

1. Publicação nº <i>INPE-3883-PRE/933</i>	2. Versão	3. Data <i>Maio, 1986</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DGA/DIG</i>	Programa <i>GEONUC</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>GEOFÍSICA NUCLEAR      IMPACTO DE ASTERÓIDE</i> <i>RADÔNIO                      METEORITOS</i>			
7. C.D.U.: <i>550.3:539.16</i>			
8. Título  <i>A GEOFÍSICA NUCLEAR NA PESQUISA ESPACIAL E ATMOSFÉRICA DO INPE-BRASIL</i>		10. Páginas: <i>13</i>	
		11. Última página: <i>08</i>	
9. Autoria <i>D. J. R. Nordemann</i> <i>E. B. Pereira</i> <i>E. V. A. Marinho</i> <i>F. Sircilli Neto</i>		12. Revisada por  <i>J. M. Costa</i> <i>José Marques da Costa</i>	
Assinatura responsável <i>Nordemann</i>		13. Autorizada por  <i>MARCO ANTONIO RAUPP</i> <i>Marco Antonio Raupp</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas  <i>Nestes últimos anos as pesquisas em Geofísica Nuclear foram desenvolvidas no INPE segundo linhas de atuação que são do interesse do Instituto, da comunidade científica e da sociedade em geral. Na pesquisa espacial trata-se de uma contribuição visando esclarecer a história do nosso planeta no que diz respeito à queda de meteoritos, a possível impacto de grandes meteoritos com efeitos marcantes como as extinções biológicas e ao acréscimo de matéria extraterrestre. Na pesquisa atmosférica, as medidas de radônio na baixa atmosfera, a sua distribuição espacial e as suas variações no tempo permitem evidenciar correlações que vão da micrometeorologia até a escala planetária, passando pela mesoescala na interpretação de fenômenos associados à dinâmica das massas de ar.</i>			
15. Observações <i>Este trabalho foi parcialmente subvencionado pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), através do Contrato FINEP 537/CT. Este trabalho será apresentado na reunião do I. P.G.H., Rio de Janeiro, abril de 1986.</i>			

A GEOFÍSICA NUCLEAR NA PESQUISA ESPACIAL E  
ATMOSFÉRICA DO INPE-BRASIL

D.J.R. Nordemann, E.B. Pereira, E.V.A. Marinho e F. Sircilli Neto

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
C.P. 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

ABSTRACT

During the last years, the INPE research in Nuclear Geophysics has been developed in fields of interest of the Institute, the scientific community and the society in general. In space research it may be considered as a contribution to the history of meteorite falls in our planet or possible collision with big meteorites which may have been the cause of important effect such as biological extinction and extraterrestrial matter gathering. In atmospheric research, spatial and temporal variations of radon measurements in the lower atmospheric allow to evidence correlations from micrometeorology to worldwide scale through mesoscale, in the interpretation of phenomena which deal with the dynamics of masses of air.

NUCLEAR GEOPHYSICS IN SPACE AND ATMOSPHERIC RESEARCH AT INPE/BRAZIL

A GEOFÍSICA NUCLEAR NA PESQUISA ESPACIAL E  
ATMOSFÉRICA DO INPE-BRASIL

D.J.R. Nordemann, E.B. Pereira, E.V.A. Marinho e F. Sircilli Neto

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
C.P. 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Nestes últimos anos as pesquisas em Geofísica Nuclear foram desenvolvidas no INPE segundo linhas de atuação que são do interesse do Instituto, da comunidade científica e da sociedade em geral. Na pesquisa espacial trata-se de uma contribuição visando esclarecer a história do nosso planeta no que diz respeito à queda de meteoritos, ao possível impacto de grandes meteoritos com efeitos marcantes como as extinções biológicas e ao acréscimo de matéria extraterrestre. Na pesquisa atmosférica, as medidas de radônio na baixa atmosfera, a sua distribuição espacial e as suas variações no tempo permitem evidenciar correlações que vão da micrometeorologia até a escala planetária, passando pela mesoescala na interpretação de fenômenos associados à dinâmica das massas de ar.

