

A radioactividade pode ser concentrada no ambiente não apenas em resultado das actividades relacionadas com o ciclo do combustível nuclear, mas também devido a algumas outras actividades tecnológicas. A utilização industrial de matérias primas que contêm radionuclidos naturais (^{40}K e elementos das séries radioactivas do urânio e do tório), ou mais concretamente o processamento destes materiais conduz à redistribuição e concentração dos constituintes radioactivos.

MÁRIO JOÃO CAPUCHO DOS REIS
Instituto Tecnológico e Nuclear
Departamento de Protecção Radiológica e
Segurança Nuclear
Estrada Nacional 10 Apartado 21
2686-953 Sacavém

mcapucho@itn.pt

A RADIOACTIVIDADE NO AMBIENTE

A radioactividade não é um fenómeno recente. Com efeito, a Terra sempre esteve sujeita à radiação cósmica e da sua constituição sempre fizeram parte elementos radioactivos, pelo que a espécie humana tem vivido, desde a sua origem, num ambiente naturalmente radioactivo.

A radioactividade no ambiente pode ter origem natural ou artificial e resulta, basicamente, de quatro fontes principais:

- (1) exalação para a atmosfera de ^{222}Rn e ^{220}Rn , formados através da desintegração radioactiva do ^{226}Ra e do ^{224}Ra (constituintes naturais de solos e rochas) pertencentes às séries radioactivas naturais do urânio e do tório, respectivamente;
- (2) formação de radionuclidos cosmogénicos através da interacção da radiação cósmica com gases atmosféricos como o carbono, o azoto e o oxigénio;
- (3) radioactividade natural tecnologicamente aumentada, resultante da utilização industrial de matérias primas que contêm radionuclidos naturais e cujo processamento conduz à redistribuição e concentração desses constituintes radioactivos;
- (4) radionuclidos artificiais, produtos de cisão e activação, em virtude de actividades antropogénicas (testes nucleares, produção de energia eléctrica por via nuclear, produção de radioisótopos, acidentes, etc).

DADE NO

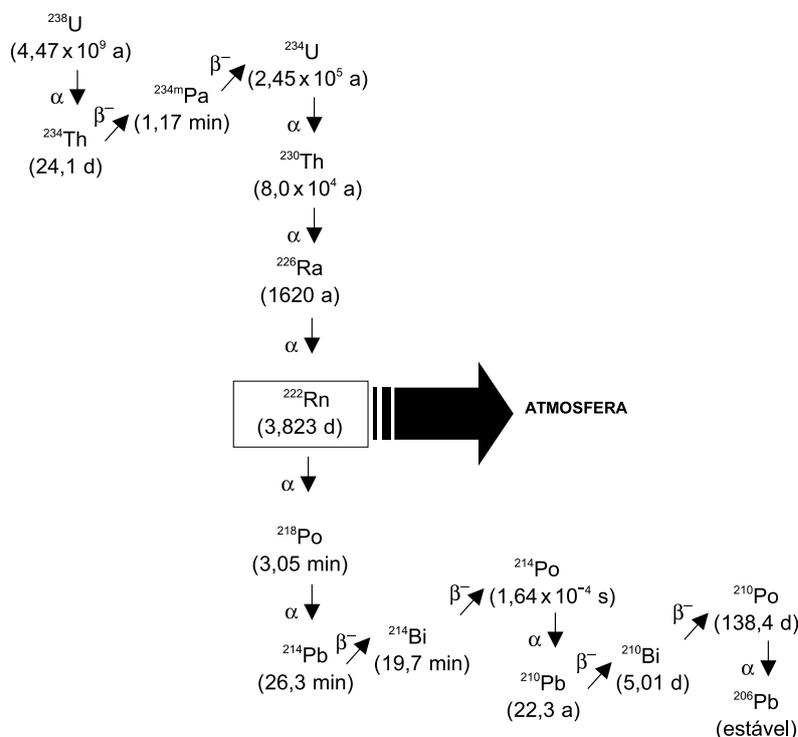


Fig. 1 - Série radioactiva natural do urânio.

RADIOACTIVIDADE DE ORIGEM NATURAL

Origem terrestre

As rochas e solos contêm minerais naturalmente radioactivos. Alguns dos radionuclidos presentes nas rochas podem contribuir significativamente para a radioactividade atmosférica, devido à formação de gases que podem ser exalados pela superfície terrestre. Estes gases, ^{222}Rn (radão) e ^{220}Rn (torão), são descendentes radioactivos directos do ^{226}Ra e do ^{224}Ra , respectivamente, que pertencem às séries radioactivas do urânio (Fig. 1) e do tório (Fig. 2).

