



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

ESTIMATIVA DA DOSE DE RADIAÇÃO NOS INDIVÍDUOS DO
PÚBLICO EM VIRTUDE DA EVENTUAL LIBERAÇÃO DE
URÂNIO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Ana Maria Pinho Leite GORDON e Vanusa Maria Feliciano JACOMINO

IPEN - PUB - 283

PUBLICAÇÃO IPEN 283

DEZEMBRO/1989

SÃO PAULO

**ESTIMATIVA DA DOSE DE RADIAÇÃO NOS INDIVÍDUOS DO
PÚBLICO EM VIRTUDE DA EVENTUAL LIBERAÇÃO DE
URÂNIO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Ana Maria Pinho Leite GORDON e Vanusa Maria Feliciano JACOMINO

DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

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

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

C55.00

DOSE EQUIVALENTS

LIQUID WASTES

URANIUM

IPEN - Doc - 3492

Publicação aprovada pela CNEN em 08/04/89.

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

**ESTIMATIVA DA DOSE DE RADIAÇÃO NOS INDIVÍDUOS DO
PÚBLICO EM VIRTUDE DA EVENTUAL LIBERAÇÃO DE URÂNIO
EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.**

**Ana Maria Pinho Leite GORDON e Vanusa Maria
Feliciano JACOMINO**

**DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA
(NP)**

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

**ESTIMATIVA DA DOSE DE RADIAÇÃO NOS INDIVÍDUOS
DO PÚBLICO EM VIRTUDE DA EVENTUAL LIBERAÇÃO
DE URÂNIO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.**

Ana Maria Pinho Leite GORDON e Vanusa Maria
Feliciano JACOMINO

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - BRASIL .

RESUMO

Algumas instalações do IPEN-CNEN/SP geram efluentes líquidos contendo urânio. A Divisão de Monitoração Ambiental desta Instituição analisa estes efluentes pelos métodos de fluorimetria ou espectrofotometria que, após autorização para descarga, são eliminados no meio ambiente. No ano de 1988 foi eliminada uma atividade total $3,66 \times 10^9$ Bq de urânio num volume total de aproximadamente 30 m^3 . No presente trabalho foi feita a estimativa da dose equivalente efetiva nos indivíduos do público partindo-se de uma hipótese conservativa em que foi suposto que todo o efluente líquido contendo urânio gerado pelas instalações do IPEN-CNEN/SP, após autorização para descarga, são liberados diretamente no solo e daí para o lençol freático. O cálculo da dose foi feito utilizando-se um modelo genérico que descreve o transporte dos radionuclídeos em águas subterrâneas. Foi suposto que a via possível de contaminação é a ingestão de água por meio de poços hipotéticos existentes ao redor do IPEN. Foram usados valores restritivos dos parâmetros que caracterizam o aquífero local, tais como: dispersividade longitudinal e vertical, porosidade efetiva do solo, condutividade hidráulica, etc., de forma a se superestimar o resultado final da dose equivalente efetiva. O valor encontrado foi de $5,3 \times 10^{-10}$ mSv/ano, menor que o limite de dose para indivíduos do público estipulado pelas Normas de Proteção Radiológica. A partir deste modelo determinou-se também o limite derivado de descarga, cujo valor encontrado foi $3,6 \times 10^{13}$ Bq/ano.

**EVALUATION OF THE EFFECTIVE EQUIVALENT DOSE IN
THE GENERAL PUBLIC DUE TO THE DISCHARGE OF
URANIUM IN GROUNDWATER**

Ana Maria Pinho Leite GORDON e Vanusa Maria
Feliciano JACOMINO

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05499 - São Paulo - BRASIL.

ABSTRACT

Some facilities available at IPEN-CNEN/SP may discharge uranium in their liquid effluents. The uranium contents of these effluents are analyzed by photometry or fluorimetry, and according to the results obtained a decision is made, by the Environmental Monitoring Division, upon their discharge to the environment. In 1988 a total activity of 3.66×10^9 Bq of uranium was discharged in a volume of approximately 30 m^3 . The effective equivalent dose in the general public was evaluated by making a conservative assumption that all the liquid effluents containing uranium are discharged directly to the soil reaching the groundwater. The dose calculation was carried out by using a generic model which describes the transport of radionuclides in the groundwater. In order to be conservative it was also assumed that the critical pathway is the direct ingestion of water through hypothetical wells around the Institute. Conservative assumptions were also made in the characterization of the local aquifer parameters such as vertical and longitudinal dispersivity, effective porosity of the soil, hydraulic conductivity etc., in order to overestimate the effective equivalent dose. The result obtained, of 5.3×10^{-10} mSv/a, is far below the dose limit for the public adopted by the Radiological Protection Board. The derived limit for the discharge was also evaluated, using the same model, giving a result of 3.6×10^{13} Bq/a.

