

# ESTUDO DA DISPERSÃO DO RADIONUCLÍDEO CÉSIO-137 NOS OCEANOS

Orlando Rodrigues Jr.\* , Rubens C.L.Figueira\*\* e Ieda I.L.Cunha\*\*

\* Coordenadoria para Projetos Especiais - COPESP/SP

\*\* Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Supervisão de Radioquímica - IPEN-CNEN/SP

## ABSTRACT

In this work a study for Cs-137 radionuclide dispersion in the marine environment through of compartmental model (Box Model) is presented. The model simulates the surface water contamination caused by direct atmospheric deposition, surface washoff, desorption from sediments and transfer with the ground water of accidentally released radionuclides. For this study the model was applied to the North Sea, near to Sellafield, based on the transfer coefficients obtain at the literature. The results obtained are in good agreement with the literature, being that the model developed can be applied in to the brazilian coastal regions.

## INTRODUÇÃO

Atualmente o estudo da dispersão de radionuclídeos possui duas funções principais, conhecer o comportamento de determinado radionuclídeo na biosfera e calcular a dose na população exposta a radiação. Para o meio marinho, a simulação matemática do transporte de radionuclídeos, pode ajudar no entendimento dos processos de transporte para diferentes substâncias, em particular, a hidrodinâmica marinha e a interação entre os oceanos, o fundo do mar e a atmosfera.

A contaminação de radionuclídeos nos oceanos pode ocorrer por meio de acidentes com reatores nucleares, testes com artefatos nucleares e efluentes radioativos provenientes de reatores e usinas de reprocessamento, onde os radionuclídeos liberados por estas fontes são transportados pelas correntes marítimas ou atmosféricas, por meio do *fallout*, sendo distribuídos por todo o globo terrestre [1,2].

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um programa computacional para a simulação da dispersão do radionuclídeo Cs-137 na região oceânica do Brasil. O Cs-137 foi escolhido devido às suas características nucleares, alto rendimento de fissão e meia-vida de 30 anos, e químicas, sendo semelhante ao sódio e potássio tende a acompanhá-lo nos processos biológicos.

O programa tem como estrutura principal um modelo compartimental, onde a região analisada é dividida em compartimentos ("caixas") interligados, sendo que a passagem de material de um compartimento para outro é representado por coeficientes de transferência constantes. Neste estudo

procurou-se desenvolver um modelo que envolvesse grandes regiões costeiras e oceânicas, não utilizando parâmetros como interação com a biota e o sedimento marinho.

Para testar a precisão do modelo matemático adotado, o programa foi utilizado para simular a dispersão de Cs-137 no Mar do Norte e mares adjacentes. Os resultados foram comparados com valores obtidos por Hallstadius e colaboradores [3] na mesma região oceânica.

## MODELO MATEMÁTICO

O fenômeno da dispersão de poluentes em águas superficiais é em geral tratado através de modelos matemáticos que procuram simular o comportamento do material liberado, permitindo a previsão de concentrações e taxas no meio estudado. Tais modelos devem considerar dois aspectos importantes dos problemas de dispersão: o transporte (advecção) e a difusão. Modelos sofisticados incluindo outros fenômenos como sedimentação, reações químicas, etc., podem ser elaborados de acordo com as características do problema.

Os modelos chamados de compartimentos ou de caixas, são considerados modelos de simples aplicação e podem fornecer resultados médios de regiões e tendências de forma satisfatória. Nos modelos de compartimentos, a região a ser analisada é subdividida em compartimentos interligados por coeficientes de transferência constantes. Oscilações localizadas em geral não são modeladas. A determinação dos coeficientes de transferência é o ponto mais importante do modelo e podem ser obtidos experimentalmente para a região estudada ou compostos a partir de coeficientes de difusão e das correntes marítimas locais. Normalmente, os modelos de compartimentos são representados matematicamente por um sistema de equações diferenciais de primeira ordem com coeficientes constantes [4]:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j (K_{ji} \cdot N_j - K_{ij} \cdot N_i) - \lambda \cdot N_i + Q_i(t) \quad (1)$$

onde:

$N_i$ : número de partículas do material estudado no compartimento  $i$ ;

$N_j$ : número de partículas do material estudado no compartimento  $j$ ;

$K_{ij}$ : é o coeficiente de transferência de material do compartimento  $i$  para o  $j$ ;

$K_{ji}$ : é o coeficiente de transferência de material do compartimento  $j$  para o  $i$ ;

$Q_i(t)$ : é o termo fonte do radionuclídeo no compartimento  $i$ .