O ^{222}Rn , gás inerte com um período de semidesintegração de 3,8 dias, tem uma probabilidade razoavelmente elevada de se difundir através dos solos e atingir a atmosfera antes de sofrer desintegração para os seus descendentes sólidos (polónio, bismuto e chumbo). Pelo contrário, o ^{220}Rn , com um período de semidesintegração de 55 segundos, apresenta uma menor probabilidade de se difundir para a atmosfera antes de se desintegrar.

Os descendentes do ^{222}Rn e ^{220}Rn que alcançam a atmosfera reagem com os gases atmosféricos formando agregados moleculares que, dada a sua grande mobilidade, são rapidamente adsorvidos nas partículas de aerossol (Horvath, 2000). O ^{210}Pb , por exemplo, devido ao seu longo período de semidesintegração (22,3 anos), pode permanecer na atmosfera durante tempo suficiente para sofrer

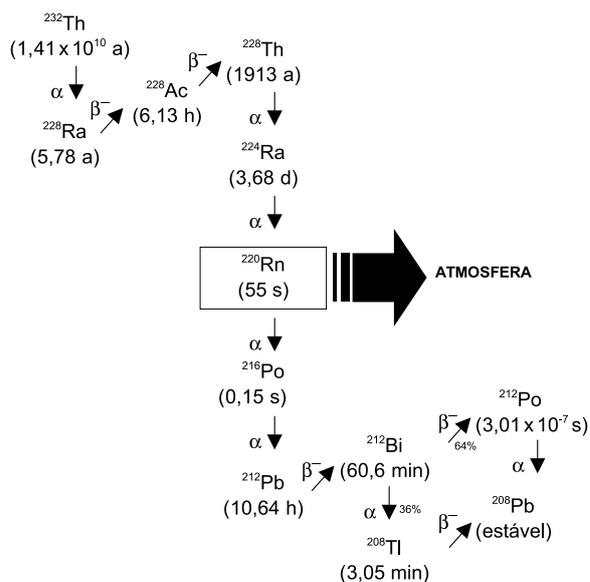


Fig. 2 - Série radioactiva natural do tório.

os mesmos processos a que estão sujeitas as partículas de aerossol a que se encontra associado.

Origem cósmica

Os radionuclídeos cosmogénicos são continuamente formados na atmosfera através da interacção da radiação cósmica, altamente energética, com gases atmosféricos. Os raios cósmicos, ao colidirem com os átomos da atmosfera, geram uma “cascata” de neutrões e prótons que interagem com núcleos leves de carbono, azoto e oxigénio, os quais se desintegram formando novos elementos, incluindo isótopos radioactivos (Fig. 3).

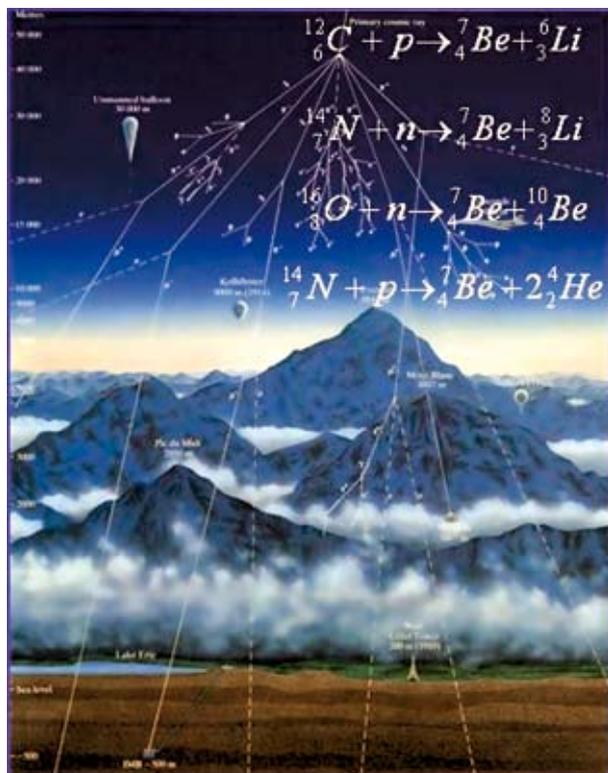


Fig. 3 - Interação da radiação cósmica com gases atmosféricos e formação de novos elementos (exemplo do berílio, ${}^7\text{Be}$).