1. INTRODUÇÃO

Quando se liberam materiais radioativos líquidos no meio ambiente existem numerosas vias que podem conduzir à irradiação do público. Estes materiais podem sofrer uma série de processos que levam a sua diluição ou concentração até chegarem ao homem. Desta maneira não é seguro limitar a eliminação de material radioativo no ambiente fixando-se valores máximos de concentração ou atividade no ponto de descarga de efluentes, como era feito anteriormente com base nas normas internacionais da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR) de 1966⁽¹¹⁾ e da Agência Internacional de Energia Atômica⁽⁸⁾ de 1967. Estas normas estabeleciam que os limites de descarga eram tomados como uma fração da concentração máxima permissível, para cada radionuclídeo, na água potável. No entanto, não eram considerados os fenômenos de diluição e concentração que ocorrem na natureza desde o ponto de descarga até alcançar o homem. Deixava também de considerar que o grupo crítico (indivíduos do público que podem receber maior dose) poderia estar exposto a outras fontes de radiação liberadas no meio ambiente.

Atualmente de acordo com a nova filosofia de proteção radiológica⁽¹²⁾ os seguintes critérios devem ser levados em conta ao se fixar os limites de descarga de efluentes no meio ambiente :

- a) os limites de dose nos indivíduos do público não devem ser excedidos. Para a determinação dos limites de descarga devem ainda ser levados em conta :
 - a.1) os diferentes caminhos críticos percorridos pelo material radioativo desde a descarga até alcançar o grupo crítico e portanto a dose recebida devido à transferência dos radionuclídeos em cada um desses caminhos

- a.2) a presença de todos os pontos de descarga dentro de uma mesma instalação com caminhos críticos diferentes que levam ao mesmo grupo crítico
 - a.3) se existem outras instalações que liberando material radioativo podem expor o mesmo grupo crítico
 - a.4) o tempo de trânsito do material radioativo até chegar ao grupo crítico, em virtude do possível decaimento radioativo para o cálculo da dose recebida
- b) a descarga de material radioativo deve ser otimizada , isto é, as doses de radiação devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, princípio ALARA.

O critério b) está relacionado com a proteção da instalação e refere-se à adoção de um nível de descarga tal que o benefício obtido por uma posterior redução na irradiação da população resultante da liberação seja menos relevante do que as medidas de proteção da própria instalação necessárias para alcançá-lo.

Este critério é uma etapa da proteção radiológica onde a mesma, uma vez satisfeito os critérios que constam do item a), procura pelo binômio descarga-proteção obter um limite otimizado levando em conta ainda outras opções potenciais. Este limite representa a melhor proteção, isto é , menor dose no grupo crítico e máxima descarga possível. Para tanto devem ser levados em consideração, além dos custos propriamente ditos de proteção e de detrimento biológico , fatores sócio-econômicos assim como éticos e políticos quando o caso o exigir.

A avaliação de qualquer descarga de material radioativo no meio ambiente inclui como uma primeira etapa uma análise do tipo, quantidade e forma química e física dos radionuclídeos a serem liberados. Estes dados constituirão o que se chama termo-fonte. Também são necessárias informações sobre as características ambientais do meio receptor tais como: condições meteorológicas e climáticas, hidrologia, geologia etc., além de fatores sócio-econômicos a saber: distribuição populacional, uso e ocupação do solo, uso das águas etc.

Obtendo-se as informações acima citadas e com o uso de modelos adequados é possível identificar as vias críticas de irradiação e o grupo crítico. Com estes dados estabelece-se uma relação entre a concentração em Bq/L de um dado radionuclídeo que poderá ser liberado no meio ambiente e a dose de radiação recebida pelos indivíduos do público. A seguir visando satisfazer o requisito comentado no item a) calcula-se o limite de descarga derivado que é definido como: a atividade anual de material radioativo de composição especificada liberada num dado sítio, a qual resultará numa dose equivalente efetiva comprometida⁽⁹⁾ no grupo crítico igual ao limite de dose recomendado pelas Diretrizes Básicas de Radioproteção⁽³⁾ da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

As instalações do IPEN-CNEN/SP a saber: Conversão de Urânio, Metalurgia Nuclear e o Laboratório Experimental de Produção de Elemento Combustível geram efluentes líquidos que contêm principalmente urânio. A Divisão de Monitoração Ambiental (NPA) desta Instituição analisa o conteúdo radioativo destes efluentes, pelos métodos de espectrometria gama, espectrofotometria e fluorimetria controlando a sua liberação para o meio ambiente.

O objetivo deste trabalho é identificar as vias críti

cas de transferência e o grupo crítico para a liberação de urânio conforme citado anteriormente. Em seguida, avaliar a dose de radiação no grupo crítico a partir dos resultados obtidos pelas medidas radiométricas utilizando um modelo que descreva o transporte dos radionuclídeos em águas subterrâneas. Além disto, usando este mesmo modelo será determinado o limite de descarga que satisfaça os critérios contidos no item a) discutido anteriormente.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES CONTENDO URÂNIO.

2.1. Produção de Efluentes nas Instalações do Projeto Conversão.

O projeto de conversão do concentrado de urânio em UF_6 adotado no IPEN-CNEN/SP, compreende as seguintes etapas: dissolução do concentrado de urânio, purificação por extração com solventes, precipitação do diuranato de amônio de amônio (DUA), conversão à UO_3 seguida de redução à UO_2 , fluoretação à UF_4 , e finalmente fluoração do tetrafluoreto à UF_6 ⁽⁶⁾.