A equação (1) representa o balanço da quantidade de material que entra e sai do compartimento  $i$ . O somatório se estende para todos os compartimentos  $j$  que apresentam interface com o compartimento  $i$ .

Em geral, os modelos de compartimentos utilizam métodos numéricos para a solução do conjunto de equações diferenciais que se originam da formulação do problema. O Método de Runge-Kutta de quarta ordem é comumente aplicado na obtenção da solução do sistema de equações diferenciais [5].

Neste trabalho é apresentado um modelo de compartimentos que permite a estimativa da concentração de radionuclídeos em regiões do oceano, utilizando uma técnica de solução simplificada baseada no balanço da quantidade de material que entra e sai de cada compartimento em cada intervalo de tempo [6]. Essa técnica de solução apresenta grande simplicidade nos cálculos matemáticos e facilidade de implementação computacional. O erro pode ser minimizado a partir da escolha de um intervalo de tempo adequado, levando-se em conta o tempo computacional e a precisão que se queira obter dos resultados. A técnica utilizada pode ser aplicada para um número elevado de compartimentos sem comprometer o tempo de processamento.

Para cada intervalo de tempo, previamente selecionado de acordo com a necessidade de precisão requerida, são calculados três termos.

Considerando um compartimento isolado  $i$ , são calculados:

- o fluxo de entrada de material no compartimento  $i$  a partir dos compartimentos anexos, utilizando os coeficientes de transferência entre os compartimentos;
- a quantidade de material presente no compartimento  $i$  como a soma da quantidade presente inicialmente mais a quantidade que foi transferida pelos compartimentos anexos;
- a integral da quantidade de material no compartimento  $i$  no intervalo de tempo.

Os cálculos são efetuados de forma iterativa em cada intervalo de tempo para todos os compartimentos do modelo. Essa técnica é uma solução aproximada do problema, pois para cada intervalo de tempo os fluxos de entrada e saída de material são assumidos constantes. No entanto, para fins de modelagem oceânica, uma precisão adequada pode ser obtida pela escolha de intervalos de tempo pequenos. O decaimento radioativo é incluído no termo que fornece a quantidade presente no compartimento.

## APLICAÇÃO DO MODELO E RESULTADOS

Utilizando o equacionamento matemático apresentado acima, foi elaborado um programa computacional chamado OCEAN, que permite a avaliação da quantidade do material estudado presente em cada compartimento do modelo com o passar do tempo. Não são considerados fenômenos de sedimentação.

Para uma aplicação prática do programa OCEAN, foi efetuada uma comparação com resultados obtidos por Hallstadius[3] para o estudo da dispersão de Cs-137 no Mar do Norte e mares adjacentes. Hallstadius utilizou um modelo independente (ICES), com 30 compartimentos para reavaliar os coeficientes de transferência cobrindo toda a região do Mar do Norte [4]. A região estudada é apresentada na Figura 1.

Os termos fontes utilizados na simulação estão situados nos pontos: Sellafield, Cap de la Hague e Dounreay. Os coeficientes de transferência e demais parâmetros de entrada para o programa

