

F_{ex} o fator de ocupação (adimensional) (0,11);

$FCD_{in,i}$ o fator de conversão de dose por inalação para o radionuclídeo i (Sv.Bq⁻¹)⁽⁶⁾.

RESULTADOS

Na Figura 1 são apresentados os resultados da atividade total liberada por ano pelas instalações do IPEN/CNEN-SP no período de 1985 a 1994. Na Figura 2 são mostrados os resultados finais da dose equivalente efetiva para cada um dos caminhos críticos considerados no presente trabalho durante o período em estudo. Neste caso, não são apresentados os resultados da dose equivalente efetiva decorrente da inalação do material em suspensão porque a sua contribuição para a dose total é menor do que 0,0001%. Na Figura 3 é mostrada a contribuição relativa de cada radionuclídeo para a dose

equivalente efetiva total, levando-se em conta todo o período de análise dos dados (1985-1994).

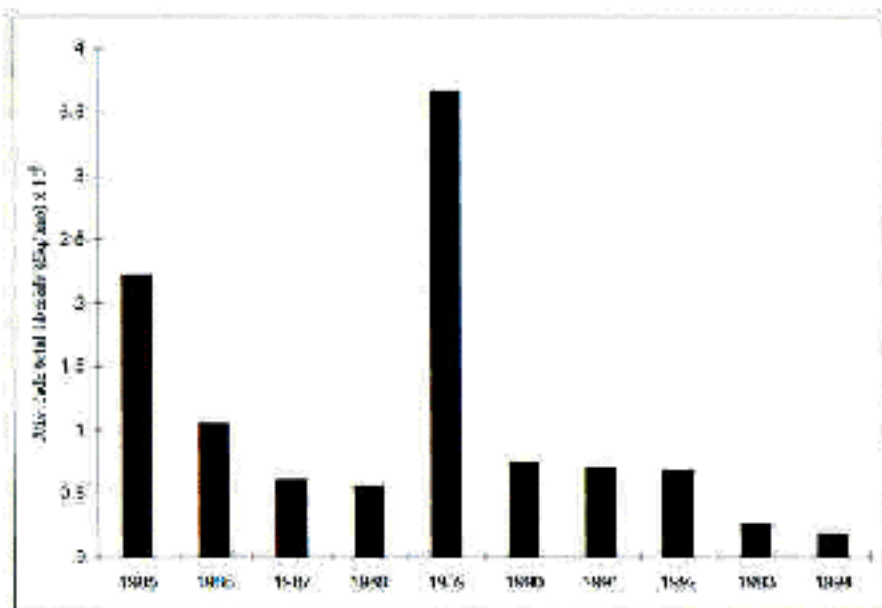


Figura 1. Atividade total liberada pelas instalações do IPEN/CNEN-SP no período de 1985 a 1994.

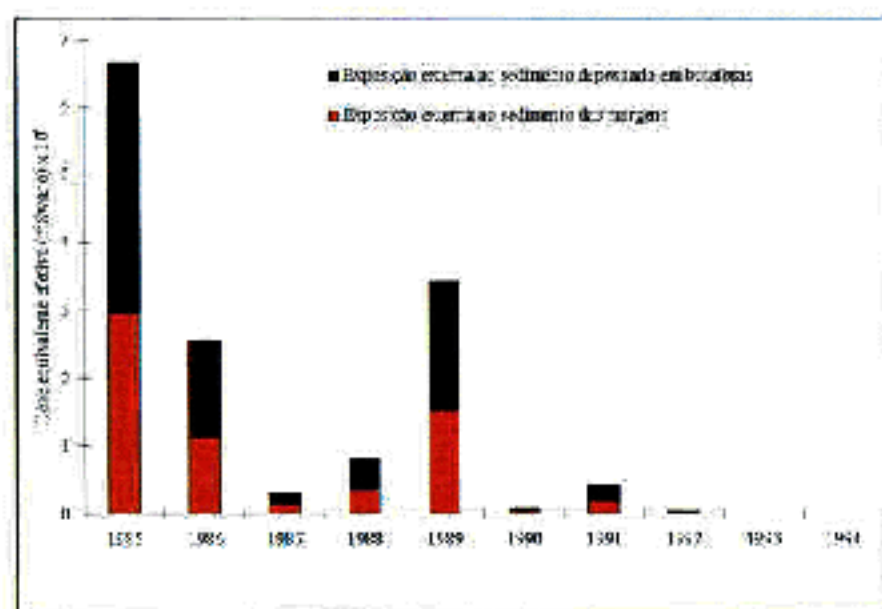


Figura 2. Contribuição relativa dos caminhos críticos de maior relevância para o resultado da dose equivalente efetiva total.

