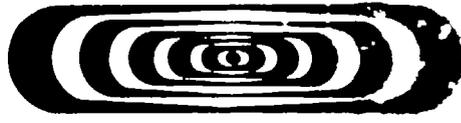


131642 29 166

ISSN 0101-3004



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

GOVERNO DO BRASIL

**MONITORAÇÃO AMBIENTAL NAS IMEDIAÇÕES DE INSTALAÇÕES
NUCLEARES**

Vanusa Maria Feliciano JACOMINO e Marcelo Francis MADUAR

IPEN-Pub-363

FEVEREIRO/1992

SÃO PAULO

MONITORAÇÃO AMBIENTAL NAS IMEDIAÇÕES DE INSTALAÇÕES NUCLEARES

Vanusa Maria Feliciano JACOMINO e Marcelo Francis MADUAR

DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

**CNEN/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO - BRASIL**

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

C52.00

RADIATION SOURCES
NUCLEAR POWER PLANTS
ENVIRONMENT
RADIATION PROTECTION
RADIATION MONITORING
RADIOACTIVE EFFLUENTS
RADIOECOLOGICAL CONCENTRATION
PUBLIC HEALTH
BRAZILIAN CNEN

IPEN - Doc - 4216

Aprovado para publicação em 02/12/91

Nota: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do(s) autor(es).

"...Deveis ensinar a vossos filhos que o chão onde pisam simboliza as cinzas de nossos ancestrais. Para que eles respeitem a terra, ensinai a eles que ela é rica, pela vida dos seres de todas as espécies. Ensinai a eles o que ensinamos aos nossos: que a terra é a nossa mãe. Quando o homem cospe sobre a terra, está cuspiendo sobre si mesmo.

De uma coisa temos certeza: a terra não pertence ao homem branco; o homem branco é que pertence à terra. Disso temos certeza. Todas as coisas estão relacionadas como o sangue que une uma família. Tudo está associado. Tudo que fere a terra, fere também os filhos da terra. O homem não tece a teia da vida, é antes um de seus fios. O que quer que faça a esta teia, faz a si próprio.

...Onde está o matagal? Desapareceu. Onde está a águia? Desapareceu.

O fim do viver e o início do sobreviver."

(Tradução de trecho do texto considerado autêntico da carta do chefe Seattle, que em 1855 respondeu à proposta dos Estados Unidos de comprar a terra dos índios. O texto foi enviado pelo UNEP - Programa das Nações Unidas para o Meio-Ambiente)

MONITORAÇÃO AMBIENTAL NAS IMEDIAÇÕES DE INSTALAÇÕES NUCLEARES

Vanusa Maria Feliciano JACOMINO e Marcelo Francis MADUAR

**Comissão Nacional de Energia Nuclear - SP
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - Brasil**

Resumo

O objetivo principal desta apostila é descrever os princípios básicos para a elaboração e execução de um programa de monitoração ambiental nas imediações de uma instalação nuclear em condições normais de operação. Pretende-se que a mesma contribua para a formação de técnicos de nível médio e de nível superior que atuem na área da energia nuclear.

De forma a ilustrar a aplicação desses princípios é apresentado o Programa Rotineiro de Monitoração Ambiental do IPEN-CNEN/SP.

ENVIRONMENTAL MONITORING IN THE VICINITY OF NUCLEAR FACILITIES

Vanusa Maria Feliciano JACOMINO and Marcelo Francis MADJAR

**Comissão Nacional de Energia Nuclear - SP
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - Brasil**

Abstract

The purpose of this manual is to provide guidance for setting up programmes of environmental monitoring in the vicinity of establishments in a normal condition of operation. It intends to contribute for training of Technicians working in the nuclear field.

In order to illustrate the application of the basic principles described in this manual, the routine environmental monitoring programme carried out in the IPEN-CNEN/SP is presented.

4/5/6/7/8

Somário

1. Introdução	9
2. Fontes naturais	11
2.1. Radiação cósmica	11
2.2. Radiação terrestre	12
2.2.1. Irradiação externa	12
2.2.2. Irradiação interna	13
2.2.3. Radônio	13
2.3. Outras fontes	15
3. Fontes artificiais	21
3.1. Fontes médicas	21
3.2. Explosões nucleares ("fall-out")	22
3.3. Ciclo do combustível	23
3.4. Outras fontes	24
4. Comportamento dos radionuclídeos no ecossistema	28
5. Limites de dose para indivíduos do público	31
6. Definição de um programa de análise ambiental	32
6.1. Programa de monitoração ambiental pré-operacional	32
6.2. Programa de monitoração ambiental operacional	33
ANEXO 1. Programa de Monitoração Ambiental do IPEN-CNEN/SP	37
Agradecimentos	42
Referências bibliográficas	43

Monitoração Ambiental nas Imediações de Instalações Nucleares

1. Introdução

O homem e o seu meio ambiente sempre estiveram sujeitos à radiação ionizante, sendo continuamente expostos à radiação proveniente do espaço (radiação cósmica), dos radionuclídeos presentes no solo (radiação terrestre ou radionuclídeos primordiais) ou em alimentos, água e ar por ele consumidos. Os radionuclídeos das séries naturais, juntamente com o ^{40}K , são os principais contribuintes à radioatividade natural, contribuindo ainda os radionuclídeos produzidos em decorrência da interação dos raios cósmicos com os átomos e moléculas que constituem a atmosfera terrestre, tais como o ^7Be e o ^{14}C (10).

A liberação de materiais radioativos decorrente de atividades humanas, como por exemplo aquelas envolvidas em uma instalação nuclear, irá contribuir com um acréscimo na dose de radiação provocada pelas fontes naturais, podendo eventualmente atingir valores considerados significativos (8).

O projeto de uma instalação nuclear deverá garantir que, em condições normais de operação, a descarga de materiais radioativos para o meio ambiente não resulte em doses nos indivíduos do público acima dos limites máximos admissíveis (1, 3, 9).

Cabe à Proteção Radiológica da instalação estabelecer um programa de análise ambiental visando controlar a descarga de efluentes radioativos para o meio-ambiente, bem como verificar se as concentrações dos radionuclídeos que eventualmente possuem se concentram nos diferentes compartimentos do ecossistema, tais como o solo, vegetação, alimentos etc. estão abaixo de limites pré-estabelecidos (7).

Este programa deve ser realizado em duas etapas diferentes (5). A primeira, antes da instalação entrar em funcionamento (fase pré-operacional), visando principalmente medir os níveis de radiação natural da região. Os resultados obtidos servirão como referência para comparação com aqueles encontrados quando a instalação estiver em funcionamento. Desta forma, será possível avaliar as variações produzidas por futuras descargas de materiais radioativos no meio-ambiente e verificar se estas contribuições originam-se realmente da instalação em questão.

A segunda etapa de um programa de análise ambiental será feita durante a fase operacional da instalação. Neste caso, serão necessárias técnicas de monitoração que podem ser de dois tipos: uma de caráter preventivo e outra de caráter confirmatório.

A primeira envolve a monitoração dos efluentes radioativos gerados pela instalação, antes que eles sejam eliminados no meio-ambiente (6). Esta monitoração irá permitir que seja feita uma avaliação da dose recebida pelos indivíduos do público e população em geral, antes que eles venham a sofrer as conseqüências advindas da liberação de material radioativo pela instalação.

Para se ter certeza de que o controle das descargas de efluentes radioativos é bem conduzido e detectar possíveis liberações não planejadas, acima dos limites operacionais pré-estabelecidos, faz-se também medidas de amostras provenientes do meio ambiente sob influência da instalação (5). Esta monitoração tem, portanto, um caráter confirmatório, uma vez que ela irá avaliar se as suposições feitas no cálculo da dose a partir dos dados obtidos na monitoração de efluentes estão corretas.

Em geral, os programas de análise ambiental são planejados de maneira a:

- assegurar que os padrões de proteção radiológica pertinentes sejam obedecidos;
- verificar se o tratamento de efluentes radioativos está sendo eficiente;
- avaliar o impacto ambiental radiológico.

2. Fontes Naturais (11)

A maior parte da dose de radiação recebida pela população mundial provém de fontes naturais (Figura 1). Ao longo de toda a história da humanidade a radiação cósmica, assim como os materiais radioativos existentes na crosta terrestre vêm atingindo a superfície da Terra.

O homem recebe portanto radiações por duas vias diferentes: irradiação externa decorrente principalmente dos raios cósmicos e irradiação interna proveniente da inalação ou ingestão de produtos radioativos presentes no solo, nos alimentos, na água e no ar que respira.

Ainda que todos os habitantes da Terra estejam expostos à radiação natural, alguns são muito mais irradiados do que outros, uma vez que os níveis de radiação natural variam consideravelmente dependendo da região. Existem áreas específicas no mundo onde o nível de radiação natural é muito mais alto que o normal. Exemplos são as fontes de águas minerais na Áustria, América do Sul e Japão e as areias monazíticas no Brasil e na Índia.

Outro fator importante é a forma de vida. A utilização de determinados materiais de construção, a isolamento térmica dos ambientes, a altitude, bem como as viagens de avião também aumentam de forma considerável a exposição à radiação natural.

As fontes terrestres são responsáveis pela maior parte da dose recebida pelo homem decorrente da radiação natural. Em condições normais produzem mais do que 5/6 das doses equivalentes efetivas individuais, sendo a maioria por irradiação interna, como pode ser visto na Figura 2.

2.1 Radiação Cósmica

Os raios cósmicos são responsáveis por pouco menos da metade da exposição do homem à irradiação natural externa (Figura 2).

A maioria deles tem origem no espaço interestelar, sendo alguns originados durante o processo de explosão solar. Os raios cósmicos irradiam a Terra diretamente, interagindo com a atmosfera, produzindo partículas e materiais radioativos adicionais (como exemplo, tem-se os radionuclídeos cosmogênicos ^3H , ^{14}C e ^7Be).