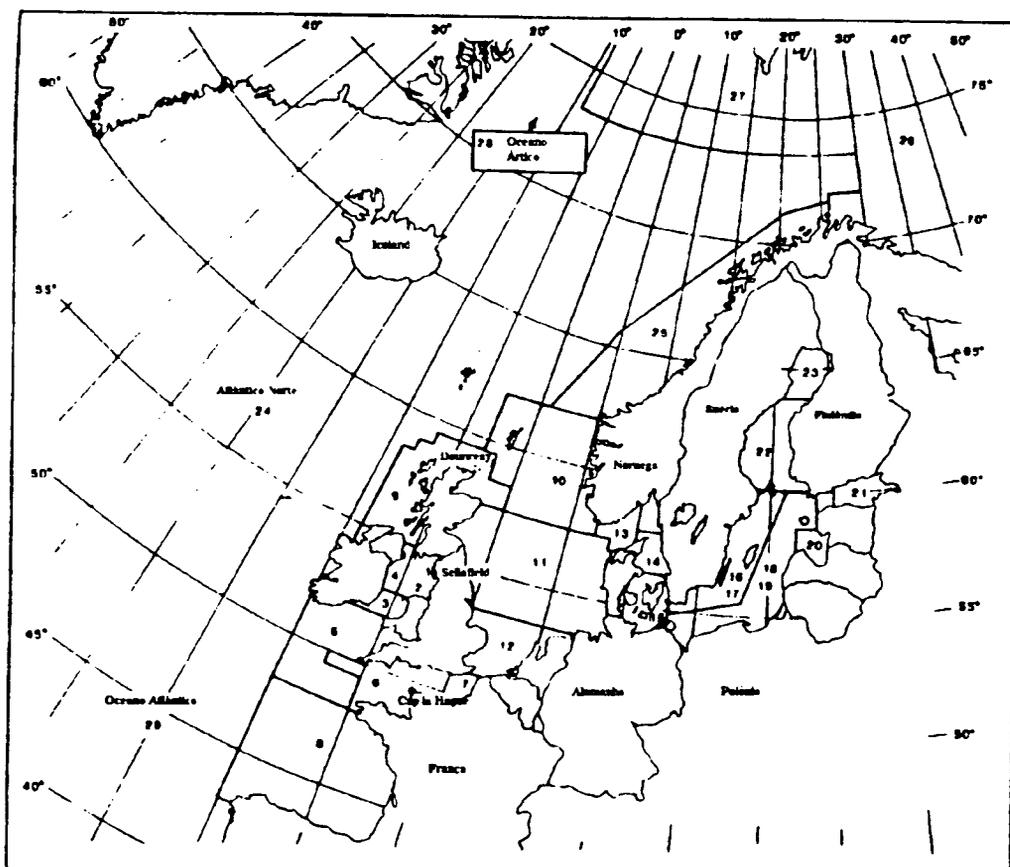


FIGURA 1 - Mapa da Região Mostrando os Compartimentos do Modelo [3].

OCEAN foram obtidos da literatura e do trabalho de Hallstadius [5-7].

Os resultados obtidos pelo programa OCEAN são apresentados nas Figuras de 2 a 7 em conjunto com dados obtido por meio de experimentos na região e os obtidos pelo programa utilizado por Hallstadius. As figuras apresentam a variação da concentração de Cs-137 em Bq/m<sup>3</sup> no período entre 1972 a 1986 em alguns dos compartimentos da região estudada.

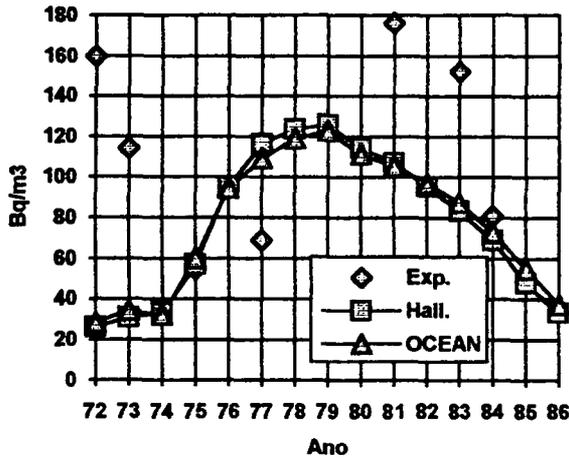


FIGURA 2 - Compartimento 9 - Scottish Waters.

