

# INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE TRANSPORTE DE RADIONUCLÍDEOS NA GEOSFERA

\*Shukair Mahmud Said Shukair, Goro Hiromoto e Achilles Alfonso Suarez

\*Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares  
Travessa R, 400  
05508-900, São Paulo, SP, Brasil

## ABSTRACT

This paper presents the results obtained from intercomparison studies performed with the radionuclides transport models presented in the Test Case 2a of the International Atomic Energy Agency (IAEA) Coordinated Research Programme "Safety assessment of near-surface radioactive waste disposal facilities (NSARS)". In this exercise, IAEA provided one specific scenario, defining an hypothetical source term and hydrogeological characteristics of a waste disposal site, and the participants were requested to evaluate the maximum individual doses outside the site. The model adopted by the authors was intercompared with models presented by others participants, using the same input data. The results showed a widespread values of the dose, as well as a large dispersivity in the values of the time which the maximum of doses occurs.

## 1. INTRODUÇÃO

A escolha de local para instalação de repositório de rejeitos radioativos exige obter o máximo de informação sobre a característica da geosfera ( geologia, hidrogeologia, geoquímica, etc. ) e da biosfera ( clima, águas superficiais, demografia, etc.) [2]. Tais características são necessárias para determinar os parâmetros que influenciam na liberação e migração dos radionuclídeos no meio ambiente.

A disposição de rejeitos radioativos em repositórios de subsuperfície tem sido a opção freqüentemente mais utilizada[1]. Esses repositórios estão sujeitos à infiltração de água proveniente de precipitação pluviométrica, resultando na liberação de radionuclídeos e conseqüente transporte pela água subterrânea, até atingir a biosfera através de poços ou nascentes. Pelo fato de não existir uma metodologia única e consensual para avaliação de segurança radiológica de repositórios, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) propôs a vários países um exercício de intercomparação e validação dos modelos matemáticos, fornecendo os dados de termo fonte, climatológicos e hidrogeológicos de um repositório hipotético[3]. O exercício de intercomparação consistiu em modelar o fluxo e transporte dos radionuclídeos a partir do cenário proposto para determinar a distribuição temporal de dose em dois locais fora do sítio. Neste trabalho utilizou-se os dados de entrada adotados pelos países participantes[4] no modelo utilizado pelos autores e foi feita

uma intercomparação dos valores de dose e tempo máximo obtidos através desse método com os valores de dose e tempo máximo obtidos com modelos dos demais países.

## 2. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO

### 2.1 Termo Fonte

Os rejeitos radioativos são dispostos em um repositório com uma superfície horizontal quadrada (300 m x 300 m) localizado na zona vadosa, a 5 m do aquífero freático. Os radionuclídeos contidos nos rejeitos consistem de H-3, C-14, Ni-63, Sr-90, I-129 e Th-230, cada um com atividade inicial de  $10^{12}$  Bq, sendo que as liberações dos radionuclídeos ocorrem uniformemente sobre a área quadrada durante 500 anos.

Com a infiltração da água, os radionuclídeos são lixiviados e transportados pela água através da zona vadosa até alcançar o aquífero e, subseqüentemente, são levados pela água subterrânea até o poço (W) e a nascente (S).

### 2.2 Características do Sítio

Um extensivo programa de sondagem foi realizado para obter as informações das características geológicas e hidrogeológicas do local onde foi instalado o repositório. A obtenção das informações teve como objetivo: determinar os tipos de litologias e as espessuras das camadas da zona vadosa e saturada, o nível piezométrico do aquífero e a direção da água subterrânea. A zona vadosa é a parte que se estende desde a superfície do solo até o aquífero, onde os poros são preenchidos por água e ar.

O repositório está localizado sob uma topografia relativamente plana e dentro da zona vadosa. A zona vadosa é formada por camadas de areia eólica na superfície e areia argilosa logo abaixo, indicando uma porosidade relativamente alta. A espessura da zona vadosa ao redor do repositório varia de 10 m a 14 m.