2.1.1. Caracterização dos Efluentes Gerados no Setor de Purificação, Precipitação e Produção de UF_4 .

Na fase de purificação parte-se do concentrado de urânio obtendo-se uma solução de nitrato de urânio nuclearmente puro. A seguir é realizada a fase de precipitação deste nitrato de urânio com gás de amônia, obtendo-se diuranato de amônio nuclearmente puro. As etapas posteriores compreendem filtração do DUA e calcinação obtendo-se UO_3 . Este UO_3 é reduzido a UO_2 e em seguida hidrofluoretado para obtenção do UF_4 . A geração de efluente líquido ocorre no setor de purificação, proveniente do tratamento da fase aquosa da coluna de extração de urânio ^(4,14). Neg

tes efluentes podemos eventualmente encontrar urânio na forma de DUA. Tem-se ainda a produção de efluente líquido no setor de precipitação de DUA nuclearmente puro onde o filtrado, solução de nitrato de amônio $\text{NH}_4 (\text{NO}_3)$, é succionado para um tanque de retenção e em seguida bombeado para um tanque de decantação. Neste filtrado, eventualmente pode haver um arraste de urânio na forma química de DUA ^(4,14).

Ainda tem-se a produção de UF_4 pelo método da via úmida que parte do UO_2 em pó juntamente com uma solução de ácido fluorídrico (50%) obtendo-se UF_4 .

Na produção de UF_4 pela via úmida tem-se também um outro ponto de liberação de efluente líquido quando os vapores de ácido fluorídrico (HF) são succionados para a torre de lavagem de gases localizada na parte externa da usina. Neste ponto eventualmente pode-se ter arraste de urânio tanto na forma de UO_2 como UF_4 na água de lavagem da torre.

2.1.2. Caracterização dos Efluentes Gerados no Setor de Produção de UF_6 e no Setor de Transferência de UF_6 .

As instalações do projeto de produção de UF_6 parte do UF_4 sólido juntamente com flúor (F_2) na forma gasosa em co-corrente dentro de um reator de chama obtendo-se UF_6 . Nesta unidade não há liberação de efluente líquido.

No setor de transferência o UF_6 de cilindros grandes para cilindros pequenos (em fase experimental) tem-se a geração de efluente líquido que é proveniente do óleo de bomba de refrigeração da linha de transferência. Nesta amostra pode-se eventualmente encontrar traços de UF_6 .

2.2 Caracterização dos Efluentes Gerados no Setor de Metalurgia Nuclear.

Os processos e análises referentes à metalurgia nuclear no âmbito do IPEN-CNEN/SP são desenvolvidos pelos grupos do Projeto Combustível Nuclear e Projeto Urânio Metálico e pelo Departamento de Metalurgia Nuclear.

As instalações do setor de Metalurgia Nuclear do IPEN compreendem uma usina piloto para fabricação, desenvolvimento e controle de qualidade de elementos combustíveis. Isto implica na fabricação, usinagem e controle de qualidade de "briquetes" de U_3O_8 e pastilhas de UO_2 além de fornecimento de elemento combustível para o reator IEA-R1.

Este setor também realiza a caracterização microestrutural das ligas metálicas, análise e controle de qualidade de pós cerâmicos, análise de propriedades mecânicas de materiais metálicos, ensaios com ligas de urânio, testes de fadiga etc..

Em cada um destes processos são gerados efluentes líquidos provenientes principalmente da descontaminação das peças dos equipamentos e áreas de trabalho. Tem-se ainda a geração de efluentes líquidos proveniente do óleo que é utilizado para refrigeração das máquinas de corte e usinagem das barras de urânio metálico.

Nos efluentes líquidos citados pode-se encontrar urânio em diferentes formas químicas, dependendo da origem da coleta do efluente, tais como: diuranato de amônio (DUA), tricarbonato de urânio (TCAU), U_3O_8 , UO_2 , UF_4 .

2.3 Caracterização dos Efluentes Líquidos Gerados no Laboratório Experimental de Produção de Combustível.

Neste Laboratório é feito o encapsulamento das pastilhas de UO_2 , urânio enriquecido no máximo a 6%, em varetas de aço inoxidável. A seguir as varetas são introduzidas em suportes, também de aço inoxidável obtendo-se o combustível nuclear para a unidade crítica, reator IPEN-MB-01 situado no "campus" do IPEN-CNEN/SP.

Nesta operação é gerado material particulado em quantidade desprezível que eventualmente pode se depositar no chão do Laboratório, nas peças dos equipamentos, luvas e roupas dos trabalhadores. O efluente líquido advém do processo de lavagem da área de trabalho, das peças dos equipamentos e do vestuário.

3. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL

Este Capítulo apresenta informações básicas a respeito da localização do IPEN assim como distribuição populacional; uso do solo e água, hidrologia, climatologia e geologia da região em torno do "campus" do IPEN relevantes para a estimativa da dose equivalente comprometida efetiva calculada neste trabalho. Estas informações foram extraídas da literatura (7,13).

3.1. Localização do IPEN-CNEN/SP.

O IPEN-CNEN/SP está localizado no "campus" da Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira", Bairro do Butantã, cidade de São Paulo, Estado de São Paulo de 524.000 m² no "campus" da Cidade Universitária (5.000.000 m²).

3.2. 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.

3.3 Uso do Solo e Água

3.3.1 Uso do Solo

A utilização do solo nas proximidades do IPEN-CNEN/SP, bem como a sua ocupação, destina-se exclusivamente para fins urbanos, constituindo-se basicamente de áreas residenciais, industriais e comerciais.