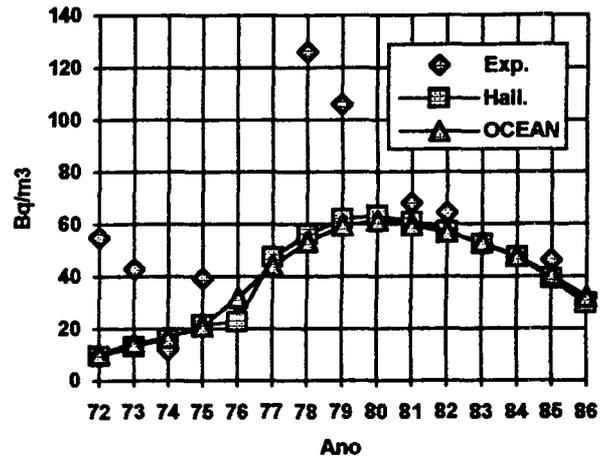


FIGURA 3 - Compartimento 10 - North Sea.

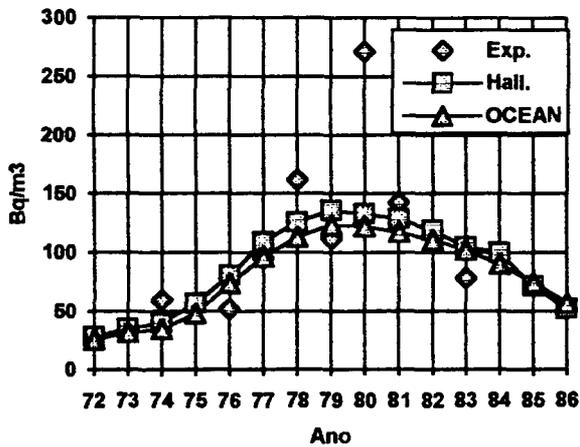


FIGURA 4 - Compartimento 11 - Central (North Sea).

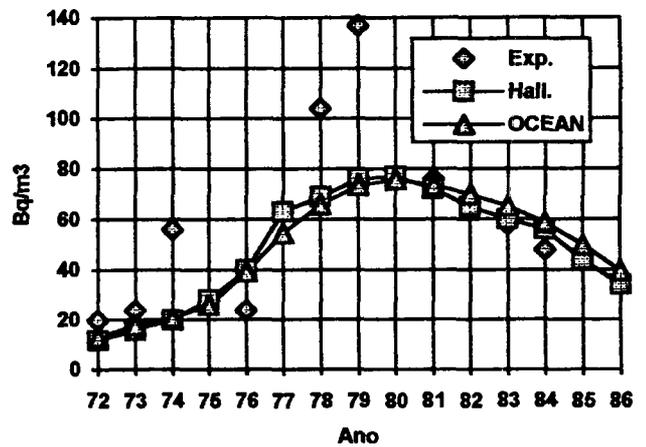


FIGURA 5 - Compartimento 13 - Skagerak.

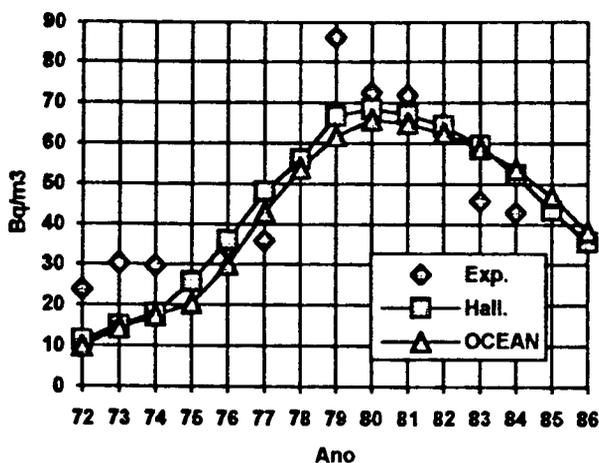


FIGURA 6 - Compartmento 14 - Kattegat.