## INTRODUÇÃO

A Geofísica Nuclear dedica-se basicamente às pesquisas das Ciências da Terra e, por extensão, do espaço, que usam as técnicas finas da Física Nuclear para medir as radiações nucleares provenientes de núclídeos naturais ou artificiais (Tabela 1). Nas condições específicas dos países do Hemisfério Sul em fase de desenvolvimento econômico, a Geofísica Nuclear representa uma possibilidade de especialização que junta as seguintes vantagens:

- 1) Existe a possibilidade de pesquisa de ponta, mesmo a nível internacional, em frente da escassez de medidas nestes países. É verdade que o Hemisfério Sul é ainda muito menos conhecido que o Hemisfério Norte do ponto de vista da Geofísica. Assim sendo, pode-se dizer que grande parte das amostras nesse hemisfério são "virgens" e que a originalidade dos resultados obtidos é garantida, o que é, por um certo aspecto, uma "receita" válida para gerar assuntos de trabalhos de mestrado ou de doutoramento. Esta originalidade é também um fator atrativo para os pesquisadores estrangeiros (do Hemisfério Norte) que querem estender o seu campo de atuação para horizontes novos, abertos e com fraca densidade de população e de industrialização em geral.
- 2) É uma pesquisa relativamente barata cuja instrumentação, mesmo sendo de alta sensibilidade e de alta precisão, pode ser em parte construída localmente, devendo ser importada apenas uma fração que irá decrescendo à medida que o país incentiva a criação de indústrias associadas à pesquisa e de indústria nuclear. Sendo assim, há possibilidade de desenvolvimento de soluções originais, às vezes incentivadas pela necessidade de enfrentar a falta de componentes devido às dificuldades de importação ou a escassez de recursos.

- 3) Esta especialização representa também uma contribuição importante no que diz respeito à formação e à atuação de geofísicos e de geólogos trabalhando nos seus próprios países e aptos a utilizar tecnologias que antes eram pouco divulgadas.
- 4) Trata-se também de uma pesquisa que permite o desenvolvimento de aplicações que são estreitamente ligadas à previsão de catástrofes e calamidades naturais ou induzidas pelas atividades humanas, como será mencionado na conclusão.

No Instituto de Pesquisas Espaciais (Ministério da Ciência e Tecnologia) as pesquisas no campo da Geofísica Nuclear foram desenvolvidas segundo linhas de atuação que são descritas neste artigo a título de exemplo.

#### MEDIDAS DE IRÍDIO EM SEDIMENTOS E O POSSÍVEL IMPACTO METEORÍTICO NO FIM DO CRETÁCEO

A história da Terra em grande escala é repleta de acontecimentos, de discontinuidades que permitiram identificar eras, períodos e épocas. Do ponto de vista geológico e biológico, estes acontecimentos são reconhecidos e identificados em todas as regiões da Terra. As extinções de espécies não são distribuídas uniformemente no tempo; elas são muito mais frequentes em curtos intervalos de tempo que coincidem com épocas geológicas ou transições entre épocas; assim, por exemplo, a transição Cretáceo-Terciário foi marcada pelo desaparecimento de muitas espécies como as dos grandes répteis. Os mecanismos responsáveis por estas extinções não são ainda conhecidos e são objetos de muitas pesquisas. A respeito desses mecanismos, inúmeras hipóteses foram emitidas. As extinções poderiam ter sido causadas por mudanças bruscas ou progressivas das condições ambientes da biosfera: mudanças climatológicas, oceanográficas, induzidas por um acontecimento de origem extraterrestre, como por exemplo o impacto de um meteoróide de tamanho suficiente para produzir tais efeitos à escala da Terra ou à escala continental.

Existe na Terra um certo número de restos de impactos de meteoritos grandes, como as crateras anulares de grande dimensão. Mas não há nenhuma identificação certa entre tal impacto e as extinções mencionadas. Uma outra hipótese consiste em procurar em sedimentos marinhos, nos níveis da transição Cretáceo-Terciário, traços ou testemunhos do impacto em questão. Alvarez et al. (1980, 1982), na idéia de demonstrar a existência deste possível impacto, procuraram níveis enriquecidos em irídio em sedimentos marinhos. Esta hipótese parte do princípio que os elementos do grupo da platina (platina, irídio, ósmio e ródio) são menos abundantes na crosta e no manto superior terrestre do que nos meteoritos condriticos e na matéria média do sistema solar. O irídio, na faixa dos teores esperados, da ordem da ppb (parte por bilhão), é medido em geral por irradiação neutrônica, com ou sem tratamento químico destinado a melhorar as condições de sensibilidade.

No intuito de determinar se os níveis enriquecidos em irídio poderiam ser detetados em sedimentos marinhos recolhidos na região costeira brasileira, na parte leste do Oceano Atlântico Sul como foram detetados e medidos em outras regiões do mundo (Alvarez et al., 1982; Ganapathy, 1980), foram medidos por irradiação neutrônica (convênio com o IPEN-São Paulo) sedimentos do Cretáceo da Bacia de Campos (cedidos pela Petrobrás). Até agora, grande parte deste trabalho foi dedicado ao desenvolvimento da técnica apropriada com o uso do método instrumental (sem separações químicas) e à escolha das melhores condições de irradiação e das medidas de espectrometria gama realizada utilizando detetores Ge(Li). As primeiras medidas sobre amostras reais estão sendo processadas e interpretadas e seus resultados serão publicados em breve.