As áreas destinadas à produção pecuária e hortifruti-granjeira localizam-se a mais de 60 km do IPEN-CNEN/SP no chamado "cinturão verde".

3.3.2 Uso da Água.

O principal corpo de água superficial localizado nas imediações do IPEN-CNEN/SP é o rio Pinheiros, que tem o seu escoamento controlado visando o abastecimento dos reservatórios Billings e rio das Pedras⁽¹³⁾.

De acordo com o Decreto Estadual nº 10755 de 22 de novembro de 1977⁽⁷⁾, o rio Pinheiros é enquadrado como classe 4. O rio não possui fauna possível de ser incorporada à dieta da população e suas águas não têm condições de serem usadas para o consumo ou para irrigação de vegetais.

O rio Pinheiros e os reservatórios Billings e rio das Pedras abastecem grande parte do complexo urbano e industrial da Grande São Paulo, estando interligados ao sistema energético de Cubatão.

TABELA 1

TOTALIZAÇÃO DA POPULAÇÃO EM TORNO DO IPEN POR SETORES E CÍRCULOS CONCÊNTRICOS.

SETOR	CÍRCULOS CONCÊNTRICOS							TOTAL SETOR
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	
N	1.680	2.690	4.553	4.553	3.072	11.100	23.625	49.371
NNE	1.680	5.218	5.076	5.076	6.930	12.307	9.721	46.161
NE	1.680	5.218	5.456	5.456	19.472	30.584	34.227	103.634
ENE	1.680	5.218	7.581	7.581	27.404	48.892	44.595	142.793
E	1.680	5.218	8.683	8.683	25.547	28.265	41.585	123.983
ESE	1.680	5.218	7.733	7.733	13.914	28.129	46.392	113.114
SE	1.680	5.040	6.797	6.797	11.491	10.783	28.167	73.391
SSE	1.680	5.596	7.786	7.786	10.408	11.004	13.264	60.742
S	1.736	5.870	8.158	8.158	14.326	17.582	18.940	77.915
SSW	1.807	5.870	8.420	8.420	12.262	14.274	17.987	71.274
SW	1.846	5.870	9.750	9.750	5.990	8.664	11.640	56.148
WSW	1.846	5.870	9.750	9.750	4.944	6.576	9.510	52.240
W	1.818	5.870	9.750	9.750	13.900	17.589	20.765	82.200
WNW	1.714	5.870	9.280	9.280	14.332	17.589	20.765	80.847
NN	1.680	3.929	6.537	6.537	14.264	17.589	20.765	73.693
NNW	1.680	3.500	5.814	5.814	9.118	18.259	19.366	65.468
TOTAL CÍRCULOS	27.567	82.065	121.124	153.101	207.375	299.186	381.314	1.272.947

3.4 Hidrologia

3.4.1 Águas Superficiais

O IPEN-CNEN/SP localiza-se entre o córrego do Jaguaré e o rio Pirajussara, que são afluentes do rio Pinheiros . Este por sua vez, está canalizado artificialmente para a Região Sul de Santo Amaro, desembocando no reservatório Billings.

O rio Pinheiros tem uma vazão média de $70 \text{ m}^3/\text{s}$, podendo chegar até $280 \text{ m}^3/\text{s}$ com 1,2 bilhões de metros cúbicos de capacidade.

3.4.2 Águas Subterrâneas

As ocorrências de águas subterrâneas no âmbito da Bacia de São Paulo podem ser individualizadas segundo critérios geológicos em duas grandes unidades aquíferas: o aquífero sedimentar representado pelos sedimentos terciários da Bacia, e o aquífero cristalino representado pelo conjunto das rochas pré-cambrianas aflorantes ao redor da Bacia. A espessura da porção saturada correspondente à região do bairro do Butantã e Pinheiros varia de 10 até 50 metros e os níveis piezométricos variam entre as cotas 720 e 750 m.

De acordo com dados fornecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), o coeficiente de transmissividade obtido em 8 testes de bombeamento variou de 17 a $70 \text{ m}^2/\text{dia}$ com valor médio de $50 \text{ m}^2/\text{dia}$.

A grande variação dos parâmetros hidrológicos pode estar associada à diversidade de tipos litológicos ora lápticos ora arenosos e a configuração geométrica muito irregular do aquífero.

De acordo com sondagens realizadas no "campus" do IPEN-CNEN/SP o lençol freático encontra-se em torno de 7,0 metros abaixo da superfície do terreno originando-se principalmente da infiltração pluviométrica.

A drenagem natural das águas subterrâneas no IPEN-CNEN/SP faz-se no sentido da confluência do canal artificial do córrego do Jaguaré, com o rio Pinheiros (vide Figura 1).

Em estudo realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas ficou constatado que as águas da região do IPEN-CNEN/SP correm paralelas ao velho curso do córrego do Jaguaré, na direção da raia olímpica da Cidade Universitária e por fim para o rio Pinheiros. O gradiente hidráulico varia de montante para jusante de $8,0 \cdot 10^{-3}$ a $2,3 \cdot 10^{-3}$. A velocidade da água determinada através de técnicas radioisotópicas é de 3,1 cm/dia.