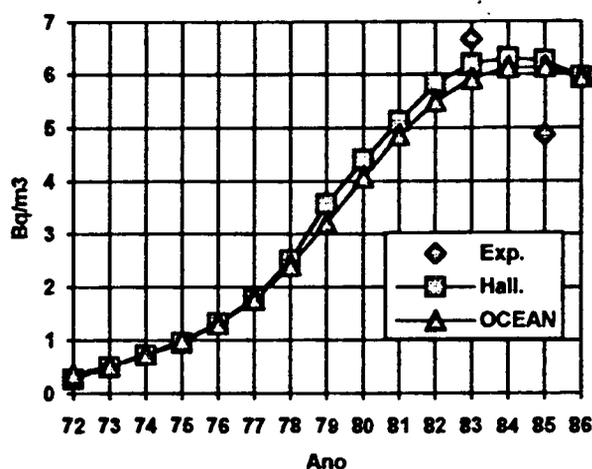


FIGURA 7 - Compartmento 27 - Spitsbergen Waters.

A análise das Figuras mostram que os resultados obtidos pelo programa OCEAN para a dispersão de Cs-137 estão em boa concordância com os valores apresentados por Hallstadius. Esses resultados indicam que a técnica desenvolvida neste trabalho pode ser aplicada de forma satisfatória para os modelos de compartimentos.

As diferenças observadas nos valores experimentais com os resultados obtidos pelo programa OCEAN podem ser interpretadas como decorrentes de aspectos característicos dos modelos compartimentais. Neste, os coeficientes de transferência são valores médios levantados para grandes regiões oceânicas, sendo que as variações sazonais não são consideradas diretamente no modelo.

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por este trabalho, por meio do estudo realizado por Hallstadius na região do Mar do Norte, mostram que o modelo OCEAN pode ser aplicado a outras regiões costeiras, necessitando assim de um processo de validação, através do levantamento das características físicas de circulação da região de interesse, para o cálculo dos coeficientes de transferência. O programa desenvolvido permite uma estimativa da concentração do radionuclídeo Cs-137 em cada compartimento com a evolução do tempo, permitindo assim uma avaliação da dispersão deste elemento para o estudo de impacto ambiental. A inclusão de termos fontes variáveis podem ser feita em qualquer compartimento do modelo, permitindo assim, que o programa possa ser aplicado tanto para liberações acidentais quanto rotineiras.

## REFERÊNCIAS

- [1] OZMIDOV, R. V. Diffusion of Contaminants from Localized Sources in the Ocean. In: Ozmidov, R. V. Diffusion de Contaminants in the Ocean. Netherlands, Kluwe Academic Publishers, p.61-147, 1986.
- [2] CUNHA, I.I.L.; MUNITA, C.J.S.; PAIVA, R.P.; TEIXEIRA, A. Levels of Cesium-137 in Seawater and Fish from Brazilian Coast. The Science of the Total Environmental, 139 p.34-39, 1993.

- [3] HALLSTADIUS, L.; GARCIA-MONTAÑO E.; NILSSON U. An Improved and Validated Dispersion Model for the North Sea and Adjacent Waters. J. Environ. Radioactivity, 5, p.261-274, 1987.
- [4] ICES. Flushing of the North Sea. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, Denmark. Cooperative research report No.123, 1983. Apud Hallstadius, L.; Garcia-Montaña E.; Nilsson U. An Improved and Validated Dispersion Model for the North Sea and Adjacent Waters. J. Environ. Radioactivity, 5, p.261-274, 1987.
- [5] ABRI, J. M.; GARCÍA-LEÓN M. A Marine Dispersion Model for Radionuclides and its Calibration From Non-radiological Information. J. Environ. Radioactivity, 16 , p.127-146, 1992.
- [6] ABRI, J. M.; GARCÍA-LEÓN M. A Mathematical Approach for Modelling Radionuclide Dispersion in the Marine Environment. J. Environ. Radioactivity, 13 , p.39-54, 1991.
- [7] ECKERMAN, K. F.; LEGGETT, R. W.; WILLIAMS, L. R. A Elementary Method for Solving Compartmental Models with Time-Dependent Coefficients. Radiation Protection Dosimetry, v.41, n.2/4, p.257-263, 1992.