

Relatório LPSR-A, Nº 48/2020

**Programas de Monitorização Radiológica Ambiental**  
**(Ano 2019)**

Maria José Madruga, Mário Reis, João Alves, José Corisco, Alfredo Batista, Ana Rita Gomes, Eva Andrade, Joana Pereira, Marta Santos, Miguel Pereira, Pedro Pereira, Sérgio Dias, Yuriy Romanets, Albertina Libânio, Anabela Mourato, Gabriel Silva

Dezembro 2020

## Laboratório de Proteção e Segurança Radiológica

Diretor Adjunto: J. G. Alves  
Endereço: Estrada Nacional 10 (ao km 139,7), 2695-066 Bobadela LRS, Portugal  
Telefone: +351 - 21 994.62.91  
e-mail: [psr.secretariado@ctn.tecnico.ulisboa.pt](mailto:psr.secretariado@ctn.tecnico.ulisboa.pt)  
Pág. web: <http://www.ctn.tecnico.ulisboa.pt>

### Ficha Técnica

Título	Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2019)
Autoria	M.J. Madruga, M. Reis, J. Alves, J. Corisco, A. Batista, A. R. Gomes, E. Andrade, J. Pereira, M. Santos, M. Pereira, P. Pereira, S. Dias, Y. Romanets, A. Libânio, A. Mourato, G. Silva
Edição	Laboratório de Proteção e Segurança Radiológica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Impressão	Eletrónica (pdf)
ISBN	978-989-99833-5-9
Depósito Legal	
Data da Edição	Dezembro 2020

#### Nota importante:

Os direitos de autor sobre este relatório são pertença do Instituto Superior Técnico e dos respectivos autores. A reprodução de todo ou de partes deste relatório ou qualquer outra sua utilização só pode ser realizada após a devida e prévia autorização dos titulares dos direitos de autor que sobre ele incidem.

## ÍNDICE

<i>Resumo</i>	1
<i>Abstract</i>	1
<b>PREÂMBULO</b>	3
<b>I. PROGRAMA A NÍVEL NACIONAL</b>	5
I. 1 INTRODUÇÃO	7
I. 2 RADIOATIVIDADE NA ATMOSFERA	12
I.2.1 Aerossóis	12
I.2.1.1 <i>Materiais e Métodos</i>	12
I.2.1.2 <i>Resultados e Discussão</i>	13
I.2.2. Deposição Atmosférica	16
I.2.2.1 <i>Materiais e Métodos</i>	16
I.2.2.2 <i>Resultados e Discussão</i>	17
I. 3 RADIOATIVIDADE NO MEIO AQUÁTICO	24
I.3.1 Rios	24
I.3.1.1 <i>Materiais e Métodos</i>	24
Águas	27
Sedimentos	27
Plantas aquáticas	27
I.3.1.2 <i>Resultados e Discussão</i>	28
Águas	28
Sedimentos	30
Plantas aquáticas	39
I. 4 RADIOATIVIDADE EM ÁGUAS PARA CONSUMO HUMANO	40
I.4.1 <i>Materiais e Métodos</i>	40
I.4.2 <i>Resultados e Discussão</i>	42
I.5 RADIOATIVIDADE EM COMPONENTES DA CADEIA ALIMENTAR	46
I.5.1 <i>Materiais e Métodos</i>	46
Componentes Individuais e Refeição Completa	46
Leite	47
I.5.2 <i>Resultados e Discussão</i>	48
Componentes Individuais e Refeição Completa	48
Leite	50
I.6 RADIOATIVIDADE EM SOLOS	57
I.6.1 <i>Materiais e Métodos</i>	57
I.6.2 <i>Resultados e Discussão</i>	57

I.7 DOSE DE RADIAÇÃO GAMA AMBIENTAL	59
I.7.1 <i>Material e Métodos</i>	59
I.7.2 <i>Resultados e Discussão</i>	60
I.8 CONCLUSÕES	62
AGRADECIMENTOS	63
REFERÊNCIAS	64
<b>II. PROGRAMA ESPECÍFICO PARA O CAMPUS TECNOLÓGICO E NUCLEAR (SACAVÉM)</b>	71
II.1. INTRODUÇÃO	73
II.2. RADIOATIVIDADE NA ATMOSFERA	75
II.2.1 Aerossóis	75
II.2.1.1. <i>Material e Métodos</i>	75
II.2.1.2. <i>Resultados e Discussão</i>	75
II.2.2. Deposição Atmosférica	75
II.2.2.1. <i>Material e Métodos</i>	75
II.2.2.2. <i>Resultados e Discussão</i>	75
II.3. RADIOATIVIDADE EM SOLOS	76
II.3.1 <i>Material e Métodos</i>	76
II.3.2. <i>Resultados e Discussão</i>	76
II.4. DOSE DE RADIAÇÃO GAMA AMBIENTAL	79
II.4.1. Detetores Ativos	79
II.4.1.1. <i>Material e Métodos</i>	79
II.4.1.2. <i>Resultados e Discussão</i>	79
II.4.2. Detetores Passivos	81
II.4.2.1. <i>Material e Métodos</i>	81
II.4.2.2. <i>Resultados e Discussão</i>	82
II.5.1. Descargas Líquidas	84
II.6. CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS	87
<b>ANEXO I. GARANTIA DA QUALIDADE ANALÍTICA E RESULTADOS</b>	89
<b>ANEXO II. GLOSSÁRIO</b>	91