Ainda que ninguém escape desse bombardeio invisível, algumas partes do globo terrestre são mais afetadas do que outras. As zonas polares recebem um fluxo maior de partículas de origem cósmica do que as zonas equatoriais, uma vez que nesta região a radiação é desviada pelo campo magnético terrestre. A exposição aumenta também com a altitude acima do nível do mar, sendo este fator mais importante que o anterior, uma vez que a contribuição para a proteção decorrente da camada da atmosfera será menor.

Uma pessoa que vive ao nível do mar recebe, em média, uma dose equivalente de aproximadamente 0.03 uSv/h, enquanto que outra que vive a 2000 m de altitude recebe uma dose muito maior (da ordem de 0.1 uSv/h).

As viagens de avião podem expor os passageiros e a tripulação a doses muito superiores, ainda que em intervalos de tempo menores. Entre os 4000 m acima do nível

do mar, correspondentes à altitude mais elevada das aldeias existentes nos montes do Pico Everest, e os 12000 m correspondentes ao nível máximo de altitude dos vãos intercontinentais, a exposição à radiação cósmica aumenta de um fator igual a 25. Este fator será maior entre 12000 e 25000 m, que é a altitude máxima alcançada pelos aviões supersônicos. A dose equivalente efetiva coletiva recebida pela população mundial em virtude das viagens aéreas é da ordem de 2000 uSv-homem/ano.

Na Figura 3 são mostrados os níveis de dose da radiação cósmica em função da altitude acima do nível do mar.

2.2. Radiação Terrestre

2.2.1. Irradiação Externa

Os principais elementos radioativos presentes nas rochas são o ^{40}K , o ^{87}Rb e aqueles decorrentes das séries radioativas naturais: do ^{238}U , do ^{235}U e do ^{232}Th . Estes radionuclídeos são chamados de primordiais - foram originados durante o processo de formação do Universo. No entanto, nos bilhões de anos em que a Terra existe, os radionuclídeos de meia-vida curta desapareceram. Os radionuclídeos que até hoje se mantêm são aqueles que têm meia-vida comparável à idade da Terra.

É evidente que os níveis de radiação terrestre ao redor do mundo diferem de um lugar para outro, dependendo da concentração dos materiais radioativos na crosta terrestre. Estudos realizados nos Estados Unidos, França, Itália, Japão e Alemanha mostraram que aproximadamente 95 % da população mundial vive em áreas onde a dose média oscila entre 0,3 e 0,6 mSv/ano. Aproximadamente 3 % da população recebe doses da ordem de 1 mSv/ano e 1,5 % acima de 1,4 mSv/ano, existindo lugares em que os níveis de radiação terrestre são muito mais elevados, como pode ser observado na Figura 4.

Próximo à cidade de Poços de Caldas - MG, existe uma colina (Morro do Ferro) onde os níveis de radiação atingem valores da ordem de 250 mSv/ano. Este local não é habitado. No entanto, na cidade de Guarapari - ES, onde vivem cerca de 12.000 habitantes, podendo receber até 30.000 visitantes durante as férias de verão, são encontrados níveis da ordem de 175 mSv/ano, em algumas praias cujas areias são ricas em tório. Os níveis normalmente observados nas casas dos habitantes variam de 8 a 15 mSv/ano.

O UNSCEAR estimou que em média a população mundial recebe uma dose equivalente da ordem de 350 uSv/ano, que é uma dose ligeiramente superior àquela decorrente da radiação cósmica recebida pelas pessoas que vivem ao nível do mar.

2.2.2. Irradiação Interna:

Aproximadamente 2/3 da dose equivalente efetiva recebida pelo homem decorrente das fontes naturais são provenientes de substâncias radioativas que se encontram no ar que respiramos, nos alimentos que ingerimos e na água que bebemos.

Uma pequena fração dessa dose é proveniente de radionuclídeos tais como o ^{14}C e o ^3H , que são produzidos pela radiação cósmica. O restante é decorrente das fontes naturais terrestres.

O homem recebe, em média, 180 uSv/ano de ^{40}K incorporado juntamente com o potássio não radioativo, que é elemento essencial para o seu organismo. No entanto, a maior parte da dose provém dos radionuclídeos resultantes das desintegrações das fontes naturais do ^{238}U e do ^{232}Th .

Alguns deles, tais como o ^{210}Pb e o ^{210}Po , introduzem-se no organismo fundamentalmente com o alimento. Ambos concentram-se principalmente nos peixes e mariscos. Portanto, as populações que ingerem grandes quantidades desses alimentos são mais susceptíveis de receberem doses mais elevadas.

Dezenas de milhares de pessoas que vivem no extremo setentrional do hemisfério norte alimentam-se basicamente de carne de rena. A carne deste animal contém concentrações elevadas dos radionuclídeos mencionados acima, principalmente ^{210}Po , isto porque durante o inverno as renas alimentam-se de líquens, que acumulam de forma significativa o ^{210}Po . Essas pessoas recebem doses devidas ao ^{210}Po até 35 vezes superiores aos valores normais.

No outro extremo do mundo, no oeste da Austrália, que é uma região rica em urânio, as pessoas recebem doses 75 vezes superiores aos valores normais em virtude do fato de consumirem carne de ovinos e cangurus.

2.2.3. Radônio

Nos últimos anos, os pesquisadores têm constatado que a fonte mais importante de radiação natural é um gás invisível, insípido e inodoro, sete vezes mais pesado que o ar, denominado radônio.

O UNSCEAR estimou que o radônio e os seus produtos de decaimento contribuem com cerca de 3/4 da dose equivalente efetiva anual recebida pelo homem decorrente das fontes terrestres e com aproximadamente metade da dose recebida em virtude de todas as fontes naturais. A contribuição maior dessas doses provém da inalação dos radionuclídeos filhos (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{210}Pb), especialmente em ambientes fechados.

O radônio flui da terra em todas as direções, no entanto os seus níveis variam muito de um ambiente para outro. Sem dúvida, o grau de exposição ao radônio aumenta de forma significativa em ambientes fechados. Nas zonas temperadas a concentração de radônio no interior das casas chega a ser 8 vezes superior à existente no exterior. Nos países tropicais não existem muitos dados disponíveis; no entanto, uma vez que as casas permanecem abertas a maior parte do tempo é provável que a concentração de radônio no seu interior não seja muito diferente da existente no exterior.

Quanto mais fechados os edifícios, maior a concentração de radônio no seu interior (Figura 5). Os níveis de exposição à radiação podem atingir valores muito elevados, principalmente se os edifícios encontrarem-se sobre terrenos ricos em urânio ou tório ou se forem construídos com materiais cujos níveis de radioatividade são elevados. O isolamento térmico irá agravar a situação, uma vez que a saída do gás será mais difícil.

Os materiais de construção mais comuns, tais como as madeiras, os tijolos e o concreto emitem pouco radônio. O granito é muito mais radioativo, assim como a pedrapome, utilizada por exemplo na União Soviética e na Alemanha.

Outros subprodutos utilizados na construção civil que contêm elementos radioativos são o óxido de ferro, titânio e alumínio, bem como as escórias derivadas do tratamento do ferro em altos-fornos e as cinzas procedentes da combustão do carvão.

A água e o gás natural constituem-se em outras fontes importantes de radônio nas residências. O UNSCEAR estimou que pelo menos 1 % da população mundial consome água que contém mais de um milhão de Bq de atividade por m^3 , e que pelo menos 10 % bebe água com mais de 100.000 Bq/ m^3 .

No entanto, o consumo de água que contenha concentrações elevadas de radônio não é o principal problema do ponto de vista radiossanitário, uma vez que grande parte desta água é utilizada para cozinhar alimentos, o que implica na liberação de grande parte do radônio. Mesmo a ingestão de água fria não leva a grandes doses, uma vez que o radônio é eliminado rapidamente do organismo por ser quimicamente inerte.

O maior risco é causado pela inalação de radônio emitido por águas ricas neste gás, especialmente durante o banho. Estudos realizados em residências finlandesas mostraram que, em média, a concentração de radônio presente nos banheiros é da ordem de 3 vezes superior à existente na cozinha e 40 vezes mais alta que a detectada em salas de estar. No mesmo sentido, um estudo realizado no Canadá revelou que a concentração de radônio e seus produtos de decaimento aumentam rapidamente durante uma ducha quente de 7 minutos, e que deve transcorrer mais de 1,5 hora para que a concentração retorne aos níveis iniciais.

O radônio também incorpora-se ao gás natural nos sistemas de aquecimento. Os processos de tratamento e armazenamento do gás liberam parte do radônio, antes do seu fornecimento aos consumidores. No entanto, a sua combustão em estufas sem chaminé, aquecedores e outros artefatos domésticos aumentam de forma significativa a concentração de radônio nas residências.

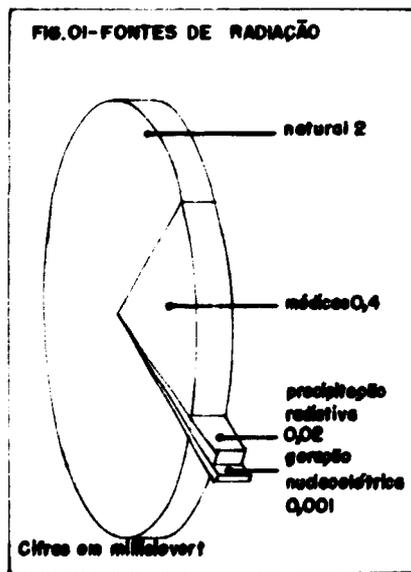
A proporção de casas que apresentam concentrações de radônio e seus produtos de decaimento entre 1.000 e 10.000 Bq/ m^3 oscila nos diversos países do mundo entre 0,01 e 0,1 %. Isto significa que um número considerável de pessoas estão submetidas a altas concentrações de radônio em suas residências. Aproximadamente 3/4 da dose equivalente coletiva total contabiliza-se em residências cujas concentrações são inferiores a 100 Bq/ m^3 . A dose equivalente efetiva total decorrente da exposição ao radônio e seus filhos é de aproximadamente 1,2 mSv/ano, ou seja, metade da dose total estimada para todas as fontes naturais.