3.5 Clima

O clima da região é tropical temperado, com período seco no inverno, e um período de chuva no verão.

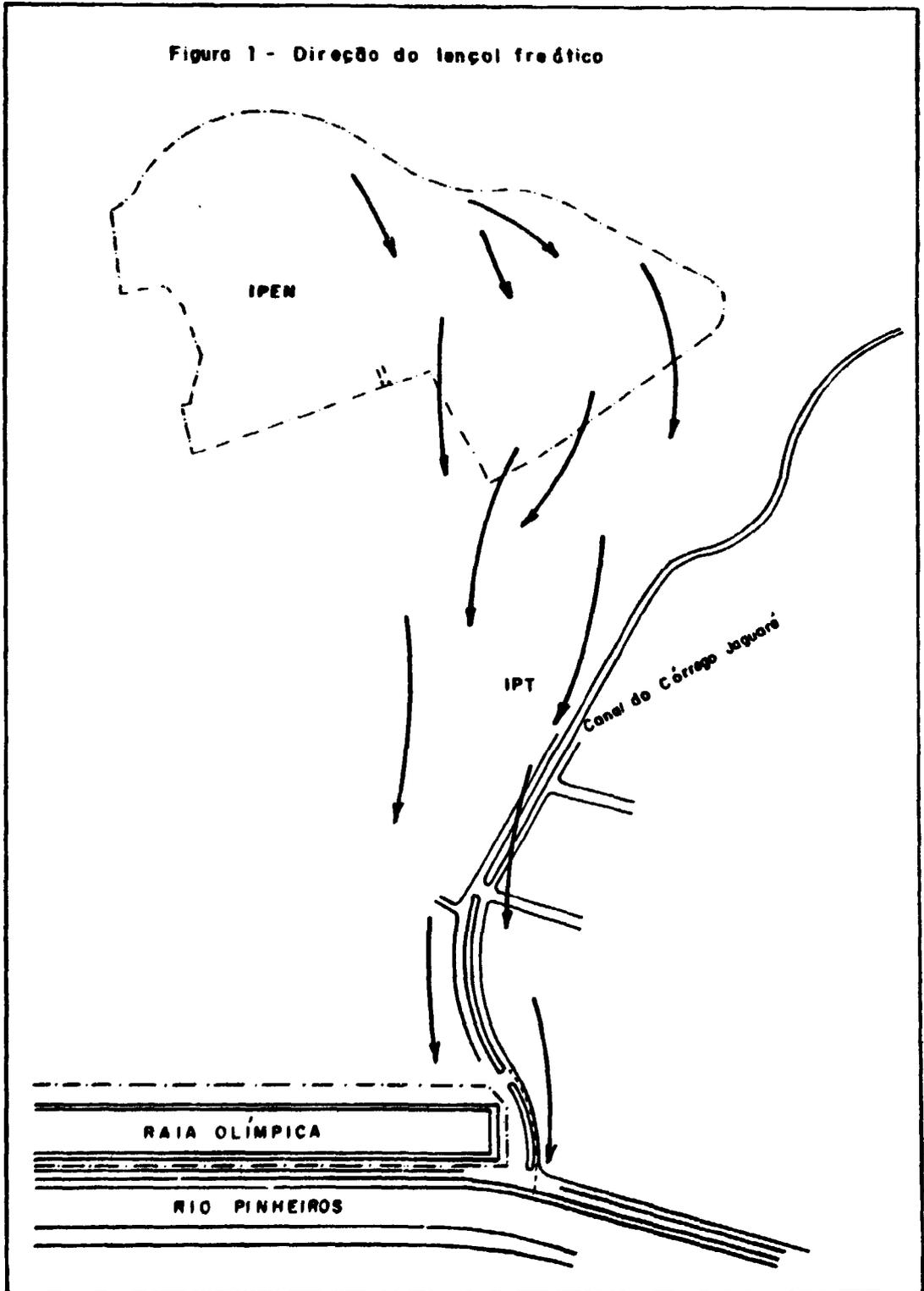
A precipitação média anual em torno de 1400 mm e a evaporação média anual, em torno de 900 mm indicam que só ocorre escoamento superficial nas épocas de chuvas intensas e irregulares.

3.6 Geologia

3.6.1 Geologia Regional

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

Figura 1 - Direção do lençol freático



- a) sedimentos aluvionares quartenários
- b) sedimentos terciários fluvio lacustres e fluviais da Bacia de São Paulo
- c) embasamento cristalino

3.6.2 Geologia Local

O mapa geológico de um dos poços situados no IPEN nos mostra ⁽⁶⁾ uma camada superficial de argila silto-arenosa com aproximadamente 3,0 m de espessura. A seguir tem-se uma camada pouco espessa (0,5 m) de areia fina e média argilosa que é seguida por uma camada (-2,0 m) de argila-siltosa pouco arenosa. Prosseguindo na sondagem observa-se camadas de areia média argilosa (1,5 m), argila-siltosa (1,0 m). Nesta região encontra-se a tábua do lençol freático. A partir deste ponto até o fim de lençol tem-se camadas que seguem umas às outras de areia fina e média, areia argilosa, argila arenosa, argila pouco arenosa e arenoso com fragmentos de rocha. A rocha matriz neste caso encontra-se entre 18,5 e 21 m.