## PROGRAMAS DE MONITORIZAÇÃO RADIOLÓGICA AMBIENTAL (ANO 2019)

### **Resumo**

Os Artigos 35 e 36 do Tratado EURATOM determinam a obrigação pelos Estados Membros da vigilância radiológica do ambiente. No ano 2019, a vigilância radiológica do ambiente em Portugal constituiu uma das obrigações legais do Instituto Superior Técnico (IST) por força da aplicação do Decreto-Lei 138/2005 de 17 de agosto. A vigilância radiológica ambiental, definida de acordo com as especificidades do país, é realizada através de dois programas de monitorização, um a nível nacional, e outro mais específico direcionado para o Campus Tecnológico e Nuclear (CTN). Este estudo consiste na determinação de radionuclídeos artificiais e naturais em compartimentos ambientais (atmosférico, aquático e terrestre) considerados vias diretas de contaminação para o Homem. Para a sua execução, analisaram-se amostras de aerossóis e de água da chuva, amostras de águas de superfície, de sedimentos e de plantas aquáticas provenientes das principais bacias hidrográficas, amostras de águas de consumo, produtos alimentares, refeições completas, leite e amostras de solos. Realizaram-se também medições contínuas da dose de radiação gama ambiental usando sondas gama (detetores ativos) e dosímetros integradores termoluminescentes (detetores passivos). A concentração de atividade dos radionuclídeos artificiais e naturais foi determinada usando os métodos de medição por espectrometria gama, medição alfa/beta total com contador proporcional e por cintilação em meio líquido e medição beta por cintilação em meio líquido. As concentrações de atividade observadas para os radionuclídeos de origem artificial ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^3\text{H}$ ) são muito baixas e, situam-se frequentemente, abaixo dos valores da atividade mínima detetável, com exceção do rio Tejo onde os valores em  $^3\text{H}$  são superiores ao valor do fundo radioativo natural, mas, sem significado do ponto de vista dos efeitos radiológicos. Os resultados obtidos para os radionuclídeos de origem natural ( $^{40}\text{K}$  e elementos das séries radioativas do Urânio e Tório) são da ordem de grandeza do fundo radioativo natural. Pode concluir-se que a população portuguesa residente não esteve exposta a níveis de radioatividade significativamente mais elevados do que o do fundo radioativo natural, não sendo necessário recomendar qualquer medida de proteção radiológica.

**Palavras Chave:** vigilância radiológica, meio atmosférico, meio aquático, meio terrestre

### **Abstract**

Articles 35 and 36 of the EURATOM Treaty establish the obligation for Member States to carry out radiological surveillance of the environment. In 2019, radiological surveillance of the environment in Portugal was one of the legal obligations of the Instituto Superior Técnico (IST) under Decree-Law 138/2005 of 17 August. The environmental radioactivity surveillance, defined according to the country's specifications, was performed through two monitoring programmes, one at a national level and, other one, more detailed, devoted to the Campus Tecnológico e Nuclear (CTN). This study consists of measuring artificial and natural radionuclides in environmental compartments (atmospheric, aquatic and terrestrial environments) considered as direct pathways of contamination to humans. Samples of aerosols, rainwater, surface water, sediments and aquatic plants, drinking water, mixed diet, complete meals, milk and soils samples were analyzed. Automatic ambient dose rate monitoring (active detectors) and integrated measurements of the ambient dose with thermoluminescent dosimeters (passive dosimeters) were also performed.

The activity concentration of the artificial and natural radionuclides was determined using gamma spectrometry, alpha/beta measurements by proportional counter and liquid scintillation and beta measurements by liquid scintillation. Results show that activity concentrations of the artificial radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^3\text{H}$ ) are, in general very low and, in most cases, below the minimum detectable activity, with exception of samples from the Tejo river, where the tritium values are higher than natural background but without radiological significance. The results for natural radioactivity ( $^{40}\text{K}$ , Uranium and Thorium radioactive series) are of the same order as the magnitude of the radioactive background. It can be concluded that the Portuguese population has not been exposed to radioactivity levels significantly higher than the natural radioactive background. Therefore, there is no need to recommend any radiological protection measure.

**Key Words:** radiological assessment, atmospheric environment, aquatic environment, terrestrial environment



## **PREÂMBULO**

No âmbito do Artigo 35 do Tratado EURATOM, que institui a Comunidade Europeia de Energia Atómica, cada Estado Membro deverá “*providenciar pela criação das instalações necessárias para o controlo permanente do grau de radioatividade da atmosfera, das águas e do solo, bem como pelo cumprimento das normas de base em proteção radiológica*”.

O Artigo 36 do Tratado EURATOM requer que os resultados da monitorização sejam comunicados periodicamente à Comissão Europeia.

A recomendação 2000/473/EURATOM da Comissão sobre a aplicação do Artigo 36 descreve as normas específicas para a monitorização dos níveis de radioatividade no ambiente, tais como, a estrutura das redes de monitorização, o meio a amostrar, o tipo de amostras e medição, etc.

O Instituto Superior Técnico (IST) através do seu Laboratório de Proteção e Segurança Radiológica (LPSR), tem vindo a proceder à monitorização radiológica do ambiente em Portugal, conforme disposto no Decreto-Lei 138/2005, 17 de agosto e dando cumprimento ao estabelecido nos Artigos 35 e 36 do Tratado EURATOM.

Os resultados da monitorização radiológica do ambiente no Continente e nas Regiões Autónomas da Madeira e Açores são publicados anualmente em relatórios internos (disponíveis em [http://www.ctn.tecnico.ulisboa.pt/docum/pt\\_bib\\_reltec.htm](http://www.ctn.tecnico.ulisboa.pt/docum/pt_bib_reltec.htm)) e inseridos na base de dados europeia “Radioactivity Environmental Monitoring (REM)”, sediada no Joint Research Centre (JRC) em Ispra (Itália), através do Sistema de Submissão de Dados (REM Data Submission). Alguns desses dados são posteriormente publicados em relatórios da Comissão Europeia (EUR 23950 EN, 2009; De Cort *et al.*, 2018).