A região situada abaixo da instalação apresenta quatro unidades ou zonas hidrogeológicas. Essas zonas têm diferentes superfícies potenciométricas, condutividades hidráulicas e variação espacial. Na zona 1 está localizado o aquífero e a camada consiste de areias argilosas apresentando uma espessura de 10 m. A zona 2 possui uma espessura de 30 m e é composta por areias finas a médias. Ocorre a presença de uma lente de argila entre as zonas 1 e 2. A maior parte da zona 3 consiste de areias finas a média e o seu topo está abaixo de uma camada de argila siltosa separando-a, desta forma, da zona 2. A zona 4 é separada da zona superior por uma camada de argila siltosa e tem uma baixa condutividade hidráulica. As águas subterrâneas nas três zonas fluem na mesma direção e desembocam em algum corpo de água superficial, com a exceção da última zona.

## 3. DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO

Para a avaliação do problema proposto, foi adotada uma metodologia de cálculo analítico unidimensional simples para modelar o fluxo e o transporte do radionuclídeo através da litosfera, assumindo que a migração dos radionuclídeos ocorre na zona 1.

A água penetra no repositório através da infiltração a partir da precipitação. A precipitação, que não é perdida pela evapotranspiração ou pelo escoamento superficial, percola através da zona vadosa onde a sua velocidade de infiltração é controlada pela condutividade hidráulica e o grau de saturação dos sedimentos não saturados. Com os dados fornecidos pela AIEA, a velocidade de infiltração da água através da zona vadosa foi de 0.26 m/a.

Para calcular a concentração dos radionuclídeos lixiviados pela água de infiltração na zona vadosa, foi considerado o coeficiente de distribuição  $K_d$  dos respectivos radionuclídeos, combinado com a hipótese de que todos os rejeitos foram totalmente saturados pela água de infiltração dentro da trincheira.

Após a lixiviação, foi assumido que os radionuclídeos migram verticalmente até atingir a água subterrânea sem nenhuma dispersão no movimento vertical. Contudo, a velocidade de migração do radionuclídeo sofre um atraso em relação à velocidade da água de infiltração, devido ao fator de retardo na zona vadosa ( $R_d$ ), calculado pela seguinte expressão:

$$R_d = 1 + \rho_s K_d / \theta \quad (1)$$

onde  $R_d$  é o fator de retardo na zona vadosa,  $\rho_s$  é a densidade do solo na zona vadosa,  $\theta$  é o conteúdo de umidade da zona vadosa e  $K_d$  é o coeficiente de distribuição.

Após determinar os valores do fator de retardo para cada radionuclídeo, calculou-se o tempo de trânsito de cada um deles até atingir o aquífero. O tempo de trânsito ( $t$ ) é dado por :

$$t = R_d x / V \quad (2)$$

onde  $x$  é a distância entre a área de liberação e o aquífero,  $V$  é a velocidade real na zona vadosa.

O transporte do radionuclídeo no aquífero até atingir o poço ou a nascente foi modelado usando a equação advectiva-dispersiva de transporte de massa [5]. A concentração de cada radionuclídeo tanto no poço quanto na nascente foi obtida através da expressão:

$$C = X Y Z / \theta R_d \quad (3)$$

onde:

$$X = \left( \frac{1}{2L} \right) \left[ \operatorname{erf} \frac{(x + L/2 - Vt/R_d)}{\sqrt{4D_L t/R_d}} - \operatorname{erf} \frac{(x - L/2 - Vt/R_d)}{\sqrt{4D_L t/R_d}} \right] \exp(-\lambda t) \quad (4)$$

$$Y = \left( \frac{1}{2W} \right) \left[ \operatorname{erf} \frac{(W/2 + y)}{\sqrt{4D_T t/R_d}} + \operatorname{erf} \frac{(W/2 - y)}{\sqrt{4D_T t/R_d}} \right] \quad (5)$$