2.3. Outras fontes

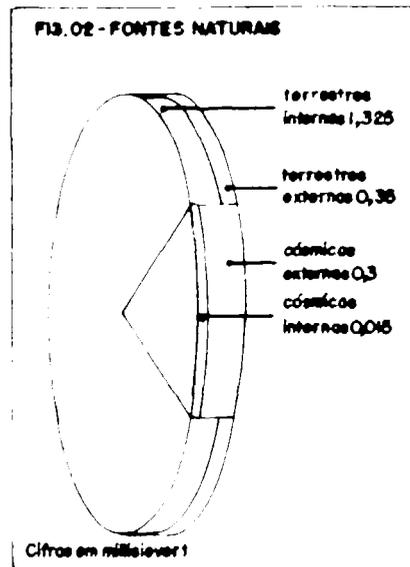
O carvão contém vestígios de radionuclídeos primordiais. A sua combustão produz a liberação desses elementos no meio ambiente, podendo afetar o homem de forma significativa. As principais fontes de descarga são as usinas termoelétricas, sendo que a produção de cada gigawatt-ano de energia elétrica origina uma dose equivalente efetiva comprometida total de 2,0 Sv.homem. Isto significa que no ano de 1979, por exemplo, as centrais termoelétricas de todo o mundo produziram uma dose equivalente coletiva comprometida de aproximadamente 2000 Sv.homem.

A energia geotérmica constitui outra fonte de incremento de exposição à radiação; em alguns países são extraídas as reservas de vapor e água quente existentes no interior da Terra para gerar eletricidade ou aquecer os edifícios. Este tipo de energia contribui muito pouco para a exposição mundial à radiação, uma vez que a sua utilização é ainda muito restrita. No entanto, sua importância pode aumentar significativamente no futuro, uma vez que segundo alguns estudos o seu potencial é imenso.

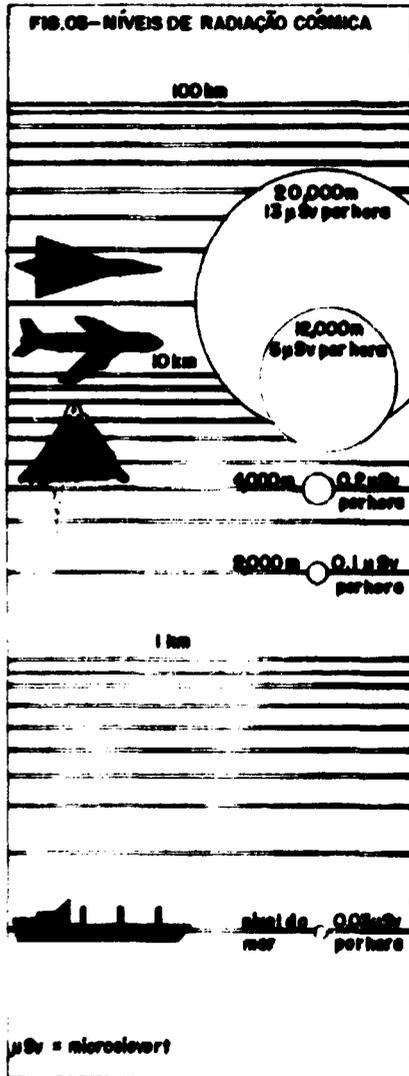
Os fosfatos são explorados de maneira extensiva em todo o mundo, sendo empregados principalmente na produção de fertilizantes. A maioria das reservas de fosfato em exploração contém altas concentrações de urânio. A extração e transformação do mineral produz a liberação de radônio, assim como a utilização dos fertilizantes obtidos pode contaminar os alimentos. A indústria de fosfatos causou em 1977 uma dose equivalente efetiva coletiva de aproximadamente 6000 Sv.homem, enquanto que o fosfogesso, que é um material que aparece como subproduto da indústria de fertilizantes, foi responsável por uma dose de 300.000 Sv.homem.



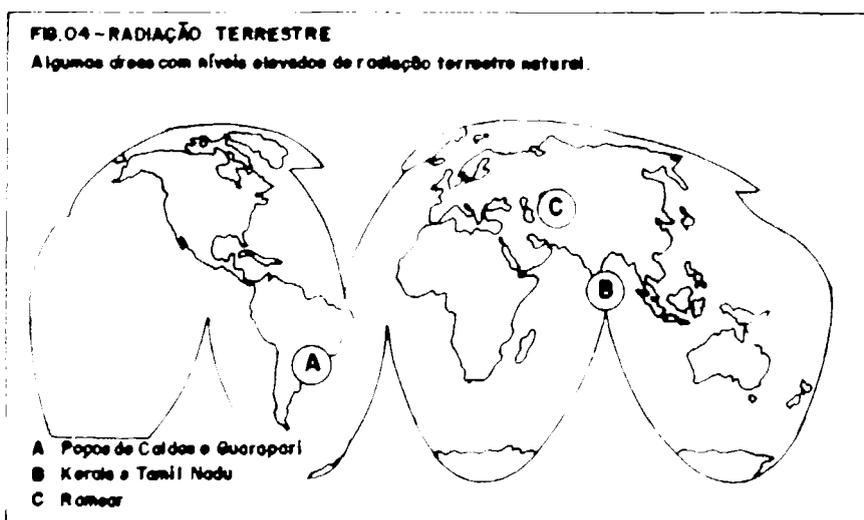
**DOSE EQUIVALENTE EFETIVA MÉDIA ANUAL
DECORRENTE DAS FONTES NATURAIS E
ARTIFICIAIS DE RADIAÇÃO**

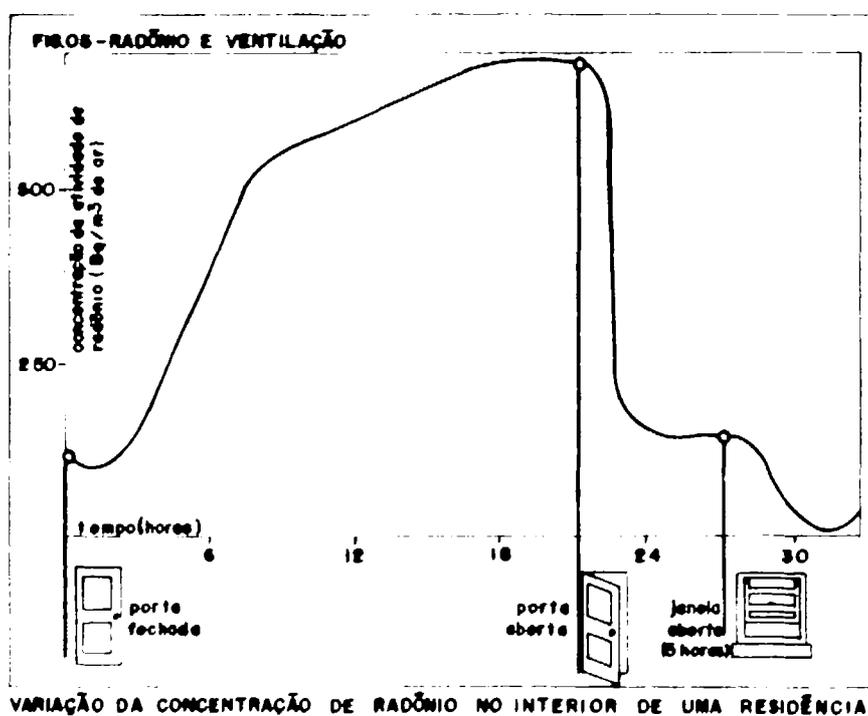


**DOSES EQUIVALENTE EFETIVA MÉDIA ANUAL
DECORRENTE DA FONTES NATURAIS DE
RADIÇÃO**



AUMENTO COM A ALTITUDE DA TAXA DE DOSE EQUIVALENTE DECORRENTE DA RADIAÇÃO CÔSMICA





3. Fontes artificiais (11)

Durante as últimas décadas, o homem tem produzido artificialmente vários radionuclídeos e tem aprendido a utilizar a energia do átomo para os mais variados propósitos: medicina, armas militares, produção de energia elétrica, detecção de incêndios, iluminação de relógios e prospecção de minerais. Todos eles vêm contribuir para um acréscimo na dose de radiação recebida pelos indivíduos, bem como para a humanidade em seu conjunto.

As doses individuais decorrentes das fontes artificiais de radiação variam de forma significativa. A maioria da população recebe uma dose de radiação "artificial" relativamente pequena. Entretanto, algumas pessoas recebem doses da ordem de 1000 vezes maiores que as recebidas por fontes naturais, como por exemplo aquelas que utilizam fontes de radiação para fins médicos.

Esta variação é geralmente muito maior no caso das fontes artificiais do que das fontes naturais, apesar do controle das primeiras ser muito mais efetivo do que o das últimas.

3.1. Fontes médicas

Atualmente, a medicina é a fonte mais importante de exposição do homem à radiação artificial. Em alguns países, ela é responsável por praticamente toda a dose decorrente de fontes artificiais.

Neste caso, a radiação é utilizada tanto para diagnóstico como para tratamento de enfermidades. Os equipamentos de raios-X são uma das ferramentas mais úteis para uso médico. Têm sido desenvolvidas também novas e complexas técnicas baseadas no emprego de radioisótopos. A radiação também é um dos meios fundamentais para o combate ao câncer.

Obviamente, as doses individuais variam de forma significativa, desde zero (no caso de pessoas que jamais tenham sido examinadas com raios-X) até da ordem de 1000 vezes a dose média anual proveniente da radiação natural (em alguns pacientes que fazem tratamento de câncer). No entanto, existem poucas informações confiáveis e representativas para o cálculo da dose na população mundial decorrente da utilização de fontes radioativas na medicina. Não se sabe o suficiente sobre o número de pessoas irradiadas anualmente, e muito menos sobre as doses recebidas por elas.

Em princípio, a irradiação médica é benéfica, ainda que algumas pessoas recebam doses elevadas desnecessariamente, que poderiam ser reduzidas consideravelmente sem nenhuma perda de eficácia. Além disso, o benefício de tal redução seria imenso, dada a alta proporção de exposição às fontes artificiais proveniente do uso da radiação em medicina.