Neste relatório apresentam-se os resultados do programa de monitorização radiológica ambiental a nível nacional (Portugal Continental e as Regiões Autónomas da Madeira e Açores) e do programa específico para o Campus Tecnológico e Nuclear, referentes ao ano de 2019.

O principal objetivo destes programas consiste na medição contínua e periódica de radionuclídeos naturais e artificiais, existentes em componentes ambientais (ar, água, solos, etc.) e em produtos da cadeia alimentar. Estes componentes são considerados as vias diretas de transferência nos vários meios, atmosférico, aquático e terrestre e em última análise, na transferência da contaminação radioativa para o Homem. Estes programas foram delineados de modo a assegurar o acompanhamento da exposição efetiva da população Portuguesa à radioatividade ambiental.





## **I. PROGRAMA A NÍVEL NACIONAL**

### ***Investigadores***

Maria José Madruga  
Mário Reis  
João Alves  
José Corisco

### ***Técnicos Superiores***

Ana Rita Gomes  
Eva Andrade  
Joana Pereira  
Marta Santos  
Miguel Pereira  
Sérgio Dias  
Yuriy Romanets

### ***Técnicos***

Albertina Libânio  
Anabela Mourato  
Gabriel Silva



## **I. 1 INTRODUÇÃO**

O principal objetivo da vigilância radiológica ambiental é monitorizar os níveis de radiação ambiental e detetar todas as alterações significativas na radioatividade a que o público está exposto, além de poder assegurar o cumprimento das normas básicas de segurança previstas para a proteção da saúde do público em geral, contra os perigos resultantes das radiações ionizantes. A execução regular de programas de vigilância radiológica também desenvolve e mantém competências e prontidão na resposta a situações de emergência radiológica.

O programa de monitorização radiológica ambiental a nível nacional, em curso no Laboratório de Proteção e Segurança Radiológica, consiste de duas redes complementares, a rede dispersa e a rede densa (COM/473/EURATOM, 2000; Decreto-Lei 138/2005). Para a rede dispersa selecionou-se um número limitado de locais de amostragem, os quais são constantes ao longo dos anos, onde as medições são normalmente realizadas com maior grau de sensibilidade e a frequência da amostragem é mensal, permitindo seguir a evolução da concentração de atividade dos radionuclídeos ao longo dos meses e dos anos. A rede densa é composta por um maior número de locais de amostragem, que podem variar ao longo dos anos, cobrindo todo o território sendo a frequência de amostragem trimestral, semestral ou anual. A seleção dos pontos de amostragem foi efetuada de acordo com as recomendações da Comissão Europeia (COM/473/EURATOM, 2000; Decreto-Lei 138/2005) e tendo em consideração as especificidades do país. Apresentam-se em seguida alguns casos concretos.

No rio Tejo, devido à existência de centrais nucleares no troço espanhol do rio, principalmente a Central Nuclear de Almaraz que está localizada a cerca de 100 km da fronteira portuguesa, definiu-se um programa de monitorização mais detalhado, que inclui um maior número de locais e maior frequência de amostragem, tipos de amostras (água, sedimentos e plantas aquáticas) e de análises. Na rede dispersa selecionou-se Vila Velha de Ródão como local de amostragem representativo para águas de superfície, por ser o local no rio Tejo, mais próximo da fronteira com Espanha.

Na seleção dos locais de amostragem para o leite considerou-se, na rede dispersa a região norte de Portugal por ser a região onde se concentra a maior produção leiteira, e a região de Portalegre por se situar junto à fronteira com Espanha e próximo da Central Nuclear de Almaraz. As amostras de dieta mista podem ser constituídas por refeições completas ou por componentes individualizados. Na rede dispersa, selecionou-se como tipo de amostra a refeição completa por ser mais representativa da dieta mista e como ponto de amostragem uma cantina universitária da região de Lisboa, por ser um local onde é consumido um número

elevado de refeições. Na rede densa, consideraram-se só os componentes individuais e os locais de amostragem foram selecionados de modo a abrangerem todo o país.

A avaliação da radioatividade em água para consumo humano é muito importante porque a água representa um bem vital para o Homem, podendo a sua ingestão vir a tornar-se uma via crítica, após um acidente nuclear e/ou em regiões de elevado fundo radiológico. Selecionaram-se como pontos de amostragem representativos, na rede dispersa, a barragem de Castelo de Bode (rio Zêzere), uma das maiores captações de água em Portugal, e Lisboa, devido ao elevado número de consumidores.

Relativamente à radioatividade na atmosfera, determinada através das partículas em suspensão no ar (aerossóis), selecionou-se o Campus Tecnológico e Nuclear (CTN) em Sacavém como o local de amostragem na rede dispersa. A deposição atmosférica foi controlada através da medição da radioatividade em água da chuva, com dois locais de amostragem, o CTN em Sacavém e em Castelo Branco (local sujeito à influência da Central Nuclear de Almaraz) e em solos (rede densa).

Procedeu-se ainda à avaliação da dose de radiação gama ambiental (detetores passivos) ao longo do país. Os locais de amostragem foram selecionados de forma a ser possível monitorizar as regiões mais densamente habitadas como Lisboa, Porto e a região correspondente ao eixo Bragança, Penhas Douradas, Castelo Branco e Faro. Escolheram-se também o Funchal e Ponta Delgada como locais representativos das Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores, respetivamente.

Nas Figuras I.1 e I.2 estão representados os locais de amostragem e o tipo de amostras para a rede dispersa e rede densa, respetivamente.

Nas Figuras I.3 e I.4 estão representados graficamente o tipo de amostras e de análises e as respetivas percentagens referentes ao ano de 2019.

