

Este trabalho foi apresentado como Tese de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Universidade Federal de Minas Gerais, em 1981.

"MONITORAÇÃO AMBIENTAL NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL
NUCLEAR - PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO RA-
DIOATIVA DA ÁGUA"

Autor: Valdívio Damasceno Pêgo

Tese apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como
requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de
Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares.

Outubro de 1981



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
30.000 - BELO HORIZONTE - MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
(MESTRADO)

DEFESA DE TESE para Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares

DATA DA DEFESA DE TESE: 12 de fevereiro de 1982

NOME DO CANDIDATO: Valdívio Damasceno Pêgo

TÍTULO DA TESE: Monitoração ambiental nas etapas de produção do combustível nuclear - Procedimentos para avaliação da contaminação radioativa da água.

ORIENTADOR: Dr. Nestor Figueiredo

BANCA EXAMINADORA: (nome, título ou cargo)

1. M.Sc. Luiz Augusto de Queiroz e Oliveira

CDTN/NUCLEBRÁS

2. Dr. Nestor Figueiredo

CIPC/NUCLEBRÁS

3. Dr. Rubens Martins Moreira

CDTN/NUCLEBRÁS

RELATÓRIO DA BANCA

Aprovado, visto satisfazer os requisitos do Conselho Federal de Educação quanto ao nível e natureza do trabalho

2 Presentes
BELO HORIZONTE: 12/02/82

12/FEV/1982

Sping S. Q. Oliveira

Assinatura em unânime satisfatória.

CURSO DE POS-GRADUAÇÃO
CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
ESCOLA DE ENGENHARIA / UFMG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
AV. DO CONTORNO, 812 - SALA 805
30.000 - BH-MG - BRASIL

Agradecimentos

Ao Sr. Nestor Figueiredo, meu orientador, pela contribuição, estímulo e compreensão.

Aos Srs. Virgílio Mattos de Andrade e Silva, José Olympio Nardelli M. Castro e Luiz Augusto Q. Oliveira, por ha verem permitido a realização deste trabalho.

Ao Professor Elias Mansur Netto e aos Srs. Flávio Soares de Menezes, Maurício Mendes Campos, Wellington Antonio Soares, Vanderley Vasconcelos, Eduardo Gomes Ferreira e Sras. Myriam Carvalho Paiano, Cláudia V. S. Sabino, pelas críticas e sugestões.

À Seção de Documentação Técnica do CDTN, pelo pronto atendimento às minhas solicitações.

Aos colegas da Divisão de Apoio ao Licenciamento da NUCLEBRÁS, pelo estímulo prestado.

A minha esposa, pela datilografia e correção.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram,

meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	1
1. INTRODUÇÃO	2
2. PRINCIPAIS CONTAMINANTES RADIOATIVOS DA ÁGUA NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR	5
3. CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS PERMISSÍVEIS E NÍVEIS DE REFERÊNCIA	10
3.1 Considerações sobre as Vias de Irradiação do Ho- mem, devido a Radionuclídeos presentes na Água .	10
3.2 Categorias de Indivíduos expostos às Radiações Ionizantes	10
3.3 Concentrações Máximas Permissíveis de Radionuclí- deos na Água, para as diversas Categorias de In- divíduos	12
3.4 Níveis de Referência	13
4. PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO A SEREM SEGUIDOS	19
5. CONCLUSÕES	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
3-1 Vias de Exposição do Homem a Radiações, devido à Presença de Materiais Radioativos em Águas Superficiais e Subterrâneas	11
4-1 Fluxograma dos Procedimentos para Avaliação da Contaminação Radioativa da Água, para Mineração e Usinas de Beneficiamento de Minérios de Urânio..	21
4-2 Fluxograma dos Procedimentos para Avaliação da Contaminação Radioativa da Água para Usina de Conversão, Usina de Enriquecimento Isotópico e Fábrica de Elementos Combustíveis (FEC)	22

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA	
2-1 Série do U-238	6
2-2 Série do U-235	7
2-3 Série do Th-232	8
2-4 Principais Contaminantes Radioativos da Água nas Etapas de Produção do Combustível Nuclear	9
3-1 Concentrações Máximas Permissíveis, em Água Potável, dos Principais Contaminantes Radioativos nas Etapas de Produção do Combustível Nuclear ...	14
3-2 Níveis de Referência para Monitoração Radioativa da Água, nas Etapas de Produção do Combustível Nuclear	18

RESUMO

Visando a sistematizar os trabalhos de monitoração radioativa da água nas etapas de produção do combustível nuclear urânio, elaborou-se uma seqüência de procedimentos para avaliação da contaminação radioativa da água. Esta seqüência de procedimentos baseia-se na medida das atividades alfa total e beta total, nas concentrações máximas permissíveis de radionuclídeos na água potável, e em níveis de referência previamente estabelecidos.

Procedendo-se conforme esta seqüência, ter-se-á maior segurança de que não serão ultrapassados os limites de incorporação anual por ingestão recomendados pelos órgãos de proteção radiológica. Além disso, poder-se-á alcançar, de modo mais eficaz e econômico, os objetivos de um programa de monitoração ambiental da água.

ABSTRACT

To systematize the water radioactive monitoring works in the various phases of the uranium nuclear fuel production, a sequence of procedures has been worked out, for the assessment of the water radioactive contamination. This sequence is based on the determination of gross alpha and gross beta activities, on the maximum permissible concentration of radionuclides in potable water, and on previously established reference levels.

The procedures will provide a mean to avoid exceeding the annual incorporation limits by ingestion, recommended by the radiation protection regulatory agencies. Accordingly, it is expected that if these recommended procedures are adequately followed, the objectives of an water environmental monitoring program will be reached in a quite efficient and economical manner.

1. INTRODUÇÃO

Em cada etapa do ciclo do combustível nuclear*, pequenas quantidades de materiais radioativos são liberadas para o meio ambiente.

A liberação contínua e controlada de pequenas quantidades de radionuclídeos e o risco potencial de liberação acidental de grandes quantidades de material radioativo requerem o estabelecimento de um controle rígido e permanente das condições radiológicas do ambiente circunvizinho às instalações nucleares, de modo a atender a crescente preocupação de se preservar o meio ambiente.

As exigências dos órgãos licenciadores e fiscalizadores são estabelecidas dentro da filosofia básica de radioproteção de que as doses de radiação recebidas pelo homem devam ser "tão baixas quanto razoavelmente exequível, levando-se em conta fatores econômicos e sociais", obedecendo, evidentemente, os limites fixados por normas.