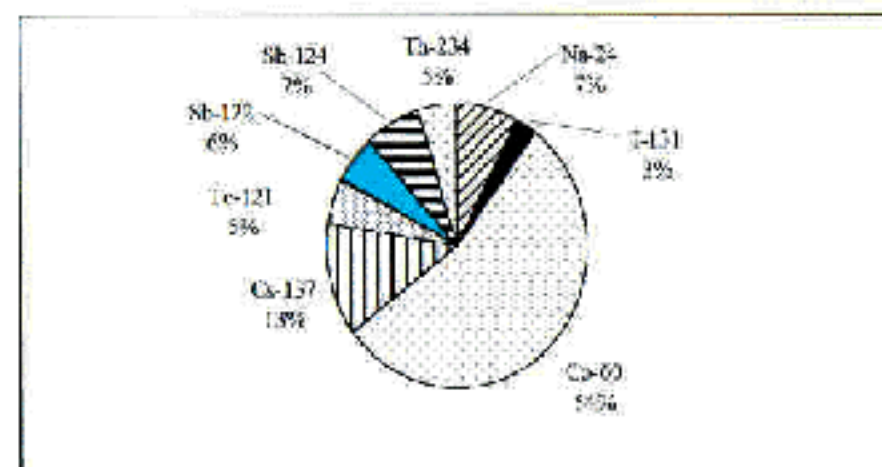


Figura 3. Contribuição relativa de cada radionuclídeo para a dose equivalente efetiva durante todo o período de estudo.

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Como resultado das atividades desenvolvidas pelo IPEN-CNEN/SP um grande número de radionuclídeos é liberado no sistema aquático sob sua influência. Os estudos realizados no presente trabalho mostraram que o ^{60}Co e o ^{137}Cs contribuem com cerca de 70% para o resultado final da dose equivalente efetiva total. O trabalho com sedimento contaminado é a principal via de exposição do homem à radiação, sendo os caminhos críticos mais relevantes a exposição externa decorrente ao sedimento depositado em botaforas existentes ao longo do rio Pinheiros e a exposição externa ao sedimento nas margens do canal. Como pode ser observado na Figura 2, ambos contribuem com a mesma fração para a dose equivalente efetiva total.

Durante todo o período analisado (1985-1994), os resultados finais da dose mostraram-se abaixo de 1/10 do limite de dose estabelecido pelas normas de proteção radiológica⁽³⁾, o qual é de 1 mSv/ano. O ano de 1985 foi o que apresentou um resultado de dose maior, apesar da atividade total liberada neste ano ser menor que a de 1989. Isto se deve ao fato de que a quantidade de ^{60}Co e ^{137}Cs liberada em 1985 ser bem maior do que a dos demais anos.

Os resultados apresentados no presente trabalho mostram que a atividade total liberada, bem como a dose equivalente efetiva recebida pelos indivíduos do público vêm decrescendo de forma significativa. Isto, provavelmente, poderia ser explicado pelo fato de que algumas instalações do IPEN-CNEN/SP vêm reduzindo a sua escala de produção em decorrência da conjuntura econômica adversa existente no País nestes últimos anos. Entretanto, este fato deverá ser objeto de estudos posteriores.

O processo de modelagem de sistemas ambientais envolve diversas etapas incluindo, a seleção de um modelo matemático que descreva de forma adequada os fenômenos físicos que ocorrem na natureza, formalização, verificação e calibração deste modelo e análise de incertezas. Esta última é uma parte extremamente importante, já que através dela é possível avaliar os erros associados às previsões feitas pelo modelo. A próxima etapa deste trabalho constitui-se portanto, na análise de incerteza decorrente da variabilidade natural dos parâmetros utilizados para descrever os mecanismos de transporte de poluentes em sistemas fluviais, bem como aqueles usados para a avaliação da dose. Esta análise será feita pelo Método de Monte Carlo por meio da técnica de amostragem "Latin Hypercube"⁽⁴⁾.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Diretrizes Básicas de Radioproteção. 1988. (CNEN-NE-3.01-88).

[2] COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Efeitos das regras operacionais no Tietê Alto - Zona Metropolitana, no Tietê Médio - Superior e no reservatórios Billings.** São Paulo, set. 1994. (Informe nº 8, de 08/09/94).

[3] DELLA ROCCA, F. **Estimativa da dose nos indivíduos do público decorrente da liberação de efluente líquido pelo IPEN.** Dissertação de Mestrado, São Paulo, 1995.

[4] EIGER, S., Qualidade da água em rios e estuários. In: PORTO, R.L., org. **Hidrologia Ambiental.** São Paulo, S.P., Edusp, 1991. p. 69-163.

[5] FISCHER, H. B.; LIST, E.J.; KOH, R.C.Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N.H. **Mixing in inland and coastal waters.** New York, N. Y., Academic, 1979.

[6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases: exposures of critical groups.** Aug., 1982. (IAEA-SS-57).

[7] JACOB, P.; PARETZKE, H.G.; ROSENBAUM, H.; ZANKI, M. Organ doses from radionuclides on the ground. Part I. Simple time dependences. **Health Physics**, 54(6): 617-33. 1988.

[8] SHEPPARD, M.I. & THIBAUT, D.H. Default soil/liquid partition coefficients, K_{ds} , for major soil types: a compendium. **Health Physics**, 59(4): 471-82, 1990.

[9] STEIN, M. Large sample properties of simulations using Latin Hypercube Sampling. **Technometrics**, 29(2): 143-151, 1987.

ABSTRACT

In order to control the discharge of radioactive materials into the aquatic system surrounding IPEN-CNEN/SP, an effluent monitoring program has been carried out on a routine basis. All the liquid effluent generated by the IPEN facilities are released into the Pinheiros river at two different discharge points located 2 km apart. In the present paper the source term measured during the period 1985 to 1994 is presented, as well as the effective equivalent dose received by public individuals for each critical pathway. These results showed that the total activity released into the Pinheiros river is just a small fraction of the receiving capacity of the environment. The estimated annual doses during the period of study were always below 1/10 of the primary limit for the public individual as established by the International Commission of Radiological Protection, which is 1 mSv/year.