**Nota 1:** quando os valores obtidos para um dado radionuclido ou para as contagens totais (alfa/beta) são suficientemente baixos em comparação com o valor do fundo, de forma a não permitirem uma identificação inequívoca (i.e. com um grau de confiança de 95%), é indicado como seu majorante o valor da atividade mínima detetável (MDA). Este valor (MDA) depende do valor de fundo, das condições de contagem (tempo de contagem, matriz e geometria da amostra) e do rendimento químico da análise.

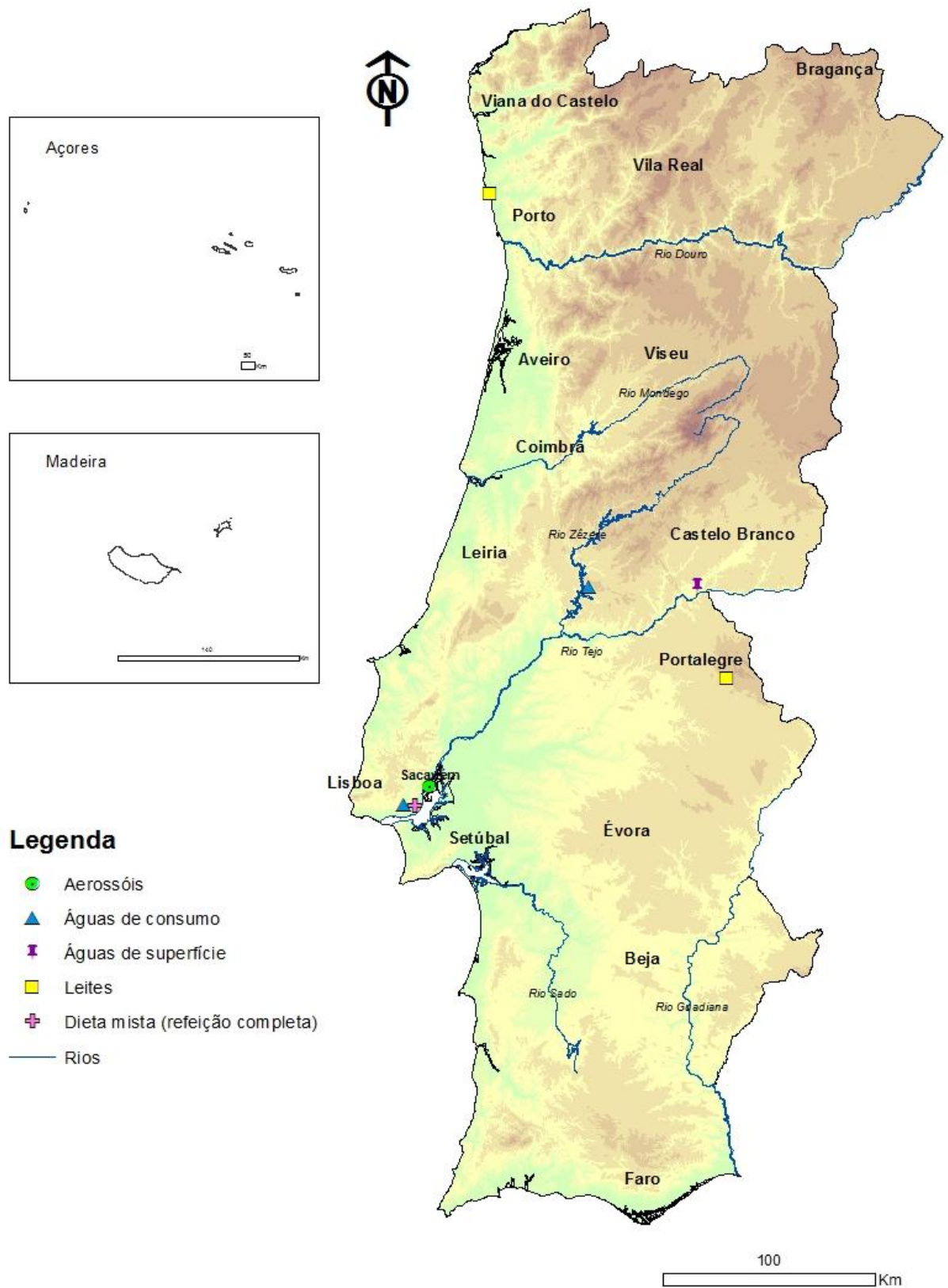


Figura I.1- Locais de amostragem e tipo de amostras analisadas na rede dispersa de Portugal Continental (as Regiões Autónomas não são consideradas nesta rede).