São inúmeros os radionuclídeos que têm vindo a ser observados desde a década de sessenta. No entanto, os que apresentam taxas de produção mais elevadas (Quadro I), sendo os mais significativos do ponto de vista de dose para a população, são o ${}^3\text{H}$ (trítio), o ${}^7\text{Be}$, o ${}^{14}\text{C}$ e o ${}^{22}\text{Na}$ (UNSCEAR, 1993).

Apesar de serem originados de forma idêntica, estes radionuclídeos apresentam comportamentos geoquímicos distintos. Cerca de 90% do ${}^3\text{H}$ produzido na atmosfera é convertido em água tritiada (HTO), entrando directamente no ciclo da

água. O ${}^{14}\text{C}$, após a sua formação, é oxidado para formar ${}^{14}\text{CO}_2$, participando nos processos de transferência entre a atmosfera e a biosfera. Pelo contrário, o ${}^{22}\text{Na}$ e o ${}^7\text{Be}$ associam-se rapidamente às partículas de aerossol disponíveis na atmosfera, passando a tomar parte em todos os processos atmosféricos a que estas se encontram sujeitas.

Radioactividade natural tecnologicamente aumentada

A radioactividade pode ser concentrada no ambiente não apenas em resultado das actividades relacionadas com o ciclo do combustível nuclear, mas também devido a algumas outras actividades tecnológicas (Fig. 4). A utilização industrial de matérias primas que contêm radionuclídeos naturais (${}^{40}\text{K}$ e elementos das séries radioactivas do urânio e do tório), ou mais concretamente o processamento destes materiais (mineração e combustão, por exemplo), conduz à redistribuição e concentração dos seus constituintes radioactivos.

As indústrias não nucleares mais importantes, do ponto de vista de emissões de radionuclídeos naturais, são a indústria dos fosfatos, a indústria cerâmica, as actividades de mineração e a produção de energia eléctrica, particularmente as centrais térmicas a carvão.

O carvão contém ${}^{40}\text{K}$ e radionuclídeos naturais pertencentes às séries radioactivas do urânio e do tório em quantidades equivalentes às que se encontram nos solos, estando os descendentes em equilíbrio com os progenitores. Os processos de mineração e combustão do carvão provocam a redistribuição e concentração desses radionuclídeos (Quadro II).

A combustão do carvão a nível global emite para a atmosfera cerca de 9000 toneladas de tório e 3600 toneladas de urânio, onde se incluem 24 toneladas de ${}^{235}\text{U}$ (Baxter, 1996). Outra das potenciais vias de exposição advém da utilização que pode ser dada às cinzas resultantes do processo, como produção de cimento e asfalto, estabilização da superfície de estradas, incorporação em fertilizantes, etc.

A actividade específica nas cinzas volantes aumenta com a diminuição da dimensão das partículas, sendo os factores de enriquecimento tanto maiores quanto mais elevadas forem as temperaturas a que ocorrer o processo de combustão (Hedvall & Erlandsson, 1996).

Os processos de extracção e tratamento do minério de urânio (pertencentes ao ciclo do combustível nuclear) constituem também actividades perturbadoras dos níveis de radioactividade natural (Fig. 4).

Item	Radionuclídeos			
	³ H	⁷ Be	¹⁴ C	²² Na
PERÍODO DE SEMIDESINTEGRAÇÃO	12,3 a	53,6 d	5730 a	2,62 a
TAXA DE PRODUÇÃO (ÁTOMOS m⁻² s⁻¹):				
- TROPOSFERA	840	270	11000	0,24
- ATMOSFERA TOTAL	2500	810	20500	0,86
INVENTÁRIO GLOBAL (PBQ)	1300	37	8500	0,4
DISTRIBUIÇÃO (% DO INVENTÁRIO):				
- ESTRATOSFERA	6,8	60	0,3	25
- TROPOSFERA	0,4	11	1,6	1,7
- SUPERFÍCIE TERRESTRE E BIOSFERA	27	8	4	21
- OCEANO (ZONA DE MISTURA)	35	20	2,2	44
- OCEANO PROFUNDO	30	0,2	92	8
- SEDIMENTO OCEÂNICO	-	-	0,4	-
CONCENTRAÇÃO DE ACTIVIDADE:				
- AR À SUPERFÍCIE (μBq m ⁻³)	-	3000	-	0,3
- ÁGUAS CONTINENTAIS (Bq m ⁻³)	200-900	-	-	-
- BIOSFERA TERRESTRE (Bq kg ⁻¹)	-	-	230	-

Quadro I - Produção e distribuição no ambiente dos radionuclídeos cosmogénicos mais significativos (fonte: UNSCEAR, 1988).