### O RADÔNIO ATMOSFÉRICO

Em toda a crosta terrestre encontram-se pequenas quantidades de urânio 238, elemento radioativo com meia-vida igual a  $4,49 \times 10^9$  anos. Um dos seus descendentes que resulta do seu decaimento é o radônio 222. Este gás nobre com uma meia-vida de 3,8 dias está,

portanto, também presente no solo e escapa regularmente para a atmosfera (Larson and Bressan, 1978) como resultado de diversos processos incluindo difusão, evaporação da umidade do solo e exalação devida a variações na temperatura e pressão ambientes.

A taxa de emissão de radônio varia de 0,2 a 2 átomos/cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> (Servant, 1964; Wilkening et al., 1972). Ela depende consideravelmente da natureza geológica do solo e do seu estado superficial e, particularmente, do seu recobrimento eventual por água, vegetação, etc. A concentração atmosférica do radônio depende primeiramente de sua taxa de emanção e, em segundo lugar, da velocidade de dispersão do radônio na atmosfera, isto é, da velocidade com que ele é arrastado: horizontalmente a partir das zonas emanadoras (continentes) até as zonas fracamente emissoras (essencialmente os oceanos) e verticalmente desde as baixas camadas atmosféricas até as camadas de alturas mais elevadas (Servant, 1964; Israel and Israel, 1966; Israel et al., 1966; Lambert et al., 1982). Estes diversos processos têm como consequência uma grande variabilidade da concentração do radônio em função do tempo em um certo lugar.

Durante as últimas décadas, técnicas extremamente sensíveis têm sido desenvolvidas para identificar e medir radionuclídeos atmosféricos naturais em concentrações muito pequenas, bem como conhecer o seu comportamento no espaço e no tempo. Isto devido ao fato de estes elementos poderem servir como traçadores naturais que trariam resultados importantes e interessantes em diversos ramos da pesquisa atual (Marinho, 1985).

Dois tipos de medidas serão descritos: medidas de decedentes radioativos de vida curta do radônio (entre os quais o Po<sup>214</sup> principalmente) feitas em estações fixas e medidas de radônio feitas em estações fixas ou a bordo de aeronave com um aparelho original que foi construído no INPE.

No caso da medida dos descendentes radioativos do radônio, as amostras são obtidas pelo método de filtragem do ar através de filtros de membrana (Millipore) e são submetidas em seguida a medidas de espectrometria alfa feitas diretamente sobre o filtro (Marinho, 1985; Marinho e Nordemann, 1985). Um ponto a destacar é o da utilização de detetores de diodo semicondutor na detecção de partículas alfa. Além de permitirem que as medidas sejam feitas em local de amostragem, os detetores possuem outras vantagens adicionais como baixo ruído de fundo. Vale salientar também que devido ao fato de as amostras serem fontes alfa delgadas, não é necessário um tratamento químico para que seja feita a espectrometria alfa. Isso não é o caso de fontes espessas onde, através de separações químicas, procura-se selecionar o elemento cujo isótopo é emissor alfa.

O recolhimento de amostras de aerossóis presentes no ar constou de duas fases. A primeira delas foi realizada nas dependências do INPE de São José dos Campos (latitude: 23°12'S, longitude: 45°51'W, altitude: 600 m) e a segunda no INPE de Cachoeira Paulista (latitude: 22°41'19"S, longitude: 45°00'22"W, altitude: 574 m). Estas duas cidades localizam-se no Vale do Paraíba do Sul no Estado de São Paulo. A noroeste do Vale do Paraíba está a Serra da Mantiqueira com ≈1800 m de altura e a sudeste tem-se a Serra do Mar com altura que varia entre 400 m (SJC) e 1800 m (C.P.). A distância das duas cidades até o mar é de aproximadamente 110 km, e a distância entre elas é de 100 km.