A dose equivalente efetiva média procedente da totalidade das irradiações médicas nos países industrializados situa-se em torno de 1 mSv/ano por habitante, o que corresponde a aproximadamente metade da dose decorrente da radiação natural. Tal estimativa apresenta um grande erro, já que as doses podem flutuar em até 300 % entre os diferentes países. Uma vez que os países em desenvolvimento apresentam poucos

dados por utilizarem em menor escala a radiação para fins médicos, estima-se que a dose média mundial seria de 400 uSv/ano por pessoa, o que resulta em uma dose equivalente efetiva coletiva total de aproximadamente 1.600.000 Sv.homem/ano.

3.2. Explosões nucleares ("fall-out")

Durante os últimos 40 anos toda a humanidade vem sendo exposta à radiação proveniente de precipitação radioativa derivada da explosão de armas nucleares. Com a explosão de bombas nucleares, a reação de fissão forma fragmentos radioativos que são liberados na atmosfera. Os produtos de fissão são dispersos na atmosfera e depositam-se sobre a terra dando origem ao fenômeno denominado "fall-out". Aproximadamente 50% da energia da explosão nuclear é liberada na forma de deslocamento de ar, 35% na forma de radiação térmica e 15% na forma de radiação ionizante⁽²⁾.

Os testes alcançaram seus pontos culminantes durante o período de 1954 a 1958, quando foram feitas explosões pelos Estados Unidos, URSS e Reino Unido; e entre 1961 e 1962, quando os principais contribuintes foram os Estados Unidos e a URSS.

Em 1963, os três países assinaram o Tratado de Proibição Parcial de Testes Nucleares, comprometendo-se a não realizar testes com armas nucleares na atmosfera, oceanos e espaço. Os testes subterrâneos continuam a ser realizados, sem que aparentemente produzam precipitações radioativas.

Alguns dos produtos radioativos resultantes dos testes de armas nucleares depositam-se em lugares próximos à explosão. Outros permanecem na troposfera (a camada inferior da atmosfera), e são transportados ao redor do mundo pelos ventos. Permanecem no ar por aproximadamente 1 mês (Figura 6), e a seguir depositam-se gradualmente sobre a Terra, quase todos na mesma latitude. No entanto, a maior parte chega à estratosfera (a camada seguinte da atmosfera, entre 10 e 50 km), onde permanecem durante meses, descendo lentamente para se depositarem sobre a superfície terrestre.

A precipitação radioativa contém diferentes tipos de radionuclídeos. No entanto, apenas alguns irão contribuir significativamente para a exposição do homem à radiação, já que a maioria é produzida em quantidades muito pequenas ou desintegram-se rapidamente. Apenas quatro deles contribuem para a dose equivalente efetiva coletiva comprometida recebida pela população mundial em decorrência das explosões nucleares. São eles, em ordem decrescente de importância, o ^{14}C , o ^{137}Cs , o ^{95}Zr e o ^{90}Sr .

A evolução das doses anuais mostra que os picos foram alcançados entre 1958 e 1960 e especialmente entre 1963 e 1964. Em 1963, a dose coletiva média anual foi de aproximadamente 7 % da causada pela radiação natural. Tal proporção diminuiu para 2 % em 1966 e 1 % nos primeiros anos da década de 80. Se não forem realizados mais testes, a tendência é de que esta proporção diminua cada vez mais.

Esses resultados apresentam variações consideráveis. A população do hemisfério norte, onde foi feita a maioria dos testes, recebe uma quantidade muito maior de precipitação radioativa. Os rebanhos de renas existentes na zona setentrional receberam doses de ^{137}Cs de 100 a 1000 vezes superiores aos níveis normais. Algumas pessoas que vivem próximas às explosões, bem como os habitantes das Ilhas Marshall e a tripulação de alguns barcos pesqueiros do Japão receberam doses extremamente elevadas.

A dose equivalente efetiva coletiva comprometida total decorrente das explosões nucleares na atmosfera atingem valores da ordem de 30.000.000 Sv.homem. Apenas 12 % desta dose havia atingido a população até 1980; o restante irá alcançar o homem nos próximos milhões de anos.

3.3. Ciclo do combustível

A produção de energia nucleoeleétrica é sem dúvida uma das fontes artificiais de radiação mais controvertidas, ainda que sua contribuição à exposição do homem seja muito restrita. Em condições normais de operação, as descargas das instalações nucleares produzem uma irradiação desprezível no meio ambiente.

As centrais nucleares constituem-se em apenas uma das etapas do ciclo do combustível. Este inicia-se com a extração e o tratamento do minério de urânio, vindo a seguir a purificação, o enriquecimento para o isótopo físsil (^{235}U) e a fabricação do elemento combustível. Quando este já foi usado no núcleo do reator, é reprocessado para a separação do material físsil (urânio e plutônio) não utilizado no reator. O processo é concluído com o armazenamento dos rejeitos radioativos. Na Figura 7 são mostrados as etapas do ciclo, bem como as doses comprometidas, em Sv.homem por gigawatt de eletricidade produzida.

Em cada fase do ciclo são liberados materiais radioativos. O diagrama da Figura 8 apresenta o ciclo do combustível nuclear e suas prováveis liberações para o meio ambiente.

A dose coletiva anual originada do ciclo do combustível nuclear em 1980 foi de 500 Sv.homem, sendo que no ano 2000 poderá atingir 10.000 Sv.homem e no ano 2100, 20.000 Sv.homem. Estes dados são baseados em hipóteses pessimistas, supondo-se que não serão desenvolvidas melhores técnicas e que serão mantidos os atuais níveis de descarga. Assim mesmo, as doses médias são muito pequenas quando comparadas àquelas decorrentes das fontes de radiação natural.

As pessoas que vivem nas imediações das centrais nucleares recebem doses superiores à média. Mesmo neste caso, as doses típicas registradas atualmente representam pouco mais de 1 % das causadas pelas fontes de radiação natural.

Esses valores são relativos à condição normal de operação de uma instalação nuclear. Quantidades muito maiores de material radioativo podem ser liberadas durante um acidente. O UNSCEAR, na sua publicação de 1982, fez uma avaliação das doses decorrentes dos acidentes de Windscale em 1957 e de Three Mile Island em 1979. A descarga produzida em Three Mile Island não foi significativa. O acidente de Windscale produziu uma dose equivalente efetiva comprometida coletiva de 1300 Sv.homem.

Na publicação de 1988, o UNSCEAR⁽¹⁴⁾ estimou que a dose equivalente efetiva comprometida coletiva decorrente do acidente de Chernobyl será de 600.000 Sv.homem. Deste total, 40 % da dose será recebida pela população da URSS e 57 % pela população do resto da Europa. Os 3 % restantes serão recebidos pela população de outros países do hemisfério norte.

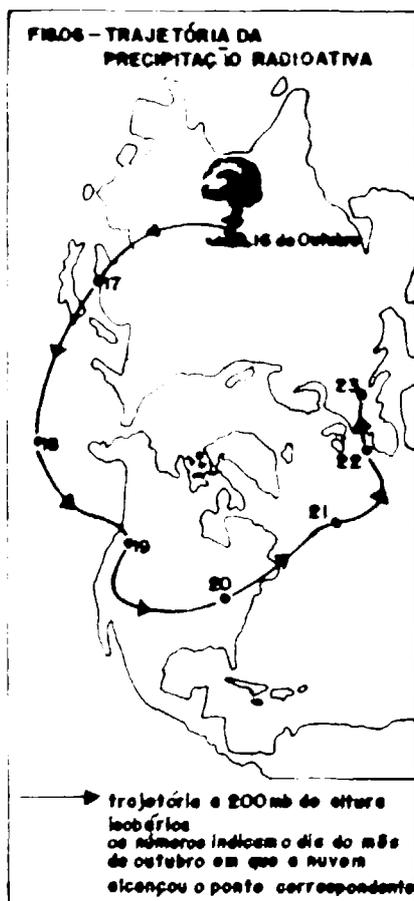
3.4. Outras fontes

Finalmente, certos materiais de consumo contêm alguns radionuclídeos que originam doses de radiação no público. Como exemplo, tem-se os relógios de pulso com mostrador luminoso. Neste caso, o impacto causado é quatro vezes superior ao provocado pelas descargas de efluentes radioativos de instalações nucleares em condições normais de operação. Esses tipos de relógios produzem a mesma dose equivalente efetiva coletiva que as provocadas pelas exposições ocupacionais na indústria nuclear, que é de 2000 Sv.homem. Anteriormente era utilizado o rádio para a confecção desses relógios, o que originava uma exposição significativa nas pessoas que os usavam. Atualmente o rádio foi substituído pelo trítio e pelo ^{147}Pm , que originam doses bem inferiores.

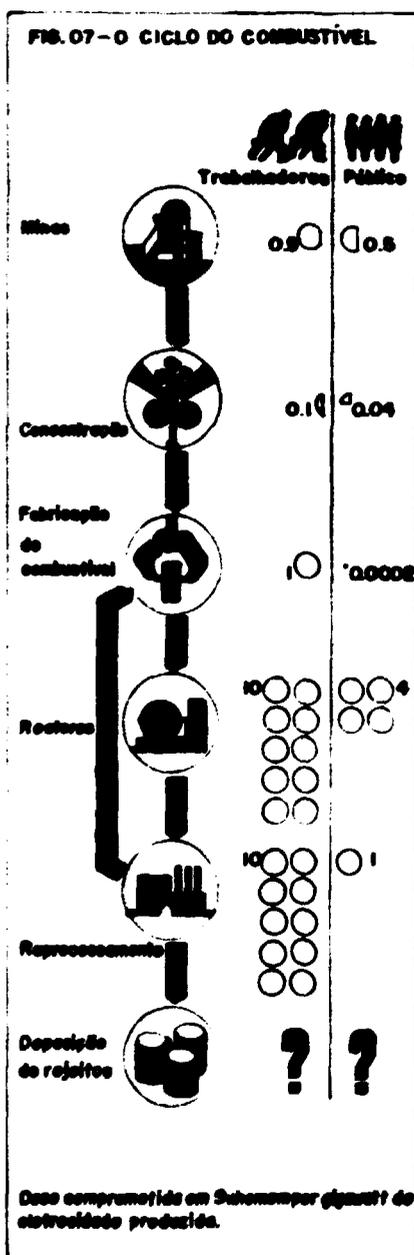
Alguns detectores de fumaça contêm emissores alfa, tal como o ^{241}Am . Nos últimos anos foram instalados 26 milhões destes equipamentos nos Estados Unidos, ainda que o seu funcionamento normal resulte em baixas doses.