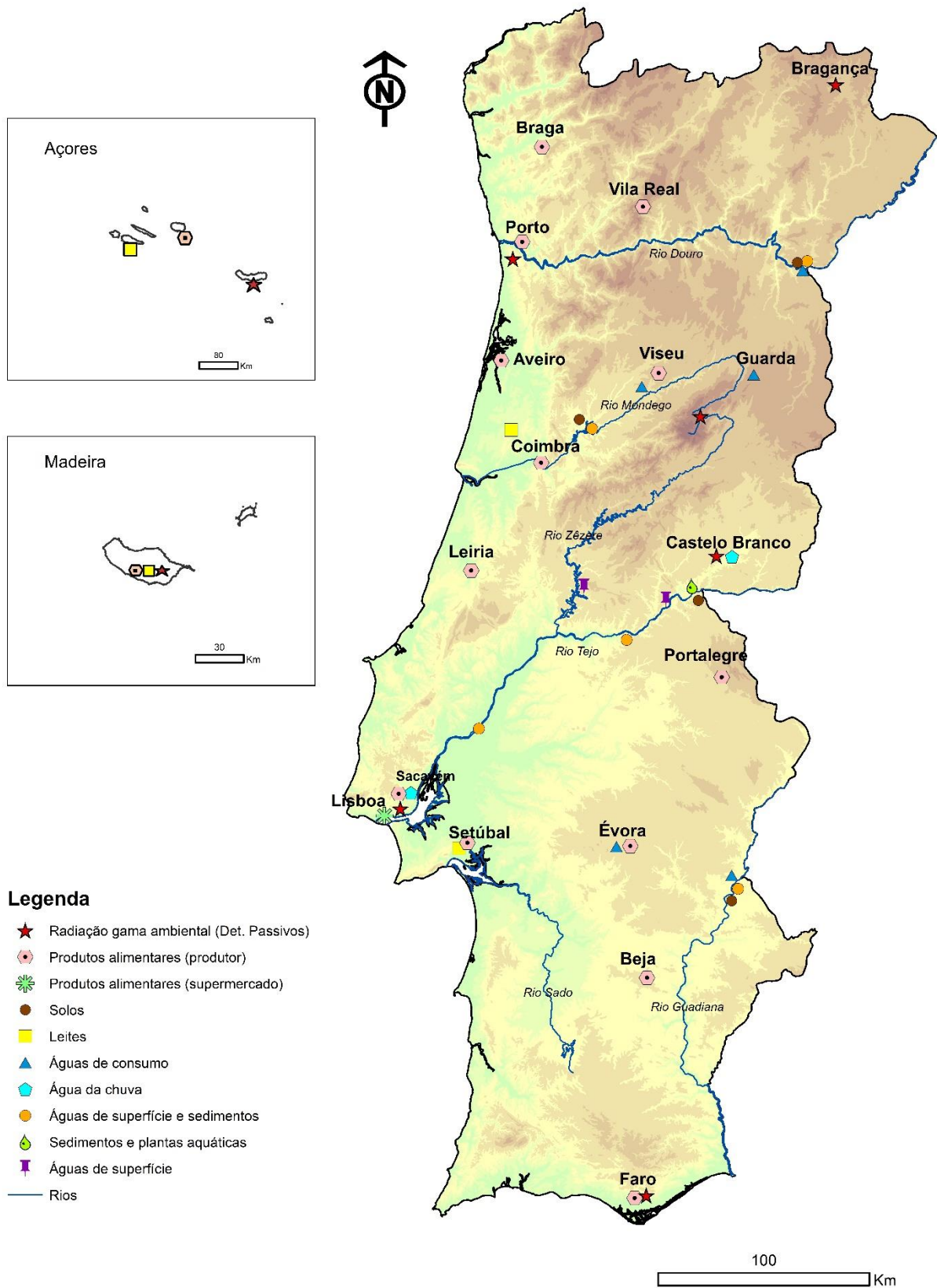


Figura I.2- Locais de amostragem e tipo de amostras analisadas na rede densa de Portugal Continental e nas Regiões Autónomas.

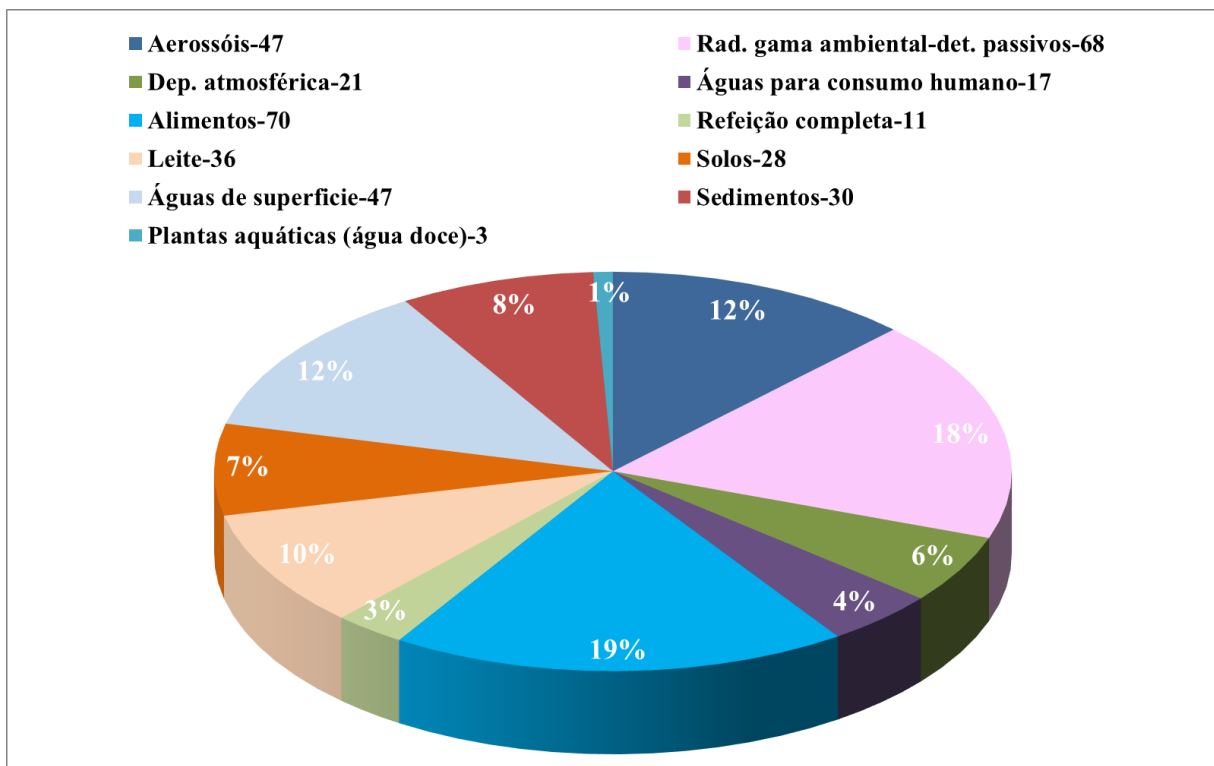


Figura I.3- Tipo, número de amostras analisadas e respetiva percentagem.