4. VIAS CRÍTICAS, GRUPO CRÍTICO E MODELO DOSIMÉTRICO.

Para determinar as vias críticas partiu-se de uma hipótese conservativa supondo-se que após a autorização para a descarga, todos os efluentes gerados nas instalações de Metalurgia Nuclear, Purificação e Conversão, Laboratório Experimental de Produção de Elemento Combustível, são liberados diretamente no solo.

Como descrito no item 3, as águas do córrego do Jaguare e do rio Pinheiros funcionam como lagoas anaeróbicas e não são utilizadas para fins de irrigação ou tratadas para posterior fornecimento de água potável para a população. Portanto a via possível de contaminação é a ingestão de água por meio de poços localizados entre o ponto de libera

ção e o córrego do Jaguaré. O grupo crítico hipotético será constituído pelos indivíduos do público que moram nestas imediações e que se utilizarão desta água. Uma vez identificada a via crítica e o grupo crítico hipotético, o modelo dosimétrico a ser adotado depende: da concentração de material radioativo no ponto de captação (poço localizado a 10^3 m do ponto de liberação) do grupo crítico, da taxa de consumo anual de água potável pelo indivíduo e de um fator dosimétrico. Este modelo pode ser expresso pela equação⁽¹⁰⁾.

$$H_{E,50} = A.B.C_{a,i,p} \quad (1)$$

em que

$H_{E,50}$: dose equivalente comprometida efetiva no grupo crítico (Sv/ano)

A : concentração do radionuclídeo por unidade de descarga no meio aquático no local de interesse (Bq/L).

B : taxa de consumo de água potável anual por indivíduo (L/ano)

$C_{a,i,p}$: fator dosimétrico específico para um grupo com idade a , radionuclídeo i , caminho p que relaciona a atividade ingerida com a dose equivalente comprometida efetiva (Sv/Bq)

A taxa de consumo de água potável anual por indivíduo é tomada como sendo 800L/ano⁽⁹⁾. Na realidade é um número excessivamente grande e portanto a favor da segurança, uma vez que para o homem referência que é tomado como base de cálculo, os 300L provém da ingestão direta do líquido e do conteúdo de água dos alimentos ingeridos diariamente.

O fator dosimétrico $C_{a,i,p}$ usado na equação 1 já relaciona a grandeza concentração do radionuclídeo por unidade de descarga com a dose equivalente comprometida efetiva no corpo inteiro e não com a dose recebida pelos órgãos de deposição e tem o valor tabelado de $6,88.10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ ⁽¹⁵⁾.

A concentração A de urânio no ponto de interesse é dada por ⁽¹⁵⁾

$$A = \frac{Q_i}{D_L} \quad (2)$$

sendo

Q_i : o "termo-fonte" ; concentração do radionuclídeo "i" no ponto de emissão. No ano de 1988 foram liberados $1,22 \times 10^5$ Bq/L de urânio (a atividade total liberada foi $3,66 \times 10^9$ Bq num volume total de aproximadamente 30 m^3).

D_L : fator de diluição (adimensional)

A determinação do fator de diluição em águas subterrâneas é descrita no item a seguir.

5. DETERMINAÇÃO DO FATOR DE DILUIÇÃO NO PONTO DE INTERESSE

Para o cálculo do fator de diluição é necessária a determinação experimental de uma série de parâmetros que caracterizam o aquífero e que são dependentes das características do lençol freático local, tais como: coeficientes de dispersividade longitudinal e vertical, porosidade efetiva do solo, condutividade hidráulica e coeficiente de distribuição do radionuclídeo.

No presente trabalho estes parâmetros não foram determinados experimentalmente. Sendo assim, foram usados valores encontrados na literatura ⁽¹⁵⁾ para regiões com caracte

rísticas de aquífero semelhantes às daquelas da região onde se encontra o IPEN-CNEN/SP. O segundo critério usado foi a escolha de parâmetros restritivos de maneira que o resultado final da dose fosse superestimado com relação à dose real recebida pelos indivíduos do público, estando portanto a favor da segurança.

Na literatura encontram-se várias equações analíticas simplificadas, desenvolvidas a partir de modelos de transporte de água subterrânea com a finalidade de calcular a diluição mínima em função da capacidade do aquífero, isto é, a concentração máxima de um volume V_T de uma substância liberada instantaneamente por uma fonte puntiforme no aquífero.

O fator de diluição D_L é uma função do grau de mistura da substância no aquífero, na direção vertical, perpendicular a tábula de água⁽¹⁵⁾. O grau de mistura vertical pode ser caracterizado em um aquífero confinado⁽⁵⁾ de espessura constante "b" e propriedades de transporte uniforme pelo fator

$$\phi = \frac{b^2}{\alpha_v \Delta x} \quad (3)$$

sendo

α_v : dispersividade vertical⁽¹⁵⁾ (Tabela 2)

b : é dado em metros e com base em perfurações de poços no "campus" do IPEN-CNEN/SP, apresenta um valor em torno de 20 m⁽¹³⁾

Δx : distância entre o ponto de liberação do efluente e o ponto de interesse : poço para consumo de água localizado a 10 m³ do ponto de lançamento do efluente no lençol freático .

Os valores de dispersividade vertical encontrados na literatura para sedimentos aluviais variam entre 0,18 e 30,5.