$$Z = 1/B \quad (6)$$

onde  $R_d$  é o fator de retardo na zona saturada,  $\theta$  é a porosidade na zona saturada,  $L$  é o comprimento da área de liberação,  $W$  é a largura da área de liberação,  $B$  é a espessura do aquífero,  $V$  é a velocidade real na zona saturada,  $D_L$  é o coeficiente de dispersão longitudinal,  $D_T$  é o coeficiente de dispersão transversal e  $\lambda$  é a constante de decaimento radioativo.

Os coeficientes de dispersão são calculados pelas seguintes expressões :

$$D_L = \alpha_L V \quad (7)$$

$$D_T = \alpha_T V \quad (8)$$

onde  $\alpha_L$  e  $\alpha_T$  são as dispersividades longitudinal e transversal, respectivamente .

A velocidade real na zona saturada ( $V$ ) é calculada usando a velocidade de Darcy dividida pela porosidade :

$$V = KI / \theta \quad (9)$$

onde  $I$  é o gradiente hidráulico,  $\theta$  é a porosidade na zona saturada, e  $K$  é a condutividade hidráulica na zona saturada.

Para se calcular a dose de exposição via poço ou nascente, multiplicou-se o valor da concentração de cada radionuclídeo pelo fator de conversão de dose e ingestão anual de água .

#### 4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A comparação dos resultados para os radionuclídeos mencionados foi efetuada utilizando a razão entre os valores de dose e tempo máximo de ocorrência no poço ( $W$ ) e na nascente ( $S$ ) obtidos pelos modelos de cada país, e aqueles obtidos pelos autores deste trabalho, usando os mesmos dados de entrada em cada comparação.(Figuras 1 e 2)

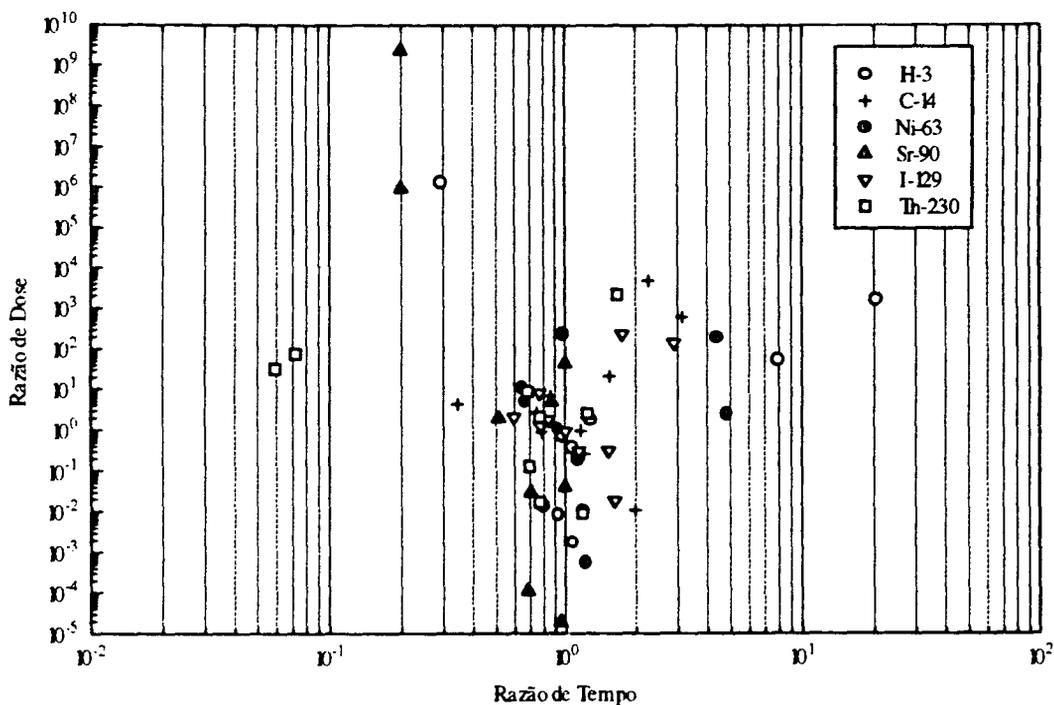


FIGURA 1 : Razão dos valores de dose e tempo máximo dos radionuclídeos no poço.