Dose de exposição a fontes de radiação natural

A exposição média mundial da população a fontes de radiação natural (excluindo a radioactividade natural tecnologicamente aumentada) é estimada em 2,4 mSv por ano, podendo variar entre 1 e 10 mSv por ano (UNSCEAR, 2000). Os diversos componentes da dose de exposição, com os respectivos intervalos de variação, são apresentados no Quadro III.

As doses de exposição para a população resultantes de actividades industriais que processam matérias primas naturalmente radioactivas (radioactividade natural tecnologicamente aumentada) podem variar entre 1 e 10 μSv por ano, de acordo com as mais recentes estimativas (UNSCEAR, 2000). Estas doses podem, no entanto, atingir valores mais

elevados (250 μSv por ano) no caso de haver incorporação de cinzas volantes em materiais de construção.

RADIOACTIVIDADE DE ORIGEM ARTIFICIAL

Testes nucleares

Os testes nucleares, muito frequentes nos anos 50, foram a principal fonte de emissão de radionuclídeos artificiais para o ambiente (Fig. 5).

O primeiro teste nuclear na atmosfera ocorreu em 1945, após o que se seguiram muitos outros, com particular intensidade entre 1952-1954, 1957-1958 e 1961-1962 (UNSCEAR, 1993). A cadência diminuiu significativa-



Fig. 4 - Aspecto de uma escombreira (bacia de deposição) de uma mina de urânio e de uma bacia de gesso fosfatado.

	⁴⁰ K	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Th	²²⁸ Ra
CARVÃO	50	20	20	20	20	20	20	20
CINZAS VOLANTES	265	200	240	930	1700	70	110	130

Quadro II - Comparação das actividades (Bq kg⁻¹) de ²³⁸U, ²³²Th, respectivos descendentes e ⁴⁰K no carvão e em cinzas volantes (fonte: Baxter, 1996).

	Dose efectiva anual (mSv)	
	Média	Intervalo de variação
RADIAÇÃO CÓSMICA		
- FOTÕES	0,28	-
- NEUTRÕES	0,10	-
- RADIONUCLÍDOS COSMOGÉNICOS	0,01	-
TOTAL	0,39	0,3 - 1^{a)}
RADIAÇÃO EXTERNA TERRESTRE		
- EXTERIOR	0,07	-
- INTERIOR	0,41	-
TOTAL	0,48	0,3 - 0,6^{b)}
INALAÇÃO		
- SÉRIES DO URÂNIO E DO TÓRIO	0,006	-
- RADÃO (²²² Rn)	1,15	-
- TORÃO (²²⁰ Rn)	0,10	-
TOTAL	1,26	0,2 - 10^{c)}
INGESTÃO		
- ⁴⁰ K	0,17	-
- SÉRIES DO URÂNIO E DO TÓRIO	0,12	-
TOTAL	0,29	0,2 - 0,8^{d)}
TOTAL	2,4	1 - 10

a) Variação desde o nível do mar até à maior altitude; b) Variação em função da radioactividade dos solos e dos materiais de construção; c) Variação em função da acumulação de radão no interior; d) Variação em função do conteúdo em radionuclídeos dos alimentos e água.

Quadro III - Exposição média mundial a fontes de radiação natural (fonte: UNSCEAR, 2000).

mente a partir de 1963 com a assinatura do *Tratado de Abolição dos Testes Nucleares*, que interditava a realização de testes subaquáticos e na atmosfera. Aumentaram, no entanto, os testes no subsolo, não contemplados naquele Tratado.

A fracção de gases e partículas emitidas durante um ensaio nuclear depende fortemente do cenário em que o mesmo ocorre e do tipo de teste. As maiores emissões de radionuclídeos resultam de testes efectuados na atmosfera, em que se libertam 90 a 100% das partículas e a totalidade dos gases. Tratando-se de ensaios à superfície do solo, a fracção de material particulado que permanece em suspensão na atmosfera um dia após a explosão é consideravelmente menor. No caso de explosões subaquáticas ou ensaios nucleares no subsolo a contenção das partículas é quase total, podendo, no entanto, ser emitida uma considerável fracção de gases (CTBTO, 2001).

Estima-se que, em consequência dos ensaios nucleares realizados no subsolo, tenham sido emitidos para a atmosfera cerca de 5 PBq de ¹³¹I. Comparativamente, as estimativas relativas a testes realizados na atmosfera referem emissões de ¹³¹I da ordem de 6,5 × 10⁵ PBq (UNSCEAR, 1993). Assim, de acordo com as mais recentes compilações (UNSCEAR, 2000), o número total de testes nucleares efectuados foi de 2419, embora os de maior importância, para a disseminação de radionuclídeos no ambiente, tenham sido os cerca de 543 efectuados na atmosfera.