Estas medidas permitiram evidenciar a diminuição do radônio na atmosfera nos dias de chuva e o seu aumento nos dias sem chuva posteriores aos dias com chuva. Estes efeitos são devidos à solubilidade do radônio na água, ao seu bloqueio nas fissuras dos solos molhados e ao seu transporte além da difusão nos solos em processo de secagem depois da chuva. Nos períodos de baixa pluviosidade, as variações, no tempo e no espaço, do radônio e dos seus descendentes são devidas ao transporte pelas massas de ar e à difusão em condições reguladas pela estabilidade do ar. A mesma pesquisa mostrou uma boa correla

ção entre o número de Richardson (função dos gradientes verticais de temperatura e de vento horizontal) e os teores de descendentes do radônio na baixa atmosfera; porém muito mais medidas são necessárias para esclarecer o comportamento complexo do radônio neste tipo de clima tropical. Por outro lado, não foi observada nenhuma correlação entre a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e a radioatividade natural do ar.

O princípio do aparelho medidor de radônio é aspirar o ar ambiente através de um filtro a fim de separá-lo dos aerossóis que carregam os descendentes do radônio e depositar por precipitação eletrostática sobre um detetor alfa semiconductor apenas os descendentes radioativos que são gerados na câmara de 42 litros de volume (Pereira et al., 1984). Este aparelho, além da câmara e da bomba de circulação de ar, compreende o detetor semiconductor, um pré-amplificador, várias fontes de tensões contínuas incluindo uma fonte de 20 kV para a precipitação eletrostática, as eletrônicas associadas para o tratamento dos pulsos de detecção e a aquisição dos dados que é feita usando um microprocessador Z80A. Um analisador de pulsos pode ser usado para a obtenção dos espectros alfa dos descendentes radioativos do radônio e do tório.

O aparelho pode funcionar em estação fixa ou a bordo de veículos diversos como navio ou aeronave. Ele é patenteado e já foi utilizado em São José dos Campos e na Estação Brasileira Comandante Ferraz na Ilha Rei Jorge, na Península Antártica. Tal aparelho já funcionou também a bordo do Navio Brasileiro Barão de Teffê no Oceano Atlântico Sul entre a Antártica e o Rio de Janeiro, e a bordo do avião Bandeirante/EMBRAER do INPE para medidas de perfis horizontais e verticais na Região Sul do Brasil. Nestes vôos, evidenciou-se uma inversão dos teores de radônio entre 3000 m e 7000 m de altitude, fenômeno pouco conhecido e pouco observado até agora em região tropical.

Vários modelos de circulação atmosférica e de distribuição do radônio foram testados no intuito de explicar o fenômeno obser

vado. Usando hipóteses simples, estes modelos justificam a existência da inversão observada, embora um número maior de medidas realizadas em situações meteorológicas diferentes, e detalhadamente conhecidas, seja necessário para um melhor esclarecimento dos mecanismos envolvidos. Há também necessidade de tratamento dos modelos com uma malha mais fina. Os resultados destas pesquisas serão apresentadas em revistas científicas especializadas.

### CONCLUSÃO

No seu desenvolvimento inicial, as pesquisas descritas visam o aumento do conhecimento sobre acontecimentos de origem cósmica na história da Terra e sobre os fenômenos nucleares que têm lugar na baixa e média atmosferas. Porém em cada domínio abordado existe uma possibilidade de aplicação à previsão de catástrofes e calamidades naturais e das conseqüências não desejadas das atividades humanas.

O radônio e os seus descendentes radioativos representam um indicador fiel do acúmulo de poluentes nas camadas inferiores da atmosfera no caso da sua estabilidade associada às inversões de temperatura. Sob um ponto de vista bastante aplicado, os descendentes radioativos do radônio são um dos maiores perigos nas galerias das minas subterrâneas de urânio quando eles são inalados; a sua medida e as providências tomadas para a sua eliminação são então de muito grande importância para a segurança do trabalho dos mineiros. A um nível muito menor foi questionado também o caso das pessoas expostas à inalação de quantidades menores, porém permanentes, em casas e prédios construídos em rochas ricas em urânio e rádio como as rochas graníticas em geral.

Os produtos de fissão oriundos das explosões nucleares (testes atmosféricos e detonações para fins bélicos) e disseminados em toda a atmosfera terrestre pela circulação estratosférica poderão representar uma gravíssima ameaça para a humanidade, muito embora as modificações climáticas subsequentes (o chamado "inverno nuclear") possam representar uma ameaça ainda pior. Todavia há uma necessidade de

conhecimento dos mecanismos de disseminação e dos níveis de contaminação na atmosfera. As técnicas usadas na Geofísica Nuclear, a espectrometria gama em particular, representam um meio ótimo para realizar tais controles e, assim, permitir a tomada das medidas cabíveis em todos os casos.