Para se estimar a dose que resulta da liberação de radionuclídeos no ambiente, é necessário investigar a seqüência dos mecanismos complexos que ocorrem, desde a liberação dos radionuclídeos, até a exposição de indivíduos à radiação desses radionuclídeos.

Os trajetos dos radionuclídeos liberados no meio ambiente são inúmeros e, muitas vezes, complexos. Os radionuclídeos presentes em efluentes gasosos sofrem diluição na atmosfera e o fator de diluição é dependente das condições meteorológicas e geográficas da região, entre outros fatores. Alguns radionuclídeos depositam-se no solo, podendo ser absorvidos por plantas, enquanto outros, como os gases nobres, permanecem na atmosfera.

Os radionuclídeos liberados em efluentes líquidos são, normalmente, diluídos em grandes volumes e dispersados pe

* Por Ciclo do Combustível Nuclear, considerar-se-á, neste trabalho, Ciclo do Combustível Nuclear Urânio para reatores que utilizam urânio enriquecido.

lo fluxo d'água do corpo receptor. Entretanto, a atividade biológica dos organismos aquáticos, os sedimentos e as partículas em suspensão na água poderão agir como acumuladores de radionuclídeos.

O consumo, pelo homem, de produtos vegetais e animais contaminados radioativamente e a inalação de materiais radioativos podem levar à fixação de radionuclídeos em órgãos do corpo, provocando irradiação interna. Outros radionuclídeos não incorporados biologicamente, assim como aqueles presentes em rejeitos sólidos, podem apresentar perigos potenciais para o homem, devido à irradiação externa.

Para controlar as liberações de materiais radioativos no meio ambiente e, conseqüentemente, o acréscimo da radioatividade ambiental, torna-se necessário, de acordo com as Normas de Radioproteção, o estabelecimento de um programa de monitoração ambiental, cujos objetivos principais são:

- Avaliar as tendências, a longo prazo, das concentrações de radionuclídeos no ambiente, com o objetivo de detectar eventuais falhas nos procedimentos de controle das liberações e iniciar medidas corretivas;
- Avaliar a dose de radiação real ou potencial recebida pelo homem e estimar os prováveis limites superiores de tais doses;
- Determinar o trajeto real dos contaminantes liberados para o meio ambiente, especialmente com o objetivo de identificar mecanismos de exposição não considerados anteriormente;
- Demonstrar a conformidade dos procedimentos adotados com as regulamentações aplicáveis e exigências legais, relativos à liberação de radionuclídeos no ambiente.

O programa de monitoração ambiental é elaborado com base nas informações da instalação proposta e algumas características ambientais locais e regionais, entre as quais, demografia, meteorologia, hidrologia, ecologia, uso de terras e

águas adjacentes à instalação, hábitos e dietas alimentares da população próxima à instalação. No programa de monitoração ambiental são definidos, entre outras coisas, os tipos de amostras a serem consideradas, os locais de amostragem e medidas e as freqüências de amostragem e medidas.

Visando a sistematizar os trabalhos de avaliação da contaminação radioativa da água nas etapas de produção do combustível nuclear, foi elaborada uma seqüência de procedimentos baseada nas medidas de atividade alfa total e beta total das amostras e nas concentrações máximas permissíveis de radionuclídeos na água, que, se conduzida adequadamente, poderá atender, de maneira mais eficaz e econômica, os requisitos dos programas de monitoração ambiental, exigidos pelos órgãos licenciadores e fiscalizadores.

2. PRINCIPAIS CONTAMINANTES RADIOATIVOS DA ÁGUA NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Nas etapas de produção do combustível nuclear para reatores que utilizam urânio enriquecido, pode-se considerar como possíveis contaminantes radioativos da água todos os radionuclídeos das séries do U-238, Th-232 e U-235 (ver Tabelas 2-1, 2-2 e 2-3). Entretanto, atenção especial é dirigida para alguns desses radionuclídeos, seja por sua maior radiotoxidez, seja por sua maior solubilidade em água ou maior ocorrência em determinada etapa de produção do combustível nuclear. A inclusão da série do Th-232 se deve à freqüente ocorrência desse elemento nas jazidas de urânio.

A Tabela 2-4 mostra os principais contaminantes radioativos da água nas diversas etapas de produção do combustível nuclear (1, 2, 3, 4, 13, 15).

TABELA 2-1 - Série do U-238

NUCLÍDEO	MEIA-VIDA	MAIOR ENERGIA DA RADIAÇÃO (MeV) E INTENSIDADE (*)		
		α	β	γ
$^{238}_{92}\text{U}$	$4,51 \times 10^9$ a	4,15 (25%) 4,20 (75%)	---	---
$^{234}_{90}\text{Th}$	24,1 d	---	0,103 (21%) 0,193 (79%)	0,063c (3,5%) 0,093c (4%)
$^{234}_{91}\text{Pa}^m$	1,17 m	---	2,29 (98%)	0,765 (0,30%) 1,001 (0,60%)
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $^{234}_{91}\text{Pa}$ </div>	6,75 h	---	0,53 (66%) 1,13 (13%)	0,100 (50%) 0,70 (24%) 0,90 (70%)
$^{234}_{92}\text{U}$	$2,47 \times 10^5$ a	4,72 (28%) 4,77 (72%)	---	0,053 (0,2%)
$^{230}_{90}\text{Th}$	$8,0 \times 10^4$ a	4,62 (24%) 4,68 (76%)	---	0,068 (0,6%) 0,142 (0,07%)
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1602 a	4,60 (6%) 4,78 (95%)	---	0,186 (4%)
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,823 d	5,49 (100%)	---	0,510 (0,07%)
$^{218}_{84}\text{Po}$	3,05 m	6,00 (-100%)	0,33 (-0,019%)	---
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $^{214}_{82}\text{Pb}$ </div>	26,8 m	---	0,65 (50%) 0,71 (40%) 0,98 (6%)	0,295 (19%) 0,352 (36%)
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $^{218}_{85}\text{At}$ </div>	~ 2 s	6,65 (6%) 6,70 (94%)	? (-0,1%)	---
$^{214}_{83}\text{Bi}$	19,7 m	5,45 (0,012%) 5,51 (0,008%)	1,0 (23%) 1,51 (40%) 3,26 (19%)	0,609 (47%) 1,120 (17%) 1,764 (17%)
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $^{214}_{84}\text{Po}$ </div>	164 μs 1,3 m	7,69 (100%) ---	---	0,799 (0,014%) 0,296 (80%) 0,795 (100%) 1,31 (21%)
$^{210}_{82}\text{Pb}$	21 a	3,72 (0,00002%)	0,016 (85%) 0,061 (15%)	0,047 (4%)
$^{210}_{83}\text{Bi}$	5,01 d	4,65 (0,00007%) 4,69 (0,00005%)	1,161 (-100%)	---
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $^{210}_{84}\text{Po}$ </div>	138,4 d 4,19 m	5,305 (100%) ---	---	0,803 (0,0011%) ---
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> $^{206}_{81}\text{Tl}$ </div>			1,571 (100%)	---
$^{206}_{82}\text{Pb}$	estável	---	---	---