O tório é utilizado em alguns tipos de lentes, podendo produzir doses significativas no cristalino. O urânio é amplamente utilizado para dar brilho em dentes postiços, o que irá acarretar irradiação dos tecidos bucais. Esta aplicação visa objetivos exclusivamente estéticos, portanto a exposição resultante é totalmente injustificada.

No interior dos televisores a cores também são produzidos raios-X, ainda que os aparelhos modernos produzam doses insignificantes. Os equipamentos de raios-X utilizados nos aeroportos para a vistoria de bagagens também produzem doses bastante baixas.



**PRECIPITAÇÃO RADIOATIVA TROPOSFÉRICA
DECORRENTE DE UMA EXPLOSÃO NUCLEAR
QUE OCORREU NA ATMOSFERA EM 16
DE OUTUBRO DE 1980. A FIGURA MOSTRA
APENAS UMA DAS DIVERSAS TRAJETÓRIAS
DESCRITAS E DIFERENTES ALTURAS ISOBÁRICAS**



4. Comportamento dos radionuclídeos no ecossistema

Quando um radionuclídeo é introduzido no ar ou na água, é dispersado e diluído espacialmente, redistribuído e finalmente acumulado em compartimentos específicos do ambiente, tais como o solo, sedimento de fundo de rio, alimentos etc.

A distribuição dos radionuclídeos no meio ambiente é governada por um conjunto de fatores físicos, químicos, biológicos, hidrológicos, meteorológicos e oceanográficos. O fato de todos os componentes do ambiente conterem traços de radionuclídeos naturais ou produzidos pelo homem estimulou o interesse de se estudar o comportamento dos radionuclídeos dentro e entre os compartimentos do ecossistema, o mecanismo responsável por esse movimento e a concentração dos radionuclídeos nos componentes bióticos e abióticos do sistema ecológico (12, 15).

O interesse pelo estudo do comportamento ambiental dos radionuclídeos é geralmente motivado pelas considerações quanto aos efeitos biológicos que eles possam causar ou o desejo de entender os processos geoquímicos e geológicos por meio da observação do transporte dos radionuclídeos. Para responder às questões sobre os efeitos biológicos, certos pormenores devem ser conhecidos e previstos, tais como (12):

- o movimento e a concentração do material no sistema considerado;
- a toxicidade química e radiológica do radionuclídeo em questão.

O comportamento dos radionuclídeos nos diferentes compartimentos do ecossistema é mais facilmente entendido no conceito geral, se forem considerados os processos de transporte e os fatores que modificam tais processos. Embora os mecanismos de transporte sejam semelhantes para um grande número de radionuclídeos, a sua quantificação irá variar de acordo com as propriedades físico-químicas de cada um destes (15).

A descrição da liberação de radionuclídeos ao meio ambiente é conhecida como "termo-fonte". Esta descrição inclui o conhecimento do tipo de radionuclídeo e sua forma físico-química, da quantidade eliminada por unidade de tempo e da configuração geométrica da descarga.

Os radionuclídeos eliminados no meio ambiente percorrem diversos caminhos, por meio de vias de transferência, até chegarem ao homem (2, 4). Este movimento pode ser descrito matematicamente por modelos de compartimento (4, 13). As vias de transferência que contribuem para a maior dose de radiação no homem são conhecidas como vias críticas e são características para cada instalação nuclear.

Quando os radionuclídeos são eliminados no meio ambiente, o material dispersa-se no meio abiótico, principalmente no ar e na água. O efeito geral da dispersão é a redução da concentração do radionuclídeo no ar ou na água com a distância do ponto de descarga. A extensão e a rapidez com que este material é disperso varia com o grau de turbulência do meio aéreo e aquático. Os radionuclídeos no ar e na água são imediatamente sujeitos ao fenômeno de deposição. Este fenômeno inclui a sedimentação gravitacional, precipitação, impactação e adsorção química ou troca.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os caminhos potencialmente críticos de exposição do homem à radiação. Como pode ser observado, os compartimentos que recebem o material e que podem eventualmente concentrar quantidades consideráveis do radionuclídeo podem ser constituídos de organismos vivos ou materiais inertes.

FIG. 09 - VIAS SIMPLIFICADAS DE TRANSFERÊNCIA DO MATERIAL RADIOATIVO DESDE A SUA LIBERAÇÃO NA ATMOSFERA ATÉ O HOMEM

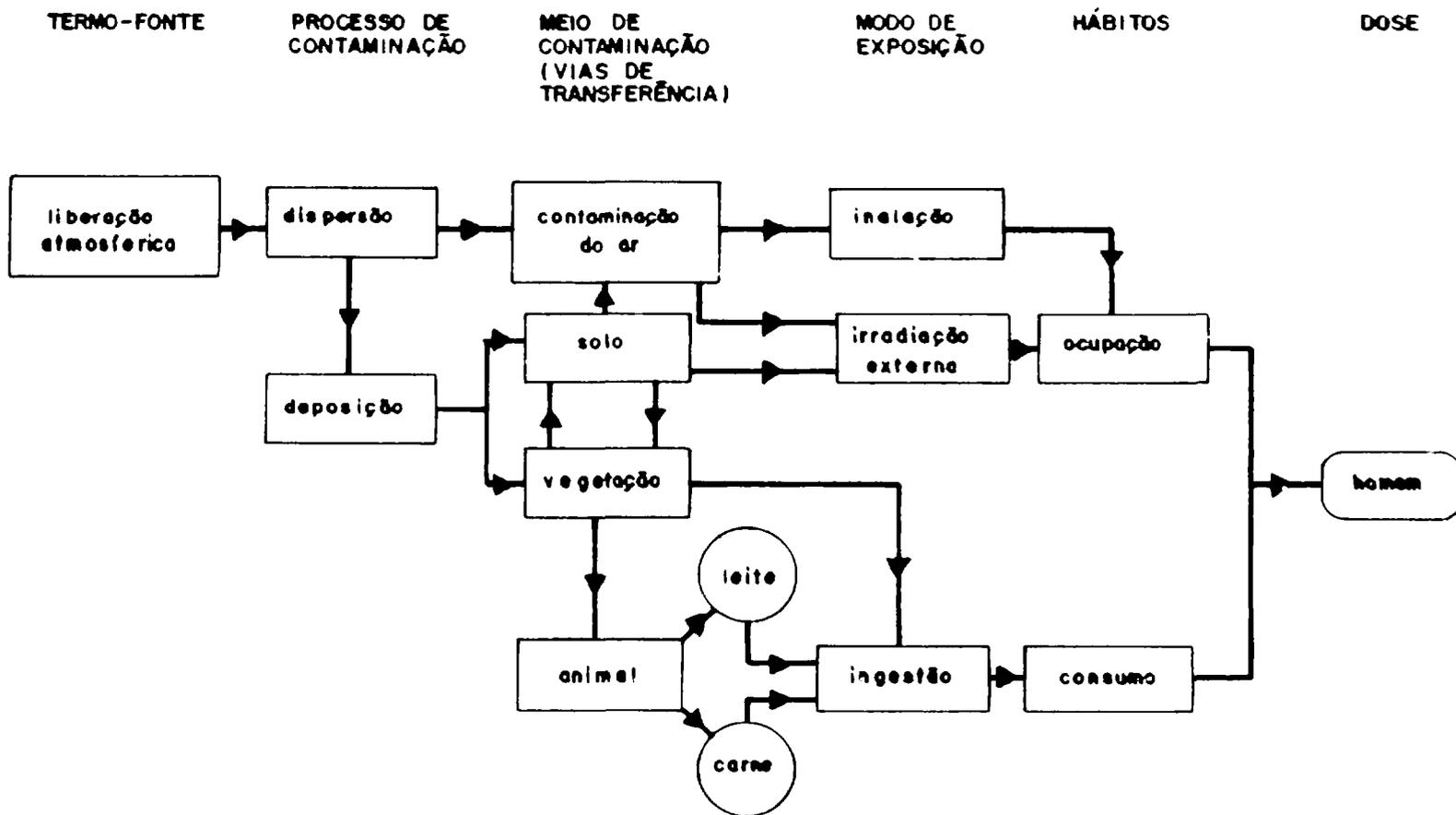
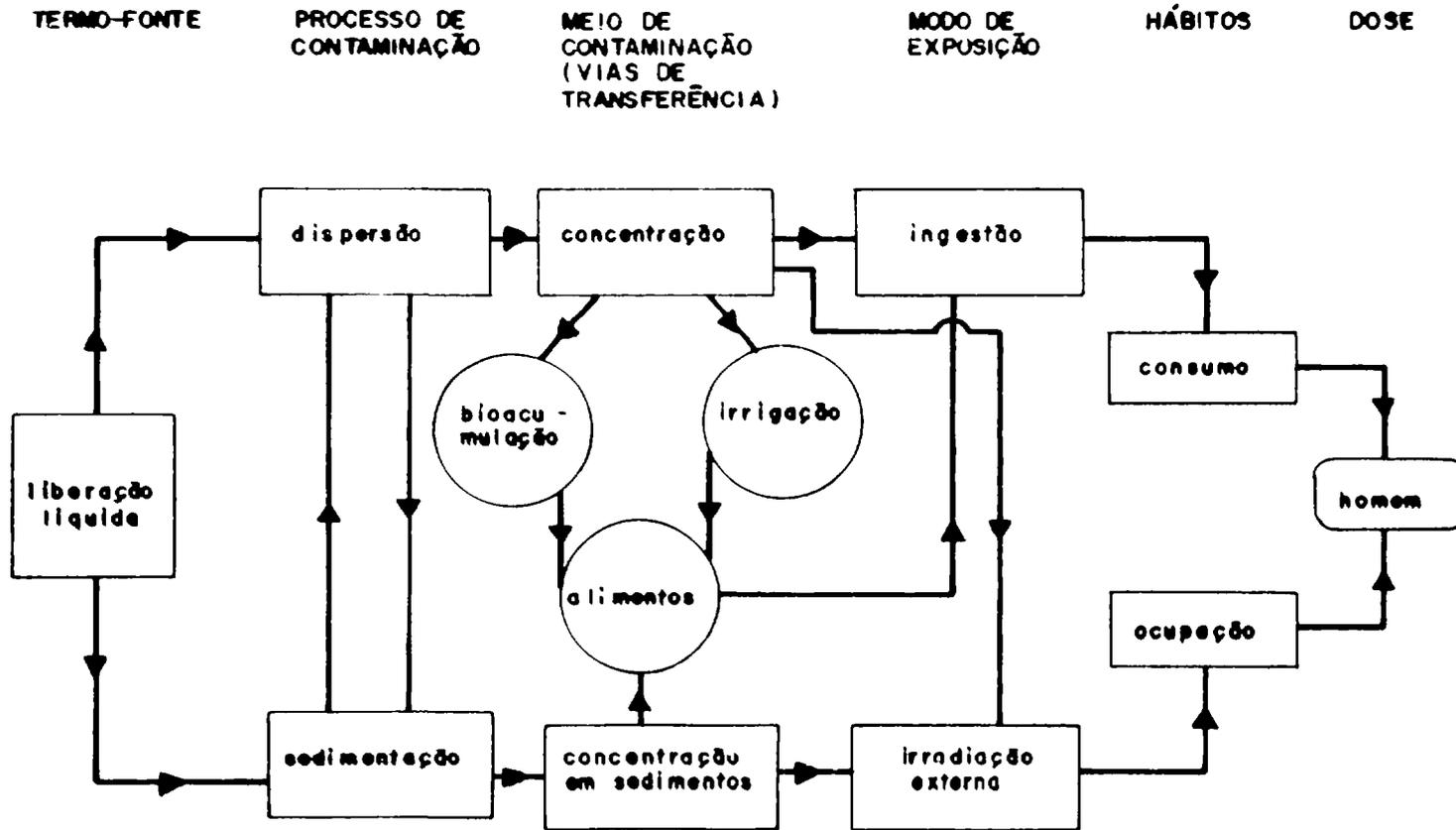