Actualmente, encontra-se em vigor o *Tratado de Proibição Total de Ensaio Nucleares*, assinado em 1996.

No Quadro IV apresenta-se a estimativa da dose efectiva total (em µSv) para as diferentes vias de exposição (externa, inalação e ingestão) relativamente ao período entre 1945 e 1999.



Fig. 5 - Teste nuclear na atmosfera, deserto do Nevada, 1951 (fonte: CTBTO, 2001).

A dose mais elevada, 113 μSv , ocorreu no ano de 1963, descendo para valores da ordem dos 6 μSv a partir da década de noventa.

Os principais contribuintes para a dose de exposição por via externa (média mundial) foram o ^{95}Zr e o ^{95}Nb , resultante do decaimento do primeiro. A partir de 1966, o ^{137}Cs tornou-se o mais importante contribuinte, sendo, presentemente, o único contribuinte para a dose de exposição por via externa.

O mais importante componente da dose anual por ingestão, durante o período de actividade dos testes nucleares, foi o ^{137}Cs devido à transferência mais rápida para a cadeia alimentar. O ^{90}Sr tornou-se o mais importante contribuinte a partir de 1967, devido à contínua transferência para a cadeia alimentar e maior período de retenção no organismo.

Os mais importantes contribuintes para a dose de exposição por inalação foram o ^{144}Ce , o ^{106}Ru , o ^{91}Y , o ^{95}Zr e o ^{90}Sr . A concentração destes radionuclidos no ar e, conseqüentemente, a sua deposição diminuíram rapidamente a partir de 1980, passando a não ter significado a partir de 1985.

	Dose efectiva total (μSv)			
	Externa	Ingestão	Inalação	TOTAL
1945 - 1999	353	492	149	994

Quadro IV - Dose efectiva total (μSv) devida a testes nucleares efectuados entre 1945 e 1999 (fonte: UNSCEAR, 2000).

Produção de energia eléctrica

As emissões para o ambiente de reactores nucleares em funcionamento normal são, em geral, tão baixas que a avaliação das doses resultantes para membros do público tem que ser efectuada com recurso a modelos de simulação. As doses efectivas médias anuais (para a população local) variam com o tipo de reactor e, de acordo com as estimativas do UNSCEAR, 2000, são:

- PWR e GCR – 5 μSv ;
- BWR e HWR – 10 μSv ;
- LWGR – 2 μSv ;
- FBR – 0,04 μSv .

A contribuição para a dose efectiva anual, resultante da dispersão global, é estimada como sendo inferior a 0,2 μSv .

Produção e utilização de radioisótopos

Os radioisótopos são largamente utilizados na indústria, medicina e investigação. As exposições podem ocorrer devido a quantidades vestigiais emitidas durante a fase de produção ou, mais tarde, durante a utilização.

A componente mais importante da globalidade da dose para membros do público é a relativa a familiares de pacientes sujeitos a tratamentos terapêuticos com radioisótopos, sendo o maior contribuinte para a dose o ^{131}I .

De acordo com UNSCEAR, 2000, nos países mais desenvolvidos cerca de 20% das terapias com ^{131}I são utilizadas para tratamento de cancro da tiróide e 80% para tratamento de doentes com hipertiroidismo, o que implica administrações da ordem dos 5 GBq e 0,5 GBq, respectivamente. A dose estimada para membros da família dos pacientes é de 0,5 mSv.

Acidentes em instalações nucleares

Alguns dos acidentes nucleares que ocorreram no passado, em instalações civis e militares, tiveram como consequência a libertação para a atmosfera de significativas quantidades de radionuclidos artificiais, nalguns casos ao nível da estratosfera promovendo o seu transporte a longas distâncias.

Os dois acidentes mais graves envolvendo instalações civis (reactores nucleares) foram o acidente de Three Mile Island, em 1979 nos Estados Unidos, e o acidente de Chernobyl, em 1986 na Ucrânia (respectivamente nível 5 e nível 7 na Escala Internacional de Ocorrências Nucleares, Fig. 6). Desde então, apenas ocorreu um acidente com risco para o exterior das instalações, envolvendo exposição

da população local: Tokaimura, 1999, central de processamento de combustível no Japão.