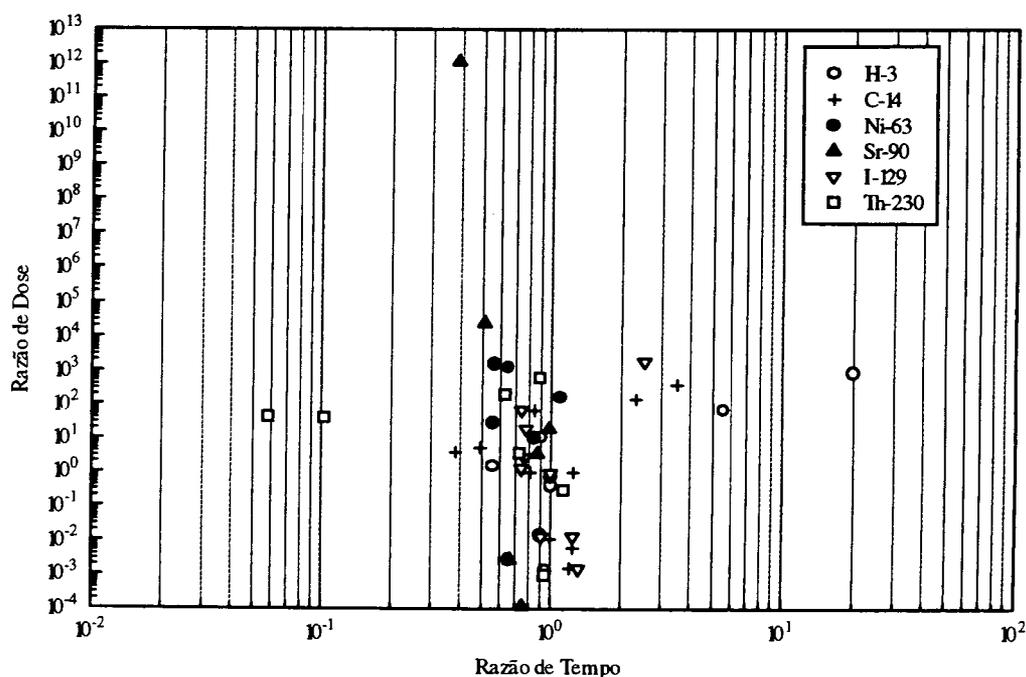


FIGURA 2 : Razão dos valores de dose e tempo máximo dos radionuclídeos na nascente.

A grande dispersão apresentada pelos valores obtidos deve-se essencialmente às diferenças nos modelos conceituais formulados por cada participante.

### REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety assessment for the underground disposal of radioactive waste. Safety Series , n.56, 1981.
- [2] ROBERTS, L.E.J. Radioactive waste management. Annu.Rev. Nucl. Part. Sci., n.40, p. 79-112, 1990.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Co-ordinated Research Programme on The safety assessment of near-surface radioactive waste disposal facilities (NSARS). Specification for test case 2A , Junho 1992.
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Report and results of the second meeting of the Co-ordinated Research Programme on The safety assessment of near-surface radioactive waste disposal facilities (NSARS), October 19-23, Augusta, EUA, 1992
- [5] CODELL, R.B.; DUGUID, J.D. Transport of radionuclides in groundwater. Radiological assessment . Ed. John E. Till and H.R. Meyer. Washington, D.C., 1983.