FIG. 10 - VIAS SIMPLIFICADAS DE TRANSFERÊNCIA DO MATERIAL RADIOATIVO DESDE A SUA LIBERAÇÃO NO MEIO AQUÁTICO ATÉ O HOMEM



5. Limites de dose para indivíduos do público

Como já foi visto anteriormente, a liberação de material radioativo no meio ambiente decorrente de atividades humanas irá contribuir para um acréscimo na dose de radiação proveniente de fontes naturais.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP)⁽⁹⁾ estabeleceu um sistema de limitação de dose aplicável a essa situação, que em condições normais de trabalho nunca deverá ser infringido. Esses limites foram fixados de forma a prevenir a ocorrência de efeitos deletérios determinísticos, assim como limitar a probabilidade de efeitos estocásticos a níveis considerados aceitáveis.

O sistema de limitação de dose recomendado pela ICRP fundamenta-se em três princípios básicos (1, 3, 9):

- princípio da justificativa

Qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação a outras alternativas e produzir um benefício líquido positivo para a sociedade;

- princípio da otimização

O projeto, o planejamento do uso e a operação de instalações e de fontes de radiação devem ser feitos de modo a garantir que as exposições sejam tão reduzidas quanto razoavelmente exequível, levando-se em consideração fatores sociais e econômicos;

- princípio da limitação da dose individual

As doses individuais de trabalhadores e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de dose equivalente estabelecidos nas normas de proteção radiológica.

Na aplicação dos limites de dose para indivíduos do público deve ser considerado o grupo crítico da população. Este grupo é constituído por aqueles indivíduos que recebem a maior dose decorrente da liberação de materiais radioativos no meio ambiente. Neste caso, o limite de dose equivalente efetivo anual é de 1 mSv.

Os limites de dose equivalente recomendados pela ICRP não devem ser aplicados, ou incluir os níveis normais de radiação natural, mas unicamente aqueles advindos dos componentes da radiação natural que resultam das atividades humanas ou de ambientes especiais (9).

6. Definição de um Programa de Análise Ambiental

A análise ambiental em uma instalação nuclear é realizada por meio de um programa de monitoração que é feito de duas maneiras diferentes, uma dentro do próprio estabelecimento e outra externa a ele. O procedimento técnico, bem como o tipo e número de medidas variam consideravelmente de instalação para instalação. Isto é esperado, pois além das variações determinadas pelas diferentes localizações ou ambientes de cada instalação, as monitorações são feitas com propósitos diferentes, aos quais a direção do estabelecimento dá diferentes graus de importância ⁽⁵⁾.

A elaboração desse programa envolve a especificação do tipo e frequência de medidas, procedimentos de amostragem, análises em laboratório, testes estatísticos e técnicas de tratamento, assim como de registro de dados. A parte final desse programa irá envolver a estimativa da dose equivalente e a comparação com os limites máximos admissíveis recomendados pelas normas de proteção radiológica ⁽⁸⁾.

O programa de análise ambiental deverá ser realizado em duas etapas diferentes. A primeira antes da instalação entrar em funcionamento (fase pré-operacional), visando principalmente medir os níveis de radiação natural da região. Os resultados obtidos servirão como referência para comparação com aqueles obtidos durante o funcionamento da instalação.

A segunda etapa de um programa de análise ambiental será feita durante a fase operacional da instalação, objetivando o estabelecimento da exposição real ou potencial do homem aos materiais radioativos ou radiações presentes no seu ambiente ou a estimativa dos limites superiores prováveis de tais exposições.

6.1. Programa de monitoração ambiental pré-operacional

O operador de uma instalação nuclear é responsável apenas por aquela quantidade de material radioativo liberada no meio ambiente em decorrência de uma operação específica da instalação.

Para avaliar essa contribuição é necessário interpretar os resultados referentes às medidas operacionais, subtraindo-lhes os níveis de radioatividade encontrados durante a fase pré-operacional da instalação.

O objetivo de um programa de monitoração ambiental pré-operacional é a obtenção de informações sobre o meio ambiente de uma futura instalação nuclear. Para tanto, devem ser conhecidos ⁽⁵⁾:

- os níveis de radiação natural e artificial da região próxima à instalação nuclear;
- os fatores de diluição e de concentração dos radionuclídeos nas trajetórias seguidas no meio ambiente;
- a distribuição da população de acordo com a idade, o sexo, a dieta, a ocupação doméstica e recreativa nas circunvizinhanças da instalação nuclear;

- a utilização desse ambiente pelo homem, ou seja, sua agricultura, sua indústria e sua pesca;
- os grupos homogêneos na população que poderão receber as maiores doses de radiação (grupo crítico).

O programa de monitoração pré-operacional deve ser iniciado no mínimo um ano, ou de preferência dois a três anos antes do início da operação da instalação e antes do manuseio de material radioativo no local.

A atividade natural da maioria das amostras ambientais varia com as estações do ano. Os resultados pré-operacionais podem ser extrapolados para anos posteriores.

Na maioria dos casos, a radioatividade resultante da operação da instalação pode ser distinguida da atividade natural por identificação química e física dos radionuclídeos. Portanto, é melhor usar, se possível, técnicas analíticas específicas para avaliar a contribuição da instalação na radioatividade do ambiente.

6.2. Programa de monitoração ambiental operacional

A análise ambiental de uma instalação nuclear deve ser feita de forma rotineira, mesmo após a instalação entrar em funcionamento. Os fins do controle ambiental para uma instalação em operação são diferentes dos pré-operacionais, neste caso os objetivos principais são ⁽⁵⁾ :

- controlar as descargas de material radioativo no ambiente;
- avaliar a "exposição potencial" do homem à radiação e materiais radioativos eliminados pela instalação nuclear;
- demonstrar obediência aos regulamentos e outros limites operacionais;
- possibilitar a detecção de algumas mudanças no ambiente resultantes da instalação, após ter entrado em operação;
- verificar se os dados utilizados na avaliação pré-operacional estão sendo mantidos.

Para o cumprimento desses objetivos é necessário estabelecer um programa de análise ambiental apropriado ao tipo da instalação, às características e hábitos da região, à distribuição da população e aos tipos e quantidades de radionuclídeos cuja liberação pode ser prevista.

O programa de análise ambiental de uma instalação nuclear, em condições normais de operação deve ser feito de duas maneiras distintas, uma dentro do próprio estabelecimento e outra externa a ele.

Dentro da instalação deve ser feito o controle da liberação dos efluentes radioativos gerados, antes de sua descarga ao meio ambiente. Neste caso, é necessário conhecer a quantidade e o tipo de material radioativo lançado num ambiente ("termofonte"), para a contabilização da descarga ⁽⁶⁾. De forma a garantir que os limites de dose nos indivíduos do público não serão ultrapassados devem ser determinados

previamente os limites derivados de descarga. Estes são definidos como sendo a atividade anual de material radioativo de composição especificada que resultará numa dose equivalente efetiva no grupo crítico igual ao limite de dose recomendado pelas normas específicas (7).

A liberação de gases radioativos através das chaminés pode ser conhecida colocando-se monitores de radiação em locais estratégicos e quando necessário filtros absolutos para pó ou outros filtros como o de carvão quimicamente ativo para gases.

Controla-se a liberação dos efluentes líquidos radioativos ao meio ambiente efetuando-se medidas de sua radioatividade e concentração antes de sua descarga. São controlados também os rejeitos radioativos sólidos que devem ser liberados ou armazenados no ambiente, procurando-se evitar a sua dispersão.