Resolvendo-se a equação 3 conclui-se que ϕ pode variar entre 0,01 e 2,2. Este intervalo de valores corresponde de segundo modelo adotado⁽¹⁵⁾ a um fator de diluição tal que :

$$D_L = \frac{R_D}{V_T} \frac{4 \pi n_e}{\sqrt{\alpha_L \cdot \alpha_V}} \Delta x \cdot b_{exp} (\lambda t)$$

sendo

D_L : fator de diluição (Tabela 2)

R_D : coeficiente de retardação, que é dado por :

$$R_D = 1 + \frac{\rho_b}{n_e} \cdot K_D \quad (5)$$

onde :

ρ_b : é a densidade do solo. Neste caso foi tomado um valor médio de 1,5 g/cm³

n_e : é a porosidade efetiva do solo, cujo valor tabelado para um aquífero local aonde predominam solos argilosos é 0,06⁽¹⁵⁾.

K_D : é o coeficiente de distribuição. Para o urânio, num solo predominantemente argiloso com pH igual a 5,5, K_D é igual a 300 mL/g⁽¹⁵⁾.

Substituindo na equação 5, tem-se R_D igual a 7501.

α_V : definido anteriormente

α_L : dispersividade longitudinal em metros. Na literatura (15) foram encontrados valores de α_L , para sedimento aluvial, em um intervalo compreendido entre 15 e 200.

A determinação de D_L foi feita levando-se em conta todos os valores possíveis para α_V e α_L . Para a determinação da dose recebida pelos indivíduos do público usou-se o resultado do fator de diluição mais restritivo (menor diluição).

Δx : definido anteriormente

V_T : volume total de efluente lançado no lençol freático, durante um ano, isto é, 30 m^3 .

t : tempo de trânsito necessário para que o radionuclídeo alcance o ponto de interesse, neste caso, da ordem de 9 anos (4)

λ : constante de decaimento do radionuclídeo em anos que é da ordem de 10^9 anos.

Aplicando-se a equação 4 e os valores citados acima obtém-se

$$D_L = 3,8 \times 10^6 \sqrt{\alpha_L \alpha_V}$$

Os possíveis valores para os parâmetros α_L e α_V e os valores determinados para D_L encontram-se na Tabela 2. Para o cálculo da concentração de urânio no ponto de interesse (A) foi utilizado o valor de $1,3 \times 10^7$ para o fator de diluição D_L por ser o mais restritivo (menor diluição). Subs

TABELA 2

VALORES TABELADOS PARA DISPERSIVIDADE LATERAL
E VERTICAL COM O RESPECTIVO VALOR DO FATOR DE
DILUIÇÃO

α_L (M)	α_V (M)	D_L
30,5	30,5	$1,2 \cdot 10^8$
30,5	9,1	$6,4 \cdot 10^8$
61,0	0,18	$1,3 \cdot 10^7$
15,0	1,0	$1,5 \cdot 10^7$
80,0	8,0	$8,9 \cdot 10^7$
200,0	20,0	$2,4 \cdot 10^8$

tituindo este valor na equação 2, obtêm-se que a concen
tração de urânio no ponto de interesse será :

$$A = 9,7 \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$$

6. CÁLCULO DA DOSE EQUIVALENTE COMPROMETIDA EFETIVA NO GRUPO CRÍTICO

Substituindo os valores de A, B e $C_{a,i,p}$ na equação 1, obtêm-se o valor

$$H_{E,50} = 5,3 \times 10^{-7} \text{ Sv/ano}$$

7. LIMITE DERIVADO

O limite anual de dose equivalente efetiva para os membros individuais do público recomendado pelo CIPR se aplica à dose equivalente efetiva média no grupo crítico e que corresponde neste caso, a dose equivalente comprometida efetiva para ingestão de urânio ⁽⁹⁾. Quando são feitas suposições extremas na seleção do grupo crítico e nos parâmetros introduzidos nos cálculos que maximizem o resultado obtido, a dose real recebida seria consideravelmente mais baixa. Para estes casos a recomendação da CIPR é de se adotar o valor de 5×10^{-3} Sv/ano como limite máximo admissível de dose equivalente efetiva que os indivíduos do público podem receber.

Levando-se em conta a avaliação do local, adotando-se o valor acima especificado como limite de dose e considerando-se que o único radionuclídeo que poderá eventualmente causar danos para este grupo crítico é o urânio, via lençol freático, o limite derivado de descarga em Bq/L para o urânio a ser liberado pelas instalações do IPEN-

CNEN/SP, via lençol freático é :

$$H_{E,50} = A \times 800 \frac{L}{\text{Ano}} \times 6,88 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$$

sendo

$$H_{E,50} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Sv/ano}$$

obtém-se

$A = 90,80 \text{ Bq/L}$ no ponto de interesse e a concentração C_0 no ponto de emissão sendo

$$C_0 = A \times D_L = 1,2 \times 10^9 \text{ Bq/L}$$

o que corresponde a uma liberação total anual nas condições atuais de operação de $3,6 \times 10^{13} \text{ Bq}$.