No caso de Three Mile Island foram libertados para a atmosfera cerca de 370 PBq de gases nobres (em particular ^{133}Xe) e cerca de 550 GBq de ^{131}I (UNSCEAR, 1993). No que diz respeito ao acidente de Chernobyl, o carácter explosivo e o elevado caudal calórico associado levaram a que uma importante fracção das partículas radioactivas produzidas alcançasse a estratosfera, sendo transportadas a longas distâncias. De acordo com UNSCEAR, 1993, foram emitidos para a atmosfera 630 PBq de ^{131}I , 70 PBq de ^{137}Cs e 35 PBq de ^{134}Cs . Estima-se, ainda, que cerca de 34% do ^{131}I e 56% do ^{137}Cs tenham sido transportados e depositados além fronteiras. Para além destes, outros radionuclídeos originados em Chernobyl ($^{103, 106}\text{Ru}$, ^{125}Sb , ^{132}Te , ^{140}Ba , ^{144}Ce , $^{134, 136}\text{Cs}$ e ^{140}La) foram detectados em diferentes países (Fig. 7).

A ESCALA INTERNACIONAL DE OCORRÊNCIAS NUCLEARES

Para uma rápida comunicação da sua importância relacionada com a segurança

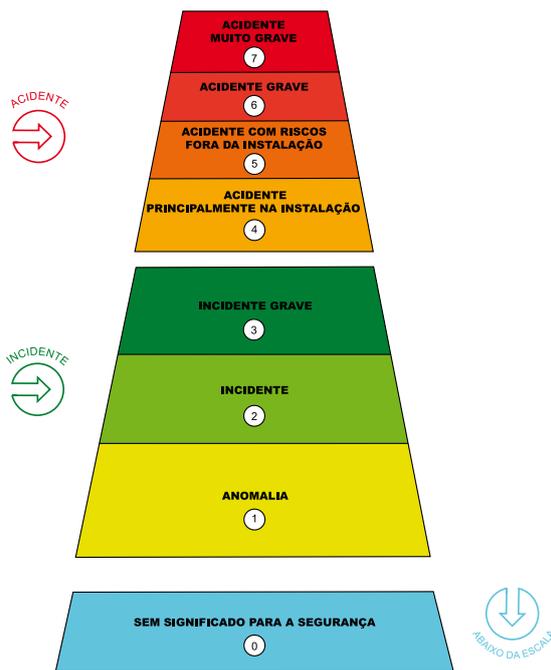


Fig. 6 - Escala Internacional de Ocorrências Nucleares (fonte: GPSN, 1993).

Relativamente a instalações nucleares militares, os dois únicos acidentes com impactes radiológicos significativos (para o exterior das próprias instalações) foram os de Kyshtym, ocorrido em 1957 na Rússia, e o de Windscale, ocorrido no Reino Unido no mesmo ano.

MONITORIZAÇÃO DA RADIOACTIVIDADE NO AMBIENTE

A monitorização da radioactividade ambiental começou por ser motivada pela preocupação relativamente à disseminação da poluição radioactiva originada pelos ensaios nucleares, em particular os ensaios nucleares na atmosfera. Após a entrada em vigor do *Tratado de Abolição dos Testes Nucleares*, a partir de 1963, e com a diminuição gradual dos níveis de radioactividade, a preocupação passou a centrar-se na produção de energia eléctrica por via nuclear, com implementação e reforço das redes de monitorização na área de influência de reactores nucleares e outras instalações do ciclo do combustível nuclear.

Durante todo este período, a radioactividade de origem natural recebeu sempre menor atenção face à radioactividade de origem antropogénica. Só mais recentemente, após o reconhecimento da importante contribuição da componente natural para a dose de exposição total da população e com a publicação das recomendações da EURATOM (Comissão Europeia, 1996), a monitorização da radioactividade de origem natural, nomeadamente a tecnologicamente aumentada, assumiu maior importância.

As redes de monitorização da radioactividade podem ser de diversos tipos:

- Redes de monitorização de rotina internacionais, nacionais ou locais (Fig. 8);
- Redes de alerta (para resposta a emergências);
- Redes de monitorização específicas, para verificação do cumprimento de Tratados, como por exemplo o International Monitoring System, IMS, para verificação do *Tratado de Proibição Total de Ensaios Nucleares* (Fig. 9).

No caso da monitorização de instalações nucleares os principais objectivos são: (1) verificação do cumprimento dos aspectos legais e regulamentares relativamente à contaminação ambiental; (2) verificação e controle das emissões para o exterior e prevenção de eventual acumulação de radioactividade no ambiente; (3) avaliação de doses para grupos críticos.