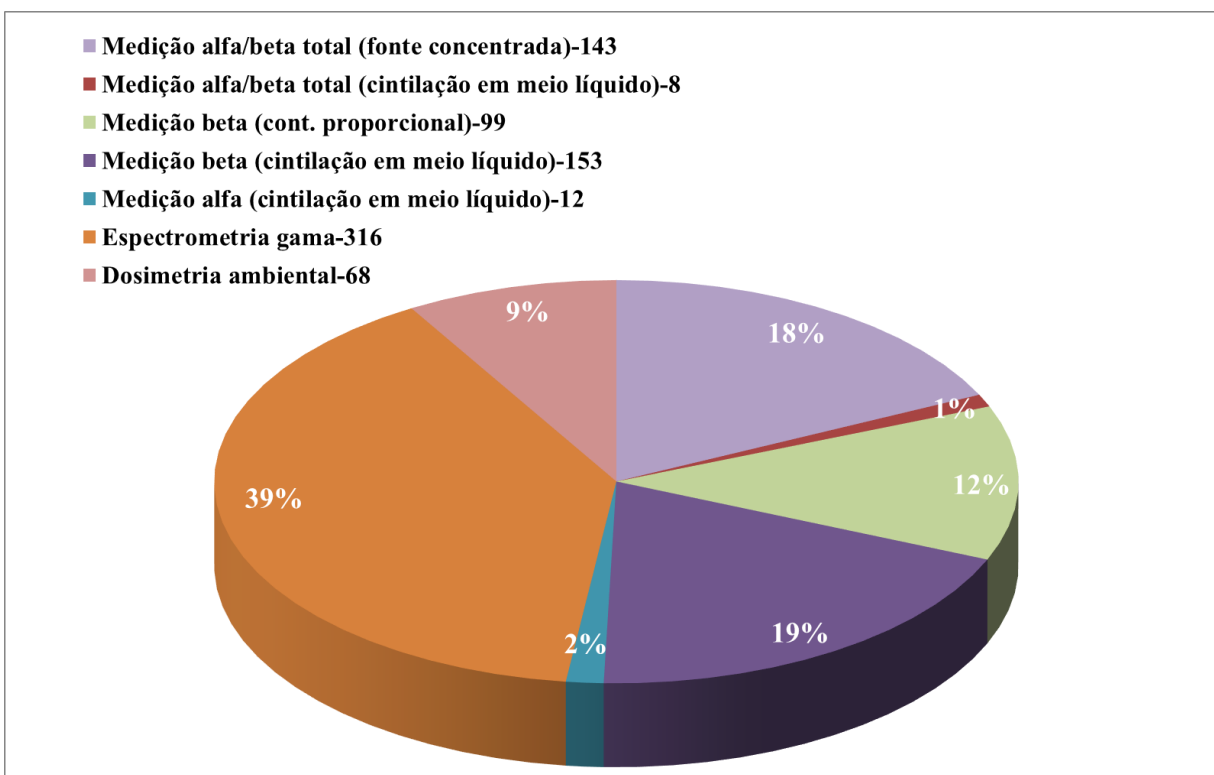


Figura I.4- Número de análises e respetiva percentagem por técnica de medição.

## I. 2 RADIOATIVIDADE NA ATMOSFERA

### I.2.1 Aerossóis

A radioatividade existente na atmosfera pode ter origem natural ou artificial e resulta, basicamente, de três fontes principais: i) exalação para a atmosfera de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$ , formados através da desintegração radioativa do  $^{226}\text{Ra}$  e do  $^{224}\text{Ra}$  (constituintes naturais de solos e rochas) pertencentes às séries radioativas naturais do Urânio e do Tório, respetivamente. Um bom exemplo é o da ocorrência do  $^{210}\text{Pb}$ , descendente de longo período de semidesintegração do  $^{222}\text{Rn}$ ; ii) formação de radionuclídeos cosmogénicos, como por exemplo o  $^7\text{Be}$ , através da interação da radiação cósmica com gases atmosféricos como o carbono, o azoto e o oxigénio; iii) radionuclídeos artificiais, produtos de cisão e ativação, resultantes de atividades antropogénicas (testes nucleares, produção de energia elétrica por via nuclear, produção de radioisótopos e acidentes). O radionuclídeo artificial  $^{137}\text{Cs}$ , devido ao seu longo período de semidesintegração, constitui um bom indicador de eventual contaminação radioativa.

Independentemente da sua origem, os isótopos radioativos podem ocorrer na atmosfera na forma gasosa ou particulada (associados ao aerossol atmosférico). Em geral, a forma particulada é a que assume maior significado de risco radiológico, uma vez que essas partículas através dos processos de transporte e deposição atmosférica interagem com a biosfera.