Para se ter certeza de que o controle da descarga de material radioativo no meio ambiente é bem conduzido e para se detectar possíveis liberações não planejadas, acima dos limites operacionais pré-estabelecidos, faz-se também medidas de amostras provenientes do meio ambiente sob influência da instalação (5).

A quantidade de medidas necessárias, sua frequência e importância depende do programa estabelecido para cada instalação. De maneira geral, os principais tipos de medidas, sem levar em conta sua importância relativa, são:

- medidas de ar atmosférico, particulados e gases;
- medidas das condições meteorológicas do ambiente, direção e velocidade dos ventos, pluviometria etc.;
- medida das precipitações radioativas pela atividade da chuva;
- medida da atividade das águas de rios e córregos da redondeza;
- medida da atividade das águas subterrâneas;
- medida da radioatividade do solo;
- medida da radioatividade da fauna e flora da redondeza;
- medida da radioatividade nos alimentos consumidos pela população local.

É evidente que esta análise ambiental externa pode ser simplificada criteriosamente se forem estudadas as vias críticas de transferência e os grupos críticos da população. Na Figura 11 são mostrados as etapas e dados necessários para a elaboração e execução de um programa de monitoração ambiental.

Para avaliar o impacto ambiental radiológico decorrente da liberação de efluentes radioativos de uma instalação nuclear é imprescindível estimar a dose equivalente e as grandezas correlatas, isto é, a dose equivalente efetiva e a dose equivalente comprometida nos indivíduos do público e população em geral (8).

Para assegurar que os valores encontrados não irão ultrapassar os limites estabelecidos, deve-se tomar o cuidado de incluir a contribuição de outras instalações, que eventualmente possam estar causando dose no mesmo grupo crítico considerado.

A partir dos dados obtidos na monitoração de efluentes pode-se avaliar o detrimento associado à liberação de uma determinada fonte de radiação. Neste caso, é feito o cálculo da dose equivalente individual e coletiva levando-se em conta as descargas causadas em virtude da operação atual e futura da instalação.

O controle ambiental externo, por outro lado, permite avaliar a dose equivalente considerando-se todas as possíveis fontes de radiação. Para realizar esses dois tipos de avaliação, torna-se necessário efetuar um estudo comparativo dos resultados das medidas obtidas por meio dos programas de monitoração e daqueles calculados a partir de modelos matemáticos que descrevem a transferência dos radionuclídeos no meio ambiente até chegarem ao homem (8).

Conseqüentemente, a avaliação da dose equivalente individual e coletiva irá envolver também o uso de modelos como de medidas, sendo que o balanço entre os dois irá depender de alguns fatores tais como: objetivo da avaliação e o ponto no meio ambiente no qual a medida é feita.

Em alguns casos, nenhuma medida será necessária, como por exemplo a dose equivalente causada por uma irradiação externa pode ser calculada conhecendo-se a atividade e a composição da fonte. Em outro extremo, pode ser necessário medir diretamente a dose recebida pelos indivíduos, assim como as quantidades incorporadas. Neste caso, para a estimativa da dose só será necessário o uso de modelos metabólicos e dosimétricos.

Na maioria dos casos, especialmente quando se está considerando a descarga de materiais radioativos no meio ambiente, deverá haver uma combinação dos resultados das medidas efetuadas e daqueles obtidos por meio de uma modelagem das condições em que é feita a liberação. Neste caso, o uso de modelos será necessário para prever a diluição e dispersão dos radionuclídeos, a sua transferência nos diversos compartimentos do ecossistema e a dose final no homem.

É evidente que o grau de confiança na avaliação final irá depender da precisão e freqüência das medidas apropriadas em combinação com o uso de modelos adequados.

O programa de análise ambiental deve ser examinado periodicamente para garantir que esteja adequadamente formulado e que atinja seus objetivos. Mudanças na operação do estabelecimento ou nas características do meio ambiente receptor que possam alterar a exposição à população requerem modificações do programa.

Se as descargas para o meio ambiente são triviais ou quando a experiência indica que dados suficientes têm sido acumulados, o controle das descargas pode, em certos casos, ser feito unicamente pela monitoração contínua dos efluentes. Quando os estudos das numerosas vias de transferência do material radioativo liberado ao meio ambiente confirmam os processos pelos quais o material radioativo será diluído ou concentrado até chegar ao homem, pode-se então optar pela monitoração dos efluentes e dispensar as medidas ambientais.

A prática tem mostrado que a reavaliação do programa tende a reduzir a escala da rotina de monitoração ambiental sem perda de informações científicas (5, 8).

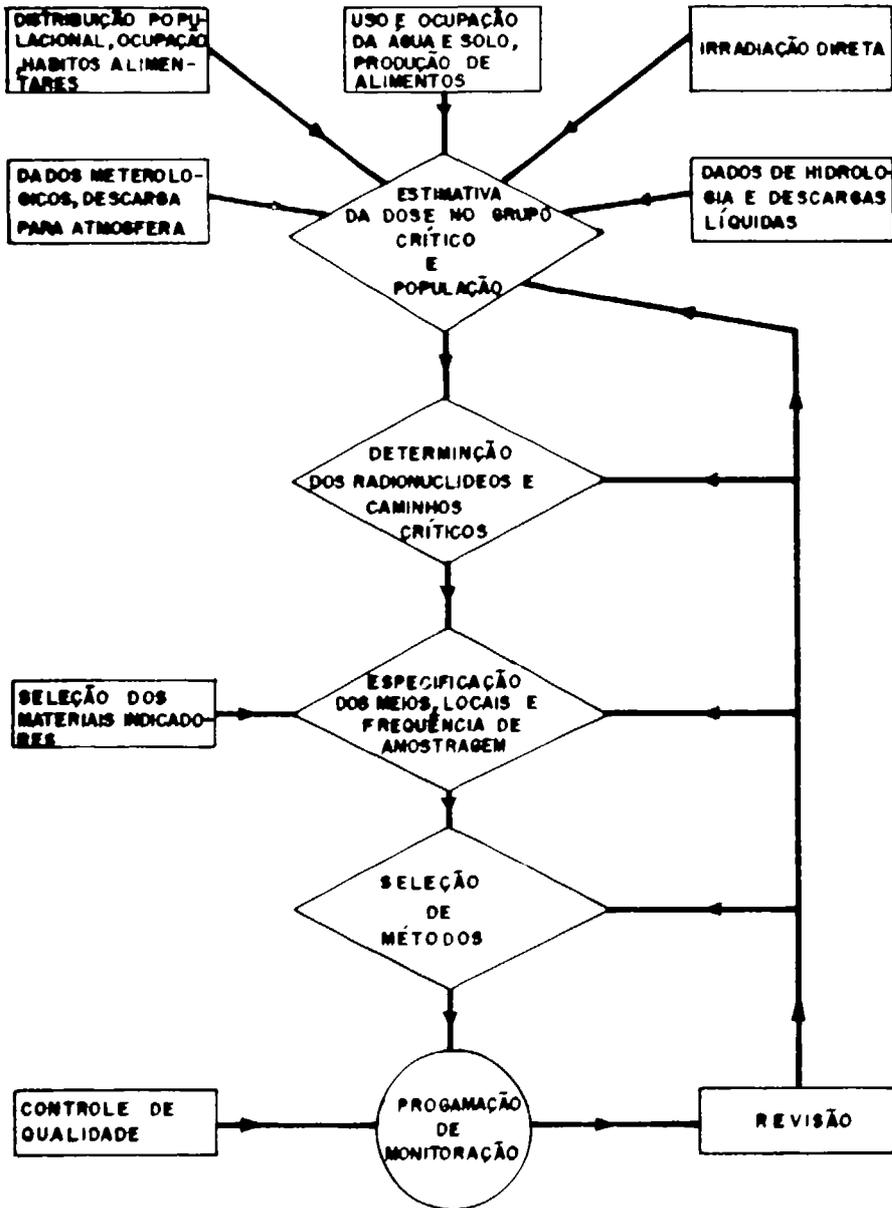


FIG. 11 - ETAPAS A SEREM SEGUIDAS PARA A ELABORAÇÃO E EXECUÇÃO DE UM PROGRAMA DE MONITORAÇÃO AMBIENTAL

ANEXO 1: Programa de Monitoração Ambiental do IPEN-CNEN/SP

1. Descrição das instalações

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 (5.000.000 m²).

As principais instalações do IPEN-CNEN/SP que contribuem para a geração de efluentes radioativos são:

- o Reator IEA-R1, tipo piscina, que opera a uma potência nominal máxima de 2 MW durante 40 h/semana, destinado à produção de radioisótopos para emprego nos campos mais diversos, incluindo a medicina, a engenharia, a indústria e a pesquisa fundamental e aplicada;
- o Centro de Processamento destinado à produção de substâncias marcadas, geradores de ^{99m}Tc e radioisótopos primários, tais como: ¹³¹I, ³²P, ⁵¹Cr etc. para uso em medicina nuclear;
- o Laboratório de Descontaminação ligado à Proteção Radiológica;
- o Centro onde são desenvolvidas as diferentes etapas do ciclo do combustível, contendo as seguintes unidades: purificação e conversão, enriquecimento, fabricação do elemento combustível e tratamento de rejeitos radioativos;
- a Unidade de Produção de Compostos de Tório, tais como óxido e nitrato de tório.

2. Descrição do local

2.1. Características geológicas

A região geológica do IPEN-CNEN/SP é caracterizada por sedimentos terciários na Bacia de São Paulo. A coluna estratigráfica regional pode ser generalizada como segue:

- a) sedimentos aluvionares quaternários
- b) sedimentos terciários fluviolacustres e fluviais da Bacia de São Paulo
- c) embasamento cristalino

2.2. Características meteorológicas

2.2.1. Clima

O clima da região é tropical temperado, com período seco no inverno e um período de chuva no verão, sendo a temperatura média anual de 19,1°C, apresentando mínimas e máximas de 15,3°C e 24,7°C. A precipitação média anual, em torno de 1400 mm e a evaporação média anual, em torno de 900 mm, indicam que só ocorre escoamento superficial nas épocas de chuvas intensas.