Já no que diz respeito às redes de monitorização nacionais de rotina, os principais objectivos são o conhecimento dos níveis de radioactividade do país e a garantia do cumprimento das normas de base relativas à protecção radiológica da população em geral.

Neste tipo de redes de vigilância, o controle da radioactividade é geralmente efectuado ao nível das partículas atmosféricas (aerossóis), gases (iodo ou gases raros), deposição

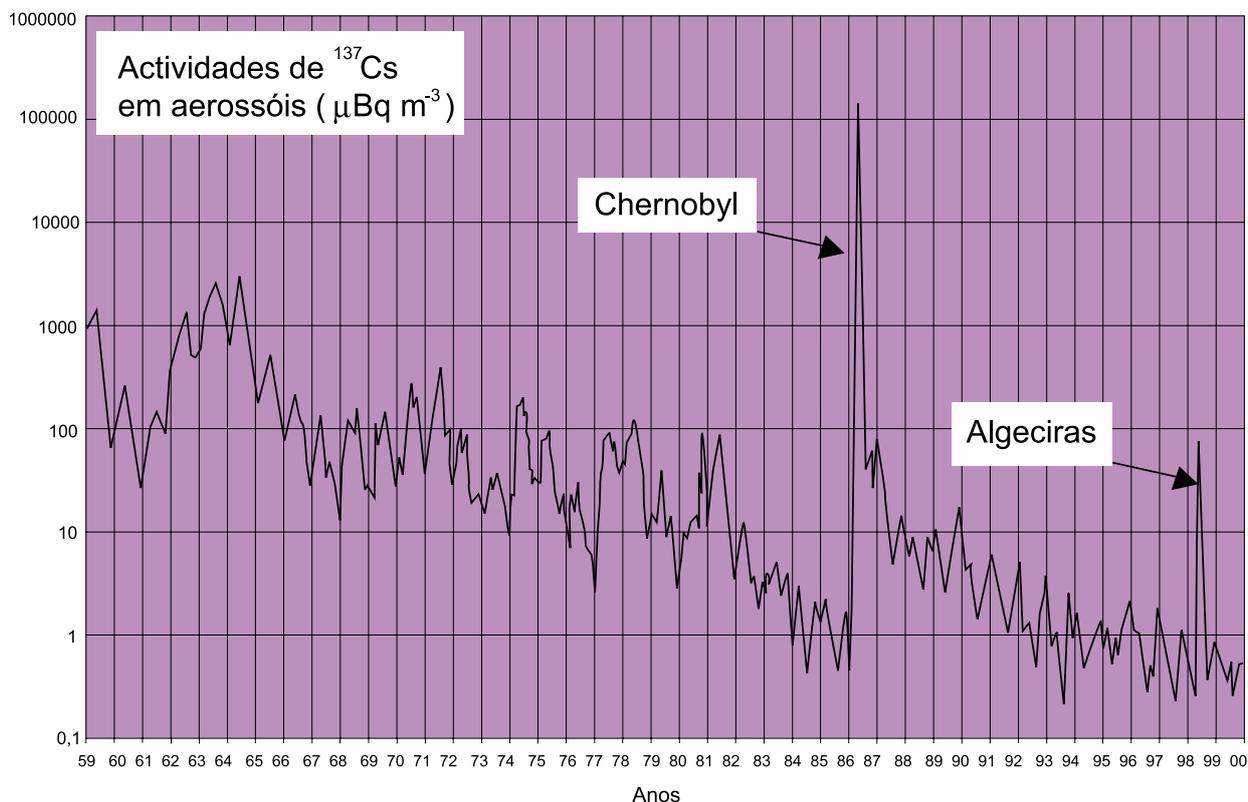


Fig. 7 - Variação da actividade de ^{137}Cs em aerossóis entre 1959 e 2000 (França, Orsay), evidenciando os picos de contaminação de 1986 e 1998 resultantes dos acidentes de Chernobyl e Algeciras, respectivamente (fonte: IRSN).

atmosférica (água da chuva), águas superficiais (rios, albufeiras e águas costeiras), solo e sedimentos, radiação externa, biota e produtos alimentares.



Fig. 8 - Rede europeia de vigilância da radioactividade, REM, no âmbito dos artigos 35º e 36º do Tratado EURATOM (fonte: European Commission, 2005).

Um bom exemplo de uma rede de monitorização internacional é a rede europeia de vigilância da radioactividade (Fig. 8), implementada no âmbito dos artigos 35º e 36º do Tratado EURATOM e que, em última análise, consiste no conjunto das redes de vigilância dos diversos Estados Membros. Neste caso, os meios controlados são a atmosfera (através da amostragem e análise de partículas em suspensão), água superficial, água de consumo, leite e dieta mista.