#### I.2.1.1 Materiais e Métodos

A avaliação da radioatividade atmosférica no ar de superfície em Portugal foi efetuada através da amostragem contínua de aerossóis, recorrendo a uma estação fixa do tipo ASS-500, instalada no Campus Tecnológico e Nuclear (CTN) em Sacavém (Figuras I.1 e I.5). A estação está equipada com uma bomba de sucção de alto volume, com uma cabeça de aspiração de grandes dimensões e um medidor contínuo de fluxo, com totalizador de volume de ar filtrado. Os períodos de amostragem têm a duração de uma semana, o que corresponde, em geral, a volumes médios de ar filtrado de  $10^5 \text{ m}^3/\text{semana}$ . Como substrato de recolha foram utilizados filtros Petrianov tipo FPP-15-1.5 de  $44 \text{ cm} \times 44 \text{ cm}$ . Após cada período de amostragem os filtros são comprimidos através de uma prensa hidráulica (MATRA, GmbH), de forma a obter amostras de geometria cilíndrica (5 cm de diâmetro e 1 cm de espessura), sendo posteriormente analisadas por espectrometria  $\gamma$  (NRA\_PT\_11) em detetor de Ge hiperpuro (BEGE, com 50% de eficiência relativa em 1332 keV) (Figura I.5). Os espectros resultantes são analisados com o *software* Genie 2000 (Canberra). A eficiência de deteção foi determinada usando padrões radioativos multi-gama rastreáveis ao NIST (Laboratório de Padrões de Radioatividade



POLATOM) com energias variando entre 46,5 keV ( $^{210}\text{Pb}$ ) e 1836 keV ( $^{88}\text{Y}$ ) personalizados para reproduzir exatamente as geometrias das amostras.



**Figura I.5-** Estação de amostragem contínua de aerossóis (tipo ASS-500) recolha e preparação dos filtros para medição por espectrometria gama (CTN, Sacavém).

### ***1.2.1.2 Resultados e Discussão***

Na Tabela I.1 apresentam-se os valores de concentração de atividade médios mensais e anuais para os radionuclídeos detetados em aerossóis e ainda as concentrações médias mensais de partículas totais em suspensão (PTS) para o ano de 2019. Na Figura I.6 representa-se a evolução da concentração de atividade em  $^7\text{Be}$  e  $^{210}\text{Pb}$  e da concentração de partículas totais em suspensão ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período entre 2010 e 2019.

A concentração média mensal de partículas totais em suspensão variou entre  $21 \mu\text{g m}^{-3}$  (nos meses de novembro e dezembro) e  $64 \mu\text{g m}^{-3}$  (no mês de maio).

A concentração de atividade média mensal em  $^7\text{Be}$  variou entre  $2,09 \pm 0,21 \text{ mBq m}^{-3}$  e  $7,01 \pm 0,71 \text{ mBq m}^{-3}$ , apresentando um valor médio anual de  $4,9 \pm 1,7 \text{ mBq m}^{-3}$ . Embora se note uma ligeira diminuição relativamente ao ano anterior, estes valores são consistentes com a gama de concentrações referida por outros autores para diferentes locais (Hernandez *et al.*, 2007; Heinrich *et al.*, 2007; Vallés *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2011; Dueñas *et al.*, 2011; Leppänen *et al.*, 2012). A concentração de atividade média mensal mais elevada de  $^7\text{Be}$  ocorreu em março ( $7,01 \pm 0,71 \text{ mBq m}^{-3}$ ), verificando-se a mesma tendência de valores mais elevados durante os períodos da Primavera e Verão, ou seja, entre março e julho (Tabela I.1).

Relativamente ao  $^{210}\text{Pb}$ , a concentração da sua atividade média mensal variou entre  $0,122\pm 0,035 \text{ mBq m}^{-3}$  e  $0,65\pm 0,10 \text{ mBq m}^{-3}$ , com um valor médio anual de  $0,41\pm 0,17 \text{ mBq m}^{-3}$  que, embora inferior ao registado no ano anterior, se encontra ainda dentro da gama de valores reportados por outros autores (Abe *et al.*, 2010; Baskaran, 2011; Dueñas *et al.*, 2011).

A evolução da concentração de atividade em  $^7\text{Be}$  e  $^{210}\text{Pb}$  representada na Figura I.6, com valores médios de  $3,65 \text{ mBq m}^{-3}$  para o  $^7\text{Be}$  e  $0,37 \text{ mBq m}^{-3}$  para o  $^{210}\text{Pb}$ , é idêntica à obtida para séries temporais entre 2001 e 2010 (Carvalho *et al.*, 2013). O valor médio da concentração de atividade em  $^7\text{Be}$  para a série temporal 2010-2019 ( $3,65 \text{ mBq m}^{-3}$ ) encontra-se dentro do intervalo de variação ( $3,1$  e  $4,8 \text{ mBq m}^{-3}$ ) dos valores registados em várias estações da Península Ibérica (Carvalho *et al.*, 2013).