8. OTIMIZAÇÃO

Nas condições encontradas neste trabalho não é necessário efetuar o cálculo de otimização da proteção radiológica uma vez que os resultados demonstram serem satisfeitas as condições do item 5.4.3 das normas Diretrizes Básicas de Radioproteção⁽³⁾, a saber :

- 1) a dose equivalente efetiva anual para indivíduos do público não ultrapasse a 1 mSv, e
- 2) a dose equivalente efetiva coletiva integrada durante um ano não supera a 1 homem-Sievert.

Como podemos verificar do resultado apresentado pela

equação 1, a dose equivalente comprometida efetiva anual para cada membro do público é inferior a 1 mSv, obedecendo portanto a condição 1) citada acima. Levando-se em conta que no setor situado entre o ponto de liberação e o córrego do Jaguaré possui cerca de 4.000 habitantes, a dose equivalente comprometida efetiva coletiva será $2,1 \times 10^{-3}$ homem-Sievert. Portanto futuramente não será necessário realizar um estudo de otimização de descarga de efluentes líquidos contendo urânio e que são lançados diretamente no solo.

CONCLUSÃO

Partindo-se de uma hipótese conservativa em que foi suposto que, após autorização para descarga, os efluentes líquidos contendo urânio são liberados diretamente no solo e daí para o lençol freático e que a água subterrânea é consumida pela população por meio de poços hipotéticos, foi demonstrado que os limites de descarga adotados atualmente pelo IPEN-CNEN/SP são extremamente restritivos. Sendo assim, as instalações do IPEN-CNEN/SP poderiam aumentar a sua capacidade de produção até um limite derivado de concentração de urânio nos efluentes que resultasse em uma dose equivalente comprometida efetiva no grupo crítico de 5.10^{-3} Sv/ano. Este limite é de $3,6 \times 10^{13}$ Bq/ano.

Como citado anteriormente o princípio básico da proteção radiológica é manter as doses de radiação tão baixas quanto razoavelmente exequíveis levando-se em conta fatores sócio-econômicos. Somente a partir deste momento seria necessário um estudo de otimização. No entanto para isso seria necessário o uso de um modelo mais realista, pois a utilização de parâmetros e suposições maximizantes invalidariam a otimização em virtude do prejuízo introduzido. Deve-se observar que quando se usam modelos mais realistas

para avaliar a dose no grupo crítico, a CIPR recomenda um limite de 10^{-3} Sv/ano.

Os dados da monitoração do lençol freático na área do IPEN-CNEN/SP confirmam que não há incremento de dose de radiação nos indivíduos do público resultante do transporte de urânio através das águas subterrâneas. Esta monitoração é feita trimestralmente e os valores de concentração encontrados, após análise por espectrometria gama e/ou fluorimetria, na sua maioria são inferiores à atividade mínima detectável.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Radiometria da Divisão de Monitoração Ambiental (NPA) pelas medidas realizadas na pessoa de M.Sc.Luzia Venturini, assim como ao técnico Marcelo Bessa Nisti. Nossos agradecimentos são também estendidos aos colegas Pedro Eiti Aoki e Cyro Teiti Enokihara do Departamento de Aplicações na Engenharia e na Indústria do IPEN-CNEN/SP pelas discussões realizadas sobre avaliação geohidrológica e aos colegas Teresinha de Moraes da Silva e Francisco Mário Feijó Vasques pelas discussões realizadas sobre a operação de cada uma das instalações citadas neste trabalho. Finalmente agradecemos ao Dr.Gian-Maria A.A.Sordi pela leitura e revisão do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AQUINO, A.R. Obtenção de tetrafluoreto de urânio por via aquosa a partir do dióxido. São Paulo, 1988. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

- (2) CETESB : Legislação: controle da poluição ambiental. Decreto Estadual nº 10.755 de 22/11/77. Dispõe sobre enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto nº 8.468 de 08/09/76. São Paulo, 1986.
- (3) COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro, 1988 (CNEN-NE-3.01-88).
- (4) FRANÇA Jr., J.M. Usina piloto de purificação de urânio pelo processo de colunas pulsadas em operação no Instituto de Energia Atômica. São Paulo, 1972 (IEA-PUB-277).
- (5) FREEZE, R.A. e CHERRY, J.A. Ground water. New Jersey , Prentice-Hall, 1979.
- (6) GABURO, J.C.G.; SILVA, T.M.; SORDI, G.M.A.A. Segurança ocupacional no processo de conversão de urânio da unidade piloto do IPEN-CNEN/SP. São Paulo, 1988. (IPEN-PUB-223).
- (7) INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Unidade crítica: IPEN/MB-01. Relatório final de análise de segurança. São Paulo, s.d. cap. ... Documento interno.
- (8) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic safety standards for radiation protection. Vienna, 1967. (IAEA-SS-9).
- (9) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Basic safety standards for radiation protection: Vienna, 1982. (IAEA-SS-9).

- (10) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. Vienna, 1975. (IAEA-SS-S7).
- (11) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon, 1966. (ICRP-9).
- (12) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon, 1977. (ICRP-26).
- (13) MARCELINO, S. Avaliação geohidrológica de local para a estocagem de rejeitos radioativos do IPEN-CNEN/SP. São Paulo, 1983. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- (14) SILVA, T.M. Contribuição ao estudo da nova filosofia internacional de segurança radiológica no processo químico do urânio natural. São Paulo, 1988. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).