2.2.2. Vento

A predominância dos ventos se dá segundo a direção sudeste (SE) com frequência média de 39,8% e com velocidade média de 3.6 m/s; a menor frequência é observada para ventos de sudoeste (SW). A frequência de calmaria fica em torno de 2,0% com velocidades do vento menores que 0.4 m/s.

2.3. Características hidrológicas

A principal ocorrência de água superficial próxima ao IPEN-CNEN/SP corresponde ao rio Pinheiros, que tem o seu escoamento controlado visando o abastecimento dos reservatórios Billings. Este possui uma capacidade nominal de 1200 milhões de m³ e uma área superior a 120 milhões de m². A seguir, as águas passam para o reservatório do rio das Pedras, antes de descer em direção à Serra do Mar para a cidade de Cubatão, onde se aproveita o potencial hidráulico na usina elétrica de Henry Bordon.

O rio Pinheiros tem uma vazão média de 70 m³/s e o reservatório Billings tem uma vazão de 75 m³/s.

2.4. Distribuição populacional

A distribuição da população por setor e círculos concêntricos com raios de 1 a 7 km, baseada no censo de 1980, encontra-se na Tabela 1. A Cidade Universitária compreende aproximadamente 40% da área definida pelo círculo de 2 km, possuindo uma população flutuante de 17.000 habitantes, de um total de 46.467.

2.5. Uso do solo e água

2.5.1. Uso do solo

A capacidade de uso de solo nas imediações do IPEN-CNEN/SP, bem como sua ocupação, é estritamente urbana, constituindo basicamente de áreas residenciais, industriais e comerciais.

Deve ser salientado que as áreas destinadas à produção pecuária e hortifrutigranjeira localizam-se no chamado "cinturão verde" e os centros produtores de leite estão localizados a mais de 60 km do IPEN-CNEN/SP.

2.5.2. Uso da água

As águas do rio Pinheiros são anaeróbicas em todo o seu percurso. O rio não possui fauna possível de ser incorporada à dieta da população e suas águas não têm condições de serem utilizadas para o consumo humano ou para a irrigação de vegetais.

3. Controle dos efluentes radioativos líquidos e gasosos

3.1. Monitoração dos efluentes radioativos líquidos

Os efluentes líquidos gerados pela maioria das instalações do IPEN-CNEN/SP são estocados e controlados em seus respectivos tanques de retenção. As instalações ou laboratórios que não possuem seus próprios tanques armazenam o efluente em bombonas.

O controle dos efluentes radioativos líquidos gerados pelas instalações do IPEN-CNEN/SP é feito medindo-se primeiramente, por espectrometria gama e/ou análise por ativação, a atividade dos radionuclídeos contidos em cada lote amostrado. A seguir, os resultados são comparados com os limites operacionais pré-estabelecidos, quando então é tomada a decisão sobre uma eventual liberação.

Após a autorização da descarga, os efluentes são eliminados no rio Pinheiros, através da rede de esgoto sanitário do IPEN-CNEN/SP.

Os radionuclídeos contidos nos efluentes líquidos que mais contribuem para a soma da atividade total liberada, e que são de relevância no que concerne à proteção radiológica, são: ^{60}Co , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{228}Ra e ^{226}Ra .

Os efluentes gasosos são liberados através de uma ou mais chaminés, após passarem por um sistema de tratamento (ajuste de pH e filtragem) e por um sistema de controle (monitoração do ar). O único radionuclídeo detectado nos efluentes gasosos é o ^{131}I .

3.2. Vias críticas e grupo crítico

Como foi dito anteriormente, todos os efluentes líquidos gerados pelas instalações do IPEN-CNEN/SP são lançados, via rede de esgoto local, no rio Pinheiros, cujas águas não são utilizadas para irrigação ou tratadas para posterior consumo da população. Portanto, a principal via de contaminação a ser considerada é a dispersão e sedimentação dos radionuclídeos. A principal via de exposição é a irradiação externa gama de indivíduos do público que trabalham nas áreas que contêm sedimentos contaminados. O grupo crítico é constituído por aqueles trabalhadores que permanecem próximos aos pontos de descarga de efluentes no rio Pinheiros.

No caso da liberação de efluentes gasosos, verificou-se que o grupo crítico é constituído por aquelas pessoas que vivem a uma distância de 3000 m do IPEN-CNEN/SP, no setor de difusão atmosférica noroeste (NW). A via que mais contribui para a exposição do homem à radiação é a irradiação externa gama decorrente da deposição de ^{131}I no solo.

4. Programa de monitoração ambiental do IPEN-CNEN/SP

O programa geral foi estabelecido levando-se em conta não apenas as principais vias de transferência dos radionuclídeos até chegarem ao homem, mas também os dados referentes à caracterização da região.

Para a avaliação dos níveis de radioatividade aos quais os indivíduos do público estão expostos são analisadas amostras de origem atmosférica, aquática e terrestre. Para tanto é feita a determinação dos radionuclídeos naturais e artificiais pela análise por espectrometria gama em amostras de precipitação pluviométrica, filtros de papel e carvão ativo para a amostragem de aerossóis e ^{131}I no ar, respectivamente. Nas amostras de água e superfície, água subterrânea, sedimento de fundo de rio, solo e vegetação também são feitas análises, pelo método de fluorimetria em meio sólido, para determinação de urânio total.

Além disso, são feitas medidas mensais e trimestrais da radiação direta no meio ambiente com dosímetros termoluminescentes (cristais LiF:Mg:Ti) TLD-100 e TLD-700, respectivamente. Esses dosímetros são posicionados a 1 metro da superfície do solo, e encontram-se instalados em 10 pontos localizados ao longo da periferia do IPEN-CNEN/SP.

As amostras ambientais são coletadas e tratadas conforme procedimentos descritos na literatura. Após o preparo, as amostras (com exceção dos filtros de papel e de carvão ativo) são colocadas em frascos, que são lacrados. A seguir, espera-se no mínimo um mês para contá-las, para que o equilíbrio radioativo seja atingido, uma vez que o ^{226}Ra é determinado através de seus filhos emissores gama ^{214}Pb e ^{214}Bi e o ^{228}Ra é determinado através de seu filho ^{228}Ac .

A amostragem de ar e precipitação pluviométrica é feita continuamente em dois pontos localizados, um no setor SE e outro no setor NW, dentro do próprio "campus" do IPEN-CNEN/SP, realizando-se quinzenalmente a análise das amostras de filtros e mensalmente a análise composta das amostras de precipitação pluviométrica. A coleta das amostras de solo e vegetação é feita semestralmente em 4 pontos localizados dentro do "campus" do IPEN-CNEN/SP (setores SE, NW, W e E). A coleta de água subterrânea é feita semestralmente em 4 pontos correspondentes ao fluxo do lençol freático. Para a água de superfície e o sedimento de fundo de rio, a coleta é feita anualmente em 5 pontos localizados ao longo do rio Pinheiros, sendo 2 próximos aos pontos de descarga de efluentes, 1 a montante e 2 a jusante destes pontos. Também é feita a coleta diária, com análise composta semanal, nos 2 pontos de descarga de efluentes líquidos do IPEN-CNEN/SP.

5. Resultados obtidos nos últimos anos

O impacto causado no meio ambiente em virtude da liberação de efluentes radioativos líquidos e gasosos pelas instalações do IPEN-CNEN/SP é desprezível. As medidas de monitoração ambiental indicaram que os únicos radionuclídeos detectados nas diferentes amostras coletadas com atividade acima da atividade mínima detectável foram ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{40}K e ^7Be , em concentrações da ordem dos níveis de radioatividade natural da região. O valor médio encontrado nos últimos anos na medida da radiação direta no meio ambiente com dosímetros TLD-100 foi $(9,4 \pm 2,7)$ uC/kg, e com os dosímetros TLD-700 foi $(11,0 \pm 3,5)$ uC/kg. Não houve variação significativa entre os resultados encontrados nos diferentes pontos de monitoração e o ponto de controle do branco.

Agradecimentos

Agradecemos ao Dr. Gian Maria A. A. Sordi, ao Dr. Goro Hiromoto e à Dra. Barbara Pacci Mazzilli pelas sugestões dadas na elaboração desta apostila e ao Sr. Marco Antônio Lopes Vida pela confecção dos desenhos.

Referências Bibliográficas

- (1) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, 1988. (CNEN-NE-3.01-88).
- (2) EISENBUD, M. Environmental radioactivity. 3rd ed. New York, N.Y., Academic, 1987.
- (3) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic safety standards for radiation protection. Vienna, 1982. (IAEA-SS-9).
- (4) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. Vienna, 1982. (IAEA-SS-57).
- (5) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Manual of environmental monitoring in normal operation. Vienna, 1966. (IAEA-SS-16).
- (6) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Monitoring of airborne and liquid radioactive releases from nuclear facilities to the environment. Vienna, 1978. (IAEA-SS-46).
- (7) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Principles of limiting releases of radioactive effluents into the environment. Vienna, 1986. (IAEA-SS-77).
- (8) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Principles of monitoring for the radiation protection of the population. Oxford, Pergamon, 1985. (ICRP-43).
- (9) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon, 1977. (ICRP-26).
- (10) NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. Environmental radiation measurements. Washington, D.C., 1976. (NCRP-50).
- (11) SOCIEDAD ARGENTINA DE RADIOPROTECCIÓN. Radiación: dosis, efectos, riesgos. Buenos Aires, 1985.
- (12) SZELES, M.S.F. Determinação de urânio e suas razões isotópicas em amostras ambientais. São Paulo, 1990. (Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo).
- (13) TILL, J.E. & MEYER, H.E. Radiological Assessment: a text book on environmental dose analysis. Washington, D.C., Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- (14) UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Sources, effects and risks of ionizing radiations. United Nations, New York, 1988.

- (15) WHICKER, F.W. & SCHULTZ, V. Radioecology: nuclear energy and the environment. Boca Raton, Flo., CRC, 1982. V.1.