(*) Refere-se à percentagem de desintegração do próprio radionuclídeo

TABELA 2-2 - Série do Th-232

NUCLÍDEO	META-VIDA	MAIOR ENERGIA DA RADIAÇÃO (MeV) E INTENSIDADE (*)		
		α	β	γ
$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,41 \times 10^{10}$ a	3,95 (24%) 4,01 (76%)	---	---
$^{228}_{88}\text{Ra}$	6,7 a	---	0,055 (100%)	---
$^{228}_{89}\text{Ac}$	6,13 h	---	1,18 (35%) 1,75 (12%) 2,09 (12%)	0,34c (15%) 0,908 (25%) 0,96c (20%)
$^{228}_{90}\text{Th}$	1,910 a	5,34 (28%) 5,43 (71%)	---	0,084 (1,6%) 0,214 (0,3%)
$^{224}_{88}\text{Ra}$	3,64 d	5,45 (6%) 5,68 (94%)	---	0,241 (3,7%)
$^{220}_{86}\text{Rn}$	55 s	6,29 (100%)	---	0,55 (0,07%)
$^{216}_{84}\text{Po}$	0,15 s	6,78 (100%)	---	---
$^{212}_{82}\text{Pb}$	10,64 h	---	0,346 (81%) 0,586 (14%)	0,239 (47%) 0,300 (3,2%)
$^{212}_{83}\text{Bi}$	60,6 m	6,05 (25%) 6,09 (10%)	1,55 (5%) 2,26 (55%)	0,040 (2%) 0,727 (7%) 1,620 (1,8%)
$^{212}_{84}\text{Po}$ (64,0%)	304 ns	8,78 (100%)	---	---
$^{208}_{81}\text{Tl}$ (36,0%)	3,10 m	---	1,28 (25%) 1,52 (21%) 1,80 (50%)	0,511 (23%) 0,583 (86%) 0,860 (12%) 2,614 (100%)
$^{208}_{82}\text{Pb}$	estável	---	---	---

(*) Refere-se à percentagem de desintegração do próprio radionuclídeo

TABELA 2-3 - Série do U-235

NUCLÍDEO	MEIA-VIDA	MAIOR ENERGIA DA RADIAÇÃO (MeV) E INTENSIDADE (*)		
		α	β	γ
$^{235}_{92}\text{U}$ \downarrow $^{231}_{90}\text{Th}$ \downarrow $^{231}_{91}\text{Pa}$ \downarrow $^{227}_{89}\text{Ac}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> $^{227}_{90}\text{Th}$ \uparrow 98,6% \downarrow 1,4% $^{223}_{87}\text{Fr}$ </div> </div> \downarrow $^{223}_{88}\text{Ra}$ \downarrow $^{219}_{86}\text{Rn}$ \downarrow $^{215}_{84}\text{Po}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> $^{211}_{82}\text{Pb}$ \uparrow ~100% \downarrow ,00023% $^{215}_{85}\text{At}$ </div> </div> \downarrow $^{211}_{83}\text{Bi}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> $^{211}_{84}\text{Po}$ \uparrow 0,28% \downarrow 99,7% $^{207}_{81}\text{Tl}$ </div> </div> \downarrow $^{207}_{82}\text{Pb}$	<p>7,1 x 10⁸ a</p> <p>25,5 h</p> <p>3,25 x 10⁴ a</p> <p>21,6 a</p> <p>18,2 d</p> <p>22 m</p> <p>11,43 d</p> <p>4,0 s</p> <p>1,78 ms</p> <p>36,1 m</p> <p>~0,1 ms</p> <p>2,15 m</p> <p>0,52 s</p> <p>4,79 m</p> <p>estável</p>	<p>4,37 (18%) 4,40 (57%) 4,58c (8%)</p> <p>---</p> <p>4,95 (22%) 5,01 (24%) 5,02 (23%)</p> <p>4,86c (0,18%) 4,95c (1,2%)</p> <p>5,76 (21%) 5,98 (24%) 6,04 (23%)</p> <p>5,44 (~0,005%)</p> <p>5,61 (26%) 5,71 (54%) 5,75 (9%)</p> <p>6,42 (8%) 6,55 (11%) 6,82 (81%)</p> <p>7,38 (~100%)</p> <p>---</p> <p>8,01 (~100%)</p> <p>6,28 (16%) 6,62 (84%)</p> <p>7,45 (99%)</p> <p>---</p> <p>---</p>	<p>---</p> <p>0,140 (45%) 0,220 (15%) 0,305 (40%)</p> <p>---</p> <p>0,043 (-99%)</p> <p>---</p> <p>1,15 (~100%)</p> <p>---</p> <p>---</p> <p>0,74 (~,00023%)</p> <p>---</p> <p>---</p> <p>0,29 (1,4%) 0,56 (9,4%) 1,39 (87,5%)</p> <p>---</p> <p>0,60 (0,28%)</p> <p>---</p> <p>1,44 (99,8%)</p> <p>---</p>	<p>0,143 (11%) 0,185 (54%) 0,204 (5%)</p> <p>0,026 (2%) 0,084c (10%)</p> <p>0,027 (6%) 0,29c (6%)</p> <p>0,070 (0,08%)</p> <p>0,050 (8%) 0,237c (15%) 0,31c (8%)</p> <p>0,050 (40%) 0,080 (13%) 0,234 (4%)</p> <p>0,149c (10%) 0,270 (10%) 0,33c (6%)</p> <p>0,272 (9%) 0,401 (5%)</p> <p>---</p> <p>---</p> <p>0,405 (3,4%) 0,427 (1,8%) 0,832 (3,4%)</p> <p>---</p> <p>0,351 (14%)</p> <p>0,570 (0,5%) 0,90 (0,5%)</p> <p>0,897 (0,16%)</p> <p>---</p>

(*) Refere-se à percentagem de desintegração do próprio radionuclídeo

TABELA 2-4 - Principais Contaminantes Radioativos da Água nas Etapas de Produção do Combustível Nuclear

Mineração	Usina de Beneficiamento do Minério	Usina de Conversão a UF ₆	Usina de Enriquecimento	Fábrica de Elementos Combustíveis
Ra-226	Ra-226	U-238	U-238	U-238
Ra-228	Ra-228	Ra-226	U-235	U-235
Pb-210	Pb-210		Ra-226	Ra-226
Th-230	Th-230			
U-238	U-238			
Th-232	Th-232			
Po-210	Po-210			

3. CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS PERMISSÍVEIS E NÍVEIS DE REFERÊNCIA

3.1: Considerações sobre as Vias de Irradiação do Homem, devido a Radionuclídeos Presentes na Água (5, 6, 7, 8)

A experiência tem mostrado que os materiais radioativos liberados no meio ambiente seguem, com poucas exceções, uma série de complexos processos físicos, químicos e biológicos. Alguns desses processos levam a uma diluição progressiva de material liberado; outros a uma reconcentração física ou biológica desse material.