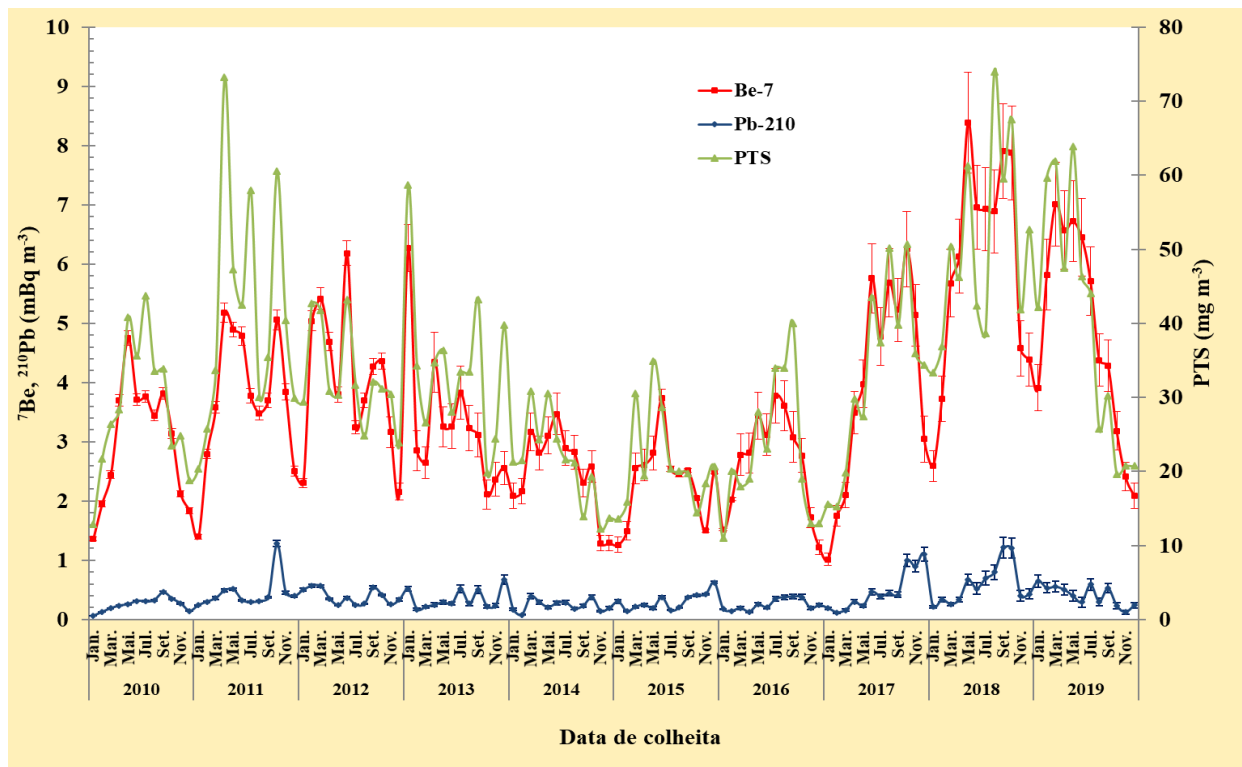
No que diz respeito à concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$ , todos os valores se encontram abaixo da atividade mínima detetável.

Numa perspetiva conservativa, considerou-se para o cálculo da dose efetiva por inalação, o maior valor de atividade mínima detetável registado para o  $^{137}\text{Cs}$  no ano de 2019:  $0,48 \mu\text{Bq m}^{-3}$ . Com base neste pressuposto, a dose de radiação por inalação de  $^{137}\text{Cs}$  será inferior a  $0,02 \text{ nSv a}^{-1}$ .

**Tabela I.1- Valores de concentração de atividade (médias mensais  $\pm 2\sigma$ ) em aerossóis recolhidos no CTN em Sacavém. PTS é a concentração média mensal das partículas totais em suspensão.**

Data de colheita	$^7\text{Be}$ (mBq m <sup>-3</sup> )	$^{137}\text{Cs}$ ( $\mu\text{Bq m}^{-3}$ )	$^{210}\text{Pb}$ (mBq m <sup>-3</sup> )	PTS ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )
<b>Janeiro</b>	3,91 $\pm$ 0,39	< 0,47	0,65 $\pm$ 0,10	42
<b>Fevereiro</b>	5,82 $\pm$ 0,60	< 0,39	0,535 $\pm$ 0,080	60
<b>Março</b>	7,01 $\pm$ 0,71	< 0,43	0,555 $\pm$ 0,087	62
<b>Abril</b>	6,57 $\pm$ 0,67	< 0,43	0,505 $\pm$ 0,091	47
<b>Mai</b>	6,72 $\pm$ 0,68	< 0,47	0,399 $\pm$ 0,093	64
<b>Junho</b>	6,46 $\pm$ 0,65	< 0,48	0,292 $\pm$ 0,081	46
<b>Julho</b>	5,71 $\pm$ 0,58	< 0,38	0,593 $\pm$ 0,096	44
<b>Agosto</b>	4,38 $\pm$ 0,44	< 0,38	0,300 $\pm$ 0,063	26
<b>Setembro</b>	4,29 $\pm$ 0,43	< 0,31	0,530 $\pm$ 0,082	30
<b>Outubro</b>	3,18 $\pm$ 0,32	< 0,33	0,232 $\pm$ 0,047	20
<b>Novembro</b>	2,42 $\pm$ 0,24	< 0,27	0,122 $\pm$ 0,035	21
<b>Dezembro</b>	2,09 $\pm$ 0,21	< 0,24	0,239 $\pm$ 0,043	21
<b>Média <math>\pm \sigma</math> (n=12)</b>	<b>4,9<math>\pm</math>1,7</b>	<b>&lt; 0,38</b>	<b>0,41 <math>\pm</math> 0,17</b>	<b>40 <math>\pm</math> 17</b>

Atividade mínima detetável em  $^{137}\text{Cs}$  (a)



**Figura I.6 - Evolução temporal da concentração de atividade em  $^7\text{Be}$  e  $^{210}\text{Pb}$  (mBq m<sup>-3</sup>) e da concentração de partículas em suspensão ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) em aerossóis recolhidos no CTN em Sacavém.**

## **I.2.2. Deposição Atmosférica**

### **I.2.2.1 Materiais e Métodos**

As amostras de água da chuva, correspondentes a um período de amostragem mensal, foram recolhidas na Estação Meteorológica de Castelo Branco e no CTN, em Sacavém (Figura I.2). O dispositivo de recolha da amostra é constituído por um coletor de deposição atmosférica total, em tronco de pirâmide quadrangular, com 1 m<sup>2</sup> de secção.

Da amostra recolhida, 1 litro é utilizado para a determinação da atividade em trítio (<sup>3</sup>H). Da amostra restante, após filtração, 1 litro é utilizado para a determinação da atividade beta total na matéria em suspensão, fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ ), 3 a 5 litros para a determinação da atividade alfa/beta total na matéria dissolvida, fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ ) e num máximo de 30 litros concentrados a 1 litro (por evaporação lenta em placa elétrica) para a determinação dos radionuclídeos emissores gama (<sup>7</sup>Be, <sup>137</sup>Cs) na fase solúvel e, posteriormente, para a determinação da concentração em <sup>90</sup>