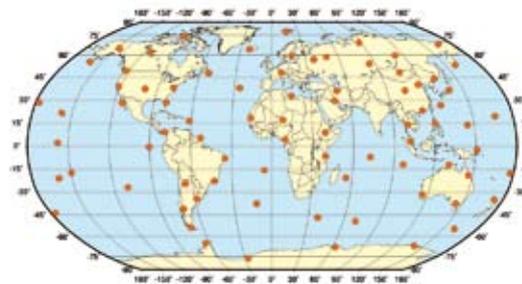


Fig. 9 - Rede de estações de radionuclídeos pertencentes ao International Monitoring System, IMS, para verificação do cumprimento do Tratado de Proibição Total de Ensaio Nucleares (fonte: CTBTO, 2001).

Relativamente a redes de monitorização específicas pode ser referido o International Monitoring System (IMS), ainda em fase de implementação, para verificação do *Tratado de Proibição Total de Ensaios Nucleares*.

O sistema de verificação do IMS consiste, basicamente, numa rede global de sensores e estações de amostragem (na Fig. 9 estão representadas as estações de radionuclídeos) que recorre a diversas tecnologias (radionuclídeos, sismologia, infra-sons e hidro-acústica), de forma a tornar possível a detecção, localização e identificação de sinais gerados por uma eventual explosão nuclear.

PERSPECTIVAS FUTURAS

É previsível que a monitorização da radioactividade ambiental evolua não apenas no que se refere ao desenvolvimento das práticas analíticas utilizadas e ao controle de qualidade das mesmas, mas também no que diz respeito aos possíveis campos de aplicação e à disseminação da informação ao público.

O conhecimento dos níveis (e eventuais efeitos) de radioactividade natural, em geral, e da contribuição das tecnologias não nucleares para o aumento da radioactividade natural, em particular, assumirão cada vez maior importância.

A presença constante de radionuclídeos naturais no ambiente e a sua diversidade relativamente a características físicas e comportamentos geoquímicos, abre inúmeras possibilidades no que diz respeito à sua utilização como traçadores naturais de processos ambientais complexos.

Finalmente, é importante considerar que a exposição humana a radiações ionizantes sempre atraiu a atenção do público, embora a informação sobre o assunto nem sempre tenha sido disponibilizada com a qualidade e transparência desejáveis ou com o grau de profundidade adequado. Desta forma, a evolução das estratégias de disponibilização da informação constituirá um contributo fundamental para uma percepção mais racional pela sociedade das questões relacionadas com a radioactividade.

REFERÊNCIAS

- [1] Baxter, M.S. (1996), Technologically enhanced radioactivity: an overview, *J. Environ. Radioactivity*, **32**, 3-17.
- [2] Comissão Europeia (1996), Directiva 96/29/EURATOM do Conselho de 13 de Maio, Normas de Segurança de Base Relativas à Protecção Sanitária da População e dos Trabalhadores Contra os Perigos Resultantes das Radiações Ionizantes, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias* L 159.
- [3] Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO, (2001), Radionuclides Monitoring, in: Spring Technical Training Programme, International Monitoring System Division, Vienna, Austria, 54 pp.
- [4] European Commission (2005), Environmental Radioactivity in the European Community 1996 – 2000, Radiation Protection nº 141, Nuclear Science and Technology (CD).
- [5] Gabinete de Protecção e Segurança Nuclear, GPSN, (1993), A escala internacional de ocorrências nucleares, Lisboa, 4 pp.
- [6] Hedvall, R., Erlandsson, B. (1996), Radioactivity concentrations in non-nuclear industries, *J. Environ. Radioactivity*, **32**, 19-31.
- [7] Horvath, H. (2000), Aerosols – an introduction, *J. Environ. Radioactivity*, **51**, 5-25.
- [8] <http://www.irsn.org/opera/>
- [9] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, (1988), Sources, effects and risks of ionizing radiation, UN, New York, 647 pp.
- [10] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, (1993), Sources and effects of ionizing radiation, UN, New York, 922 pp.
- [11] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, (2000), Sources and effects of ionizing radiation, Vol. I, Annex B: Exposures from natural radiation sources, UN, New York, 84-156.
- [12] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, (2000), Sources and effects of ionizing radiation, Vol. I, Annex C: Exposures to the public from man-made sources of radiation, UN, New York, 158-291.