Ao longo de diferentes trajetos, designados "vias de exposição", a radioatividade liberada atinge, finalmente, o homem, provocando irradiação externa e/ou interna. A Figura 3-1 mostra, de forma simplificada, algumas vias de exposição do homem à radiação, devido a radionuclídeos presentes na água(5).

Em uma dada situação, certas vias de exposição predominam sobre as demais, constituindo-se, desta forma, no principal veículo de exposição do homem à radiação. Essas vias de exposição predominantes são chamadas de vias críticas de exposição.

A identificação de vias críticas de exposição permite o estabelecimento de um programa de monitoração ambiental mais eficaz e econômico.

Neste trabalho, considerou-se a ingestão de água como sendo a via crítica de exposição do homem à radiação, em decorrência de radionuclídeos transferidos de instalações do ciclo do combustível nuclear para corpos d'água.

3.2: Categorias de Indivíduos Expostos às Radiações Ionizantes

Na aplicação das Normas de Proteção Radiológica, os indivíduos são classificados, quanto à sua exposição a radiações, em três categorias. Para cada categoria, são estabelecidos limites de dose de radiação e de outras grandezas que se relacionam com a dose de radiação (9, 10).

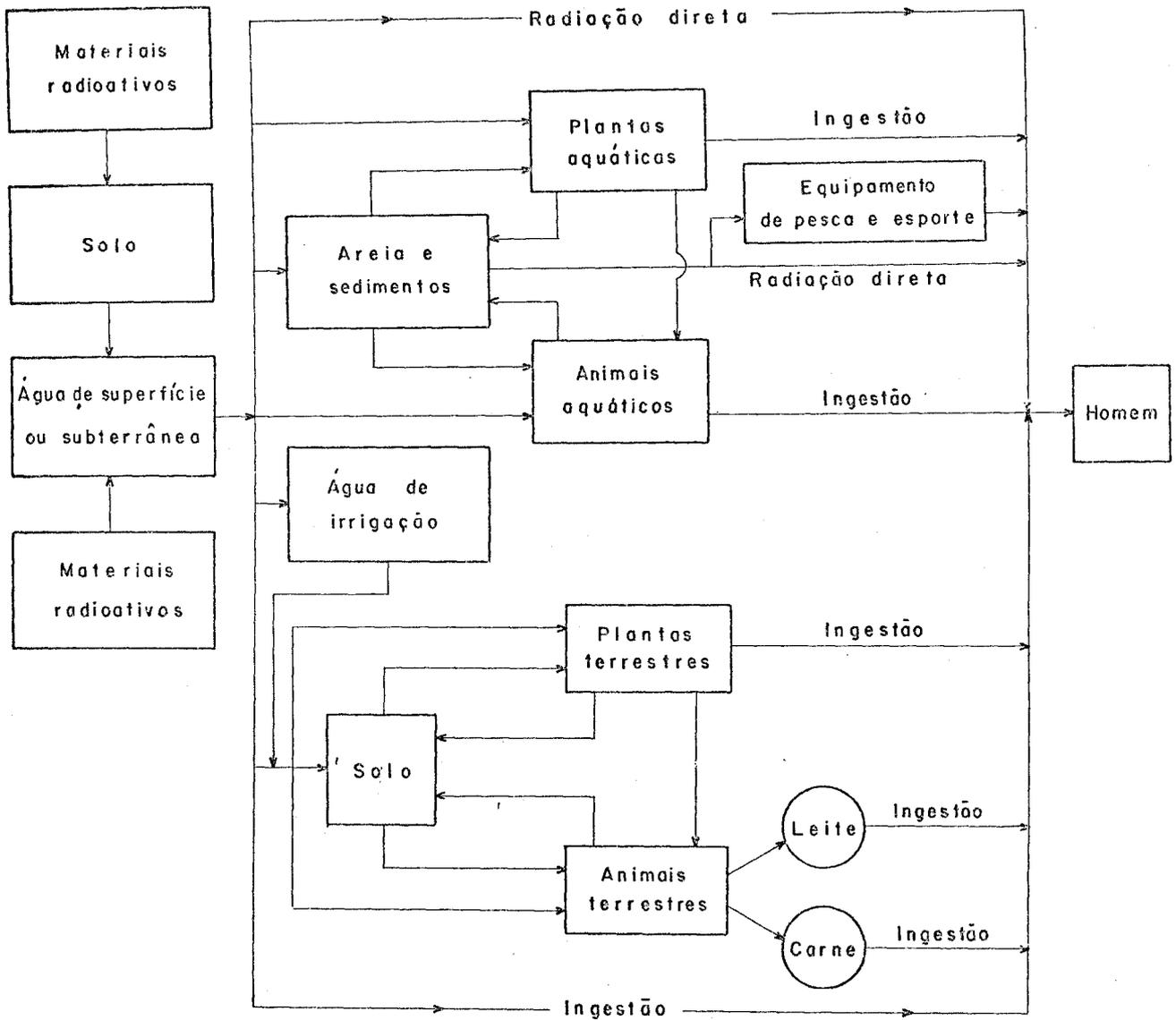


FIGURA 3-1 Vias de Exposição do Homem a Radiações, devido à Presença de Materiais Radioativos em Águas Superficiais e Subterrâneas.

Essas categorias de indivíduos são:

- Categoria A - inclui trabalhadores com exposição ocupacional de 40 h/semana e com exposição ocupacional contínua de 168 h/semana.
- Categoria B - compreende os seguintes grupos de indivíduos:
 - . B(a) - indivíduos que trabalham nas vizinhanças de áreas controladas e cujas atividades não envolvem, normalmente, exposição à radiação. São, por exemplo, os empregados que trabalham em áreas administrativas de uma instalação nuclear;
 - . B(b) - indivíduos que entram, ocasionalmente, em áreas controladas no curso do seu trabalho, mas que não são classificados como trabalhadores com exposição ocupacional. São, por exemplo, os empregados que fazem manutenção elétrica, hidráulica, mecânica, etc., em áreas controladas de uma instalação nuclear;
 - . B(c) - Indivíduos do público que moram nas vizinhanças de áreas controladas.
- Categoria C - compreende a população, em geral.