A observação, nos tempos geológicos, da distribuição das catástrofes de origem extraterrestre, como o impacto de meteoróides, parece mostrar que estas não representam um perigo maior nos tempos presentes. Porém, uma parte das calamidades que afetam a humanidade atualmente é de origem climática (secas, inundações, furacões, perda de safra, etc.) e é através do conhecimento da climatologia e da paleoclimatologia, com a contribuição da Geofísica Nuclear, que se poderá conhecer melhor, prever estes fenômenos e tomar as providências para minimizar ou afastar as suas conseqüências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, L.W.; ALVAREZ, W.; ASARO, F.; MICHEL, H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208(448), 1095-1108, junho de 1980.
- ALVAREZ, W.; ALVAREZ, L.W.; ASARO, F.; MICHEL, H.V. Current status of the impact theory for the terminal Cretaceous extinction. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 190, p.305, 1982.
- GANAPATHY, R. A major meteorite impact on the Earth 65 million year ago: evidence from the Cretaceous-Tertiary boundary clay. *Science*, 209, 921-923, August, 1980.
- ISRAEL, H.; HOBERT, M., ISRAEL, G.W. Results of continuous measurements of radon and its decay products in the lower atmosphere. *Tellus*, 18(2):639-641, 1966.
- ISRAEL, H.; ISRAEL, G.W. A new method of continuous measurements of radon ( $Rn^{222}$ ) and thoron ( $Rn^{220}$ ) in the atmosphere. *Tellus*, 18(2): 557-561, 1966.
- LAMBERT, G.; POLIAN, G.; SANAK, J.; ARDOUIN, B.; BUISSON, A.; JEGOU, A., et LE ROULLEY, J.C. Cycle du radon et de ses descendants: application à l'étude des échanges troposphère-stratosphère. *Annales Geophysique*, 38(4):497-531, 1982.
- LARSON, R.E.; BRESSAN, D.J. Radon 222 as an indicator of continental air masses and air mass boundaries over ocean areas. In: *NATURAL RADIATION ENVIRONMENT*, 3., Houston, Tx, 1978. Proceedings: Technical Information Center/U.S. Department of Energy, 1978, V.1, p.308-326.

MARINHO, E.V.A. Os descendentes de curto período do Radônio medidos em São José dos Campos e Cachoeira Paulista e sua correlação com dados meteorológicos. Dissertação de Mestrado, São José dos Campos, INPE, 1985 - INPE-3633-TDL/198.

MARINHO, E.V.A.; NORDEMANN, D.J.R. Medidas de  $Po^{214}$  em São José dos Campos e Cachoeira Paulista: correlação com dados meteorológicos. INPE-3725-PRE/857. Apresentado no 1º Encontro Regional de Geofísica. SBGf. São José dos Campos, 1985.

PEREIRA, E.B.; NORDEMANN, D.J.R.; TAKASHIMA, A.M.; DUTRA, S.L.V.; MANTELLI NETO, S.L. Um sistema para monitoração do Radônio e seus produtos de decaimento na atmosfera. Rev. Bras. Geofís., 2(2):59-64, junho de 1984.

SERVANT, J. Le radon et ses dérivés à vie courte dans la basse atmosphère. Thèse d'État, Paris, Université de Paris, 1964.

WILKENING, M.H.; CLEMENTS, W.E. and STANLEY, O. Radon 222 flux measurements in widely separated regions. Natural Radiation Environment II, US ERDA Conf. 720805, P 2, 717-730, 1972.

TABELA 1 - FENÔMENOS ENVOLVIDOS E ALGUNS DOMÍNIOS DE ATUAÇÃO DA GEOFÍSICA NUCLEAR

NUCLÍDEOS	ORIGEM	EXEMPLOS	GEONUC	
Naturais	Primitivos	U, Th, $K^{40}$	Espectrometria gama aérea, de campo (radiogeologia/biomassa)	
	Descendentes	Rn, $Pb^{210}$	Rn e descendentes no Brasil e na Antártica	
	Cosmogênicos	gama, $Na^{24}$ , $Na^{22}$ , $Al^{26}$	Efeito da radiação cósmica Meteoritos	
Antropogênicos	Introdução:	<p>Explosões nucleares, termonucleares</p> <p>Acidente</p> <p>Resíduos Radioativos</p> <p>Reator Nuclear</p> <p>Produtos de fissão</p> <p>Ativação neutrônica (n, gama)</p> <p>Acelerador de partículas</p>	Produtos de fissão na atmosfera (pesquisa em desenvolvimento)	
	Involuntária			$H^3$ , $Cs^{137}$ , $Sr^{90}$ , $Kr^{85}$
	Voluntária			$Na^{24}$ , $Ar^{41}$ , $Ir^{192}$ , $Ir^{194}$