3.3. Concentrações Máximas Permissíveis* de Radionuclídeos na Água, para as diversas Categorias de Indivíduos (9, 10)

Para assegurar a proteção radiológica do homem no seu meio ambiente, são definidos limites de concentração de radionuclídeos para as diversas categorias de indivíduos.

As concentrações máximas permissíveis (CMP) são determinadas a partir das incorporações máximas permissíveis (9, 10, 16).

* As Normas Básicas de Proteção Radiológica, Resolução CNEN-6/73, usam os termos "concentração derivada do trabalho", quando aplicada à categoria "trabalhadores" e "limites de concentração" para as demais categorias de indivíduos.

A Tabela 3-1 mostra as concentrações máximas permissíveis dos principais contaminantes radioativos potenciais da água nas etapas de produção do combustível nuclear, para as diversas categorias de indivíduos expostos à radiação.

Considerando-se uma mistura conhecida de radionuclídeos, a concentração máxima permissível será calculada pela equação:

$$\frac{1}{\text{CMP}_{\text{mistura}}^x} = \sum \frac{f_k}{\text{CMP}_k^x} \quad (10,25)$$

onde:

$\text{CMP}_{\text{mistura}}^x$ = concentração máxima permissível da mistura de radionuclídeos no órgão x

f_k = fração da concentração do radionuclídeo k na mistura

CMP_k^x = concentração máxima permissível do radionuclídeo k no órgão x.

3.4. Níveis de Referência

Na avaliação da contaminação radioativa da água, podem ocorrer situações em que os valores de concentração de radionuclídeos variam, desde valores não detectados, até valores acima dos permitidos por normas de proteção radiológica, oferecendo, desta forma, diferentes riscos potenciais para o homem e o ambiente aquático.

A ICRP-26 (11) introduz o conceito de níveis de referência. Tais níveis podem ser aplicados a qualquer parâmetro a ser medido na execução de programas de proteção radiológica.

Um nível de referência não é um limite e sim um valor usado para determinar o conjunto de providências a serem tomadas, quando o valor do parâmetro medido excedeu ou caso possa vir a exceder o nível de referência especificado.

A ação a ser iniciada, após a avaliação da contaminação, pode variar, desde o simples registro de informações, até medidas de intervenção, dependendo do valor do parâmetro medido.

A Tabela 3-1 mostra as concentrações máximas permissíveis dos principais contaminantes radioativos potenciais da água nas etapas de produção do combustível nuclear, para as diversas categorias de indivíduos expostos à radiação.

Considerando-se uma mistura conhecida de radionuclídeos, a concentração máxima permissível será calculada pela equação:

$$\frac{1}{\text{CMP}_{\text{mistura}}^x} = \sum \frac{f_k}{\text{CMP}_k^x} \quad (10,25)$$

onde:

$\text{CMP}_{\text{mistura}}^x$ = concentração máxima permissível da mistura de radionuclídeos no órgão x

f_k = fração da concentração do radionuclídeo k na mistura

CMP_k^x = concentração máxima permissível do radionuclídeo k no órgão x.

3.4. Níveis de Referência

Na avaliação da contaminação radioativa da água, podem ocorrer situações em que os valores de concentração de radionuclídeos variam, desde valores não detectados, até valores acima dos permitidos por normas de proteção radiológica, oferecendo, desta forma, diferentes riscos potenciais para o homem e o ambiente aquático.

A ICRP-26 (11) introduz o conceito de níveis de referência. Tais níveis podem ser aplicados a qualquer parâmetro a ser medido na execução de programas de proteção radiológica.

Um nível de referência não é um limite e sim um valor usado para determinar o conjunto de providências a serem tomadas, quando o valor do parâmetro medido excedeu ou caso possa vir a exceder o nível de referência especificado.

A ação a ser iniciada, após a avaliação da contaminação, pode variar, desde o simples registro de informações, até medidas de intervenção, dependendo do valor do parâmetro medido.

Tabela 3-1 - Concentrações Máximas Permissíveis, em Água Potável, dos Principais Contaminantes Radioativos nas Etapas de Produção do Combustível Nuclear

Radionuclídeo	Órgão Crítico	Concentração Máxima Permissível - pCi/l						População em Geral (C)	
		Trabalhadores (A)		Indivíduos do Público (B)			Efeitos Somáticos	Efeitos Genéticos	
		40 h/sem.	168 h/sem.	B(a) e B(b)	B(c)				
^{226}Ra - Sol. Ins.	Ossos	4×10^2	1×10^2	$1,2 \times 10^2$	10	3,3	1		
		9×10^5	3×10^5	$2,7 \times 10^5$	3×10^4	1×10^4	3×10^3		
^{228}Ra - Sol. Ins.	Gastro Intestinal (G.I.)	8×10^2	3×10^2	$2,4 \times 10^2$	3×10	10	3		
		7×10^5	3×10^5	$2,1 \times 10^5$	3×10^4	1×10^4	3×10^3		
^{210}Pb - Sol. Ins.	Rins G.I.	4×10^3	1×10^3	$1,2 \times 10^3$	1×10^2	$3,3 \times 10^2$	10		
		5×10^6	2×10^6	$1,5 \times 10^6$	2×10^5	$6,7 \times 10^4$	2×10^4		
^{232}Th - Sol. Ins.	Ossos G.I.	5×10^4	2×10^4	$1,5 \times 10^4$	2×10^3	$6,7 \times 10^2$	2×10^2		
		9×10^5	3×10^5	$2,7 \times 10^5$	3×10^4	1×10^4	3×10^3		
Th - Sol. Ins.	Ossos G.I.	5×10^4	2×10^4	$1,5 \times 10^5$	2×10^3	$6,7 \times 10^2$	2×10^2		
		1×10^6	4×10^5	3×10^5	4×10^4	$1,3 \times 10^4$	4×10^3		
U - Sol. Ins.	Rins G.I.	2×10^6	6×10^5	6×10^5	6×10^4	2×10^4	6×10^3		
		1×10^6	4×10^5	3×10^5	4×10^4	$1,3 \times 10^4$	4×10^3		
U - Sol. Ins.	G.I. G.I.	8×10^5	3×10^5	$2,4 \times 10^5$	3×10^4	1×10^4	3×10^3		
		8×10^5	3×10^5	$2,4 \times 10^5$	3×10^4	1×10^4	3×10^3		
Po - Sol. Ins.	Baço G.I.	2×10^4	7×10^3	6×10^3	7×10^2	$2,3 \times 10^2$	7×10^1		
		8×10^5	3×10^5	$2,4 \times 10^5$	3×10^4	1×10^4	3×10^3		

O estabelecimento de níveis de referência resulta em uma simplificação considerável na execução de programas de monitoração radioativa, uma vez que, em muitas situações, as medições realizadas no âmbito desses programas apresentam valores muito baixos, que não justificam um estudo detalhado dos contaminantes (11).

Seguindo, então, as recomendações dos órgãos normativos nacionais e internacionais, podem-se definir faixas de concentração de radionuclídeos, classificadas em níveis de referência, estabelecidas a partir dos limites de incorporação anual, através de procedimentos adequados (12).

Devido a dificuldades de avaliação da contaminação interna, a ICRP-26 (11) recomenda que os níveis de referência sejam estabelecidos para parâmetros medidos diretamente no ambiente, e que tais procedimentos devem implicar em virtual certeza no cumprimento dos limites de incorporação anual (9, 10, 11, 12).

Seguindo esta filosofia, procurar-se-á desenvolver, neste trabalho, uma maneira prática de conduzir a avaliação da contaminação radioativa da água, através do estabelecimento de níveis de referência relacionados com a atividade alfa total e beta total e com a concentração de cada contaminante radioativo potencial da água, nas diversas etapas de produção do combustível nuclear.

Nesse contexto, foram definidos os níveis de referência discriminados a seguir:

- Níveis de Registro

Os níveis de registro são valores de atividade alfa total ou beta total de contaminantes radioativos que não justificam o estudo e o controle dos contaminantes presentes. Nos trabalhos de avaliação da contaminação radioativa da água aqui propostos, esses níveis serão apenas registrados para efeitos administrativos e devem ser tratados como zero na avaliação da incorporação anual (11).

- Níveis de Investigação

Os níveis de investigação são valores de atividade alfa total ou beta total de contaminantes radioativos que justificam estudos posteriores, tais como a determinação qualitativa e quantitativa dos contaminantes presentes (11).

- Níveis de Intervenção

São valores de concentração de contaminantes radioativos acima dos valores máximos permissíveis estabelecidos (11).

Embora os detalhes da intervenção sejam dependentes da situação vigente no momento em que é constatada a concentração acima daquela recomendável, a experiência tem mostrado (11) que é freqüentemente útil preestabelecer os níveis de intervenção, pois, se o valor da concentração radioativa não excedeu ou não está previsto que venha a exceder o nível de intervenção, é, então, muito provável que a intervenção seja evitada.

Este trabalho apresenta uma maneira de se efetuar a avaliação da contaminação radioativa da água nas etapas de produção do combustível nuclear, a partir de níveis de referência estabelecidos segundo as faixas de valores de atividade ou concentração radioativa, mostrados a seguir:

NÍVEIS DE REFERÊNCIA	FAIXAS DE VALORES DE ATIVIDADE (A) α TOTAL OU β TOTAL E CONCENTRAÇÃO (C_k) DE RADIONUCLÍDEOS ESPECÍFICOS, EM pCi/l
- Nível de Registro	$A \leq 3/10 \text{ CMP}$
- Nível de Investigação	$A > 3/10 \text{ CMP}$
- Nível de Intervenção	$C_k \geq \text{CMP}_k$

Para a utilização prática desses níveis de referência, foi elaborada a Tabela 3-2, que relaciona os valores da concentração para cada radionuclídeo contaminante potencial da água, nas etapas de produção do combustível nuclear, com os respectivos níveis de referência.

Os valores de CMP adotados como base para o estabelecimento dos níveis de referência (Tabela 3-2) foram aqueles recomendados para a população, levando-se em conta os possíveis efeitos somáticos e genéticos. Desta forma, estamos utilizando dados conservativos, pois, se o indivíduo ou grupo de indivíduos que estiver ingerindo água contendo materiais radioativos pertencer a outra categoria de indivíduos, que não a população, os limites de incorporação permitidos serão maiores.

TABELA 3-2 - Níveis de Referência para Monitoração Radioativa da Água, nas Etapas de Produção do Combustível Nuclear (9, 10, 11, 16, 19)

Radionuclídeo	Ra ²²⁶	Ra ²²⁸	U ²³⁵	U ²³⁸	Pb ²¹⁰	Th ²³⁰	Th ²³²	Po ²¹⁰
Concentração (pCi/l)								
CMP	3,3	10	1x10 ⁴	2x10 ⁴	33	6,7x10 ²	6,7x10 ²	2,3x10 ²
IMD	2x10 ⁻¹ (*)	0,1 (**)	100 (**)	200 (**)	1 (*)	2x10 ⁻¹ (*)	6,7 (**)	1 (*)
NR	2x10 ⁻¹ a 9,9x10 ⁻¹	0,1 a 3	100 a 3x10 ³	200 a 6x10 ³	1 a 9,9	2x10 ⁻¹ a 2x10 ²	6,7 a 2x10 ²	1 a 6,9x10
N.IV	>9,9x10 ⁻¹	>3	>3x10 ³	>6x10 ³	>9,9	>2x10 ²	>2x10 ²	>6,9x10
N.IT	≥3,3	≥10	≥1x10 ⁴	≥2x10 ⁴	≥33	≥6,7x10 ²	≥6,7x10 ²	≥2,3x10 ²

CMP - Concentração Máxima Permissível

IMD - Limite Mínimo de Detecção +

NR - Nível de Registro

N.IV- Nível de Investigação

N.IT- Nível de Intervenção

OBS.: Os valores de CMP adotados foram aqueles sugeridos pelas normas nacionais e internacionais, considerando-se os efeitos somáticos e genéticos. Entretanto, para os radionuclídeos em questão, não se tem o corpo inteiro ou as gônadas como principais órgãos críticos, motivo pelo qual os valores de CMP aqui indicados referem-se à população, considerando os efeitos somáticos.

(*) Valores de IMD recomendados pela U.S. Nuclear Regulatory Commission (15).

(**) Valores de IMD estabelecidos segundo recomendações constantes em BNWL-1723 (26).

+ Para melhor esclarecimento do conceito de limite mínimo de detecção, ver referências (15, 26, 34).

4. PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO A SEREM SEGUIDOS

Os procedimentos de avaliação da contaminação radioativa da água a serem seguidos serão, portanto, definidos a partir das medidas de atividade alfa total e beta total, na seguinte seqüência:

- I. Prepara-se a amostra d'água, segundo técnicas específicas adequadas para a contagem de atividade alfa total e beta total.
- II. Faz-se a contagem alfa total e beta total.
- III. Compara-se a atividade alfa total encontrada com os níveis de investigação dos radionuclídeos emissores alfa considerados para cada etapa de produção do combustível nuclear, na ordem decrescente de criticalidade dos mesmos. Se a atividade alfa total da amostra for menor que o nível de investigação (0,3 CMP) do radionuclídeo mais crítico a ser considerado, é necessário apenas o registro da atividade alfa total encontrada. Entretanto, se a atividade alfa total da amostra for maior que o nível de investigação do radionuclídeo mais crítico a ser considerado, então há necessidade de análises específicas. A comparação subsequente da atividade da amostra com os níveis de investigação dos radionuclídeos considerados em cada caso, indicará a necessidade ou não de análises específicas de outros radionuclídeos.
- IV. Faz-se o mesmo procedimento para a atividade beta total da amostra, quando aplicável.
- V. Para cada radionuclídeo analisado, compara-se a concentração encontrada (C_k) com a CMP_k recomendada (Tabelas 3-1 e 3-2). Se a concentração do radionuclídeo analisado (C_k) for maior que $3/10$ da CMP_k , procede-se conforme o item VI. Se não, procede-se conforme o item VII.

- VI. Se a concentração do radionuclídeo (C_k) for menor que a CMP_k , procede-se conforme o item VII. Se não, procede-se conforme o item IX.
- VII. Calcula-se a concentração da mistura ($\sum C_k$) e a concentração máxima permissível para a mistura ($CMP_{mistura}$), segundo fórmula dada no item 3.3 deste trabalho. Compara-se a concentração da mistura com a $CMP_{mistura}$. Se a concentração da mistura for menor que a $CMP_{mistura}$, procede-se conforme o item VIII. Por outro lado, se a concentração da mistura for maior ou igual à $CMP_{mistura}$, procede-se conforme o item IX.
- VIII. - Registram-se os resultados encontrados.
- Estima-se a dose para população.
- IX. - Registram-se os resultados encontrados.
- Estima-se a dose para população.
- Avisa-se a chefia da instalação para tomar as providências necessárias, de modo a reduzir as concentrações a valores aceitáveis.
- Comunica-se a ocorrência à CNEN e às autoridades sanitárias competentes.

Para fins de utilização prática dos procedimentos de avaliação da contaminação radioativa da água sugeridos neste trabalho, foram elaborados os fluxogramas apresentados nas Figuras 4-1 e 4-2, onde procurou-se mostrar, através da simbologia normalmente utilizada em processamento de dados, todos os passos a serem seguidos na avaliação da contaminação radioativa da água, para as diversas etapas de produção do combustível nuclear.

5. CONCLUSÕES

Os materiais radioativos liberados na água, provenientes das diversas etapas de produção do combustível nuclear urânio, podem comprometer o sistema hidrológico local, oferecendo riscos radiológicos para o homem, considerando-se possível ingestão, por ele, de materiais radioativos, por vias diretas ou indiretas.

Com o objetivo de sistematizar os trabalhos de avaliação da contaminação radioativa da água nas etapas de produção do combustível em apreço, foi elaborada uma seqüência de procedimentos. Essa seqüência é baseada nas medidas de atividades alfa total e beta total e nas concentrações máximas permissíveis de radionuclídeos na água, e, se seguida adequadamente, poderá atender, de maneira mais econômica, às solicitações presentes em programas de monitoração ambiental, necessárias ao cumprimento das exigências dos órgãos nacionais e internacionais, que disciplinam a utilização da energia nuclear.

Segundo os procedimentos de avaliação da contaminação radioativa propostos neste trabalho, a necessidade de análise de radionuclídeos específicos está fundamentada no conceito de níveis de referência. Desta forma, será necessária a análise de um certo radionuclídeo, se a atividade da amostra for superior ao nível de investigação do radionuclídeo em questão; isto é, se a atividade da amostra for maior do que $3/10$ da concentração máxima permissível do referido radionuclídeo. Adotando-se esta filosofia, teremos, certamente, maior confiabilidade no cumprimento dos limites de incorporação por ingestão de materiais radioativos, recomendados pelos órgãos de proteção radiológica nacionais e internacionais.

Para a análise de radionuclídeos específicos, diversos métodos podem ser usados; contudo os métodos devem ser compatíveis com o limite mínimo de detecção requerido para cada caso.

Os métodos de análise de alguns radionuclídeos específicos são, geralmente, complexos e demorados (30). Por outro lado, nos programas de monitoração ambiental há, normal-

mente, um número muito grande de amostras d'água para medidas de atividade. Desta forma, fazendo-se, inicialmente, medidas das atividades alfa total e beta total, obtém-se uma rápida indicação da necessidade ou não de análise de radionuclídeos específicos. Portanto, o método de avaliação da contaminação radioativa da água proposto neste trabalho visa a simplificar e ordenar os procedimentos para avaliação da contaminação radioativa da água ambiental, nas etapas de produção de combustí-vel nuclear.

Como mencionado, considerou-se apenas a avaliação da contaminação radioativa da água potável, durante as etapas de produção de combustível nuclear. Todavia, procedimentos seme-lhantes poderão ser aplicados a outros meios a serem monitoreados e a todas as etapas do ciclo de combustível nuclear.

6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Manual on radiological safety in uranium and thorium mines and mills. Vienna, 1976. (Safety Series = 43)
- (2) IAEA. Atomic Energy Commission. Environmental survey of uranium fuel cycle. Washington, D.C., 1974. (WASH - 1248).
- (3) TSIVOGLU, E. & O'CONNELL, R. L. : Nature volume, and activity of uranium mill wastes. In: SYMPOSIUM ON RADIOLOGICAL HEALTH AND SAFETY IN MINING AND MILLING OF NUCLEAR MATERIALS. Vienna, 26-31 Aug. 1963. Proceedings. Vienna, IAEA, 1964. v.2.
- (4) AMARAL, Eliana C. da Silva. Comportamento de Ra-226 no ambiente aquático da região da mina de urânio, Poços de Caldas, MG. Rio de Janeiro, 1979. (Tese de mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro)
- (5) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Radienuclide release into the environment; assessment of doses to man. Oxford, Pergamon, 1979 (ICRP-29)
- (6) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Principles of environmental monitoring related to the handling of radioactive materials. Oxford, Pergamon, 1965. (ICRP=7)
- (7) ATOMIC INDUSTRIAL FORUM. Standard methodology for calculating radiation dose to lower farm biota. New York, 1975.
- (8) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the ICRP; adopted September 17, 1965. Oxford, Pergamon, 1966. (ICRP=9)
- (9) BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Normas básicas de proteção radiológica. Rio de Janeiro, 1973. (CNEN = Resolução = 6/79)

- (10) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Permissible dose for internal radiation. Oxford, Pergamon, 1959. (ICRP-2)
- (11) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon, 1977 (ICRP-26).
- (12) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Evaluation of radiation doses of body tissues from internal contamination due to occupational exposure. Oxford, Pergamon, 1968. (ICRP-10)
- (13) EICHHOLZ, Geoffrey G. Environmental aspects of nuclear power. Ann Arbor, Mich., Ann Arbor Science, 1976.
- (14) EUA. Nuclear Regulatory Commission. Preparation of environmental reports for nuclear power stations. Washington, D.C., 1976. (Regulatory Guide 4.2 Rev.2)
- (15) EUA. Nuclear Regulatory Commission. Radiological effluent and environmental monitoring at uranium mills. Washington, D.C., 1980. (Regulatory Guide 4.14)
- (16) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Basic safety standards for radiation protection. Vienna, 1967. (Safety Series - 9)
- (17) EUA. Environmental Protection Agency. Environmental radioactivity surveillance guide. Washington D. C., 1972. (ORP/SID - 72-2)
- (18) SYMPOSIUM ON RAPID METHODS FOR MEASURING RADIOACTIVITY IN THE ENVIRONMENT. Neuherberg bei München, 5 - 9 July 1971. Proceedings. ... Vienna, IAEA, 1971.
- (19) EUA. Leis, decretos, etc. Standards for protection against radiation. In: _____. Code of Federal Regulations. Title 10; energy. Washington, D.C., US Government Printing Office, 1979. pt. 20, p. 185-217.
- (20) EUA. Leis, decretos, etc. National primary and secondary ambient air quality standards. In: _____. Code of Federal Regulations. Title 40; protection of environment. Washington, D.C., US Government Printing Office, 1978. pt. 50, p. 4-35.

- (21) HOLTZMAN, R. B. et alii. Contamination of the human food chain by uranium mill tailings piles. Argonne, Il. , Argonne National Laboratory, 1979. (NUREG/CR-0758)
- (22) EUA. Nuclear Regulatory Commission. Emergency action level for nuclear power plants; draft. Washington, D. C., 1979. (NUREG-0610)
- (23) WORLD HEALTH ORGANIZATION. International standards for drinking-water. 3. ed. Geneva, 1971.
- (24) BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Normas de proteção radiológica no ciclo de produção do urânio e tório. Rio de Janeiro, 1975. (Resolução CNEN-01/75)
- (25) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Radiation protection in uranium and other mines. Oxford, Pergamon, 1977. (ICRP-24)
- (26) CORLEY, J. P. et alii. Environmental surveillance for fuel fabrication plants. Richland, Washington, Battelle Pacific Northwest Laboratories, 1973. (BNWL-1723)
- (27) EUA. Nuclear Regulatory Commission. Fuel Processing and Fabrication Branch. Branch position for preoperational radiological environmental monitoring program for uranium mills. Washington, D.C., 1978.
- (28) EUA. Department of Health Education and Welfare Public Health Service. Radiological health handbook. Washington, Superintendent of Documents, Government Printing Office, 1970.
- (29) NÓBREGA, Armi W. . Análise do impacto ambiental do complexo industrial de Poços de Caldas. Rio de Janeiro, Nuclebrás, 1978.
- (30) EUA. Environmental Protection Agency. National Environmental Research Center. Tentative reference method for the measurement of gross alpha and gross beta radioactivities in environmental waters. Las Vegas, 1975. (EPA-680/4 - 75 - 005)

- (31) STANDARD methods for the examination of water and waste water. 13. ed. Washington, D.C., American Public Health Association, 1971.
- (32) STANDARD methods for the examination of water and waste water. 14. ed. Washington, D.C., American Public Health Association, 1976.
- (33) HARLEY, J. H. et alii. Beta scintillation counting with thin plastic phosphors. Nucleonics, 20 (1): 59 - 61, Jan. 1962.
- (34) HARLEY, John H. ed. HASL procedures manual. New York, USAEC Health and Safety Laboratory, 1972. (HASL-300)
- (35) EBERLINE INSTRUMENT. Products services for the nuclear industry. Santa Fé, New Mexico, s.d.
- (36) CAMPOS, M. M. & PEREIRA, M. T. Curso de proteção radiológica. Belo Horizonte, Nuclebrás, CDTN, 1978.
- (37) ORTEC. Semiconductor detectors and associated electronics; laboratory manual A. 2. ed. Oak Ridge, Tenn., 1968.
- (38) HOMMA, Y. & MURAKAMI, Y. . Study of the applicability of the integral counting method for the determination of Ra-226 in various sample forms using a liquid scintillation counter. Journal of Radioanalytical Chemistry, 36 (1): 173-84, 1977.
- (39) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Tentative test method for radium-226 in water. Philadelphia, 1975. (ASTM-D-354)
- (40) GOLDIN A. S. . Determination of dissolved radium. Analytical Chemistry, 33: 406-9, March, 1961.
- (41) DARRALL, K. G. et alii. An emanation method for determining radium using liquid scintillation counting. Analyst, 98 (1969): 610-5, Aug. 1973.
- (42) MASTINU, G. G. . An emanation apparatus with simple operational procedure for measurements of low levels of Ra-226. Health Physics, 28 (2): 97-100, Fev., 1975.

- (43) JACOBI, R. B. . The determination of radon and radium in water. J. Chem. Soc.: S 314-18, 1949.
- (44) POMANSKII, A. A. et alii. Determination of ultramicro-quantities of Ra-226 in various substances. Soviet Atomic Energy, 27 (1): 718-20, July, 1969.
- (45) BUNKER, C. M. & BUSH, C. A. . Uranium, thorium and radium ray spectrometer (0.148-0.352 million electron volts.). Geological Survey Professional Paper, 550-B: B176-81.
- (46) RILEY, J. P. et alii. Determination of the radioelements, uranium-238, uranium-235 and thorium and their decay products. In: RILEY, J. P. & SKIRROW, G. ed. Chemical oceanography. London, Academic Press, 1975. V.3, p. 431-7.
- (47) SILL, Claude W. Simultaneous determination of U-238, Th-230, Ra-226, and Pb-210 in uranium ores, dusts, and mill tailings. Health Physics, 33(5): 393 - 404, May, 1977.
- (48) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Measurement of low-level radioactivity. June 1, 1972. Washington, D.C. (ICRU Report 22).
- (49) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Monitoring of radioactive contamination on surfaces. Vienna, 1970 (Technical Reports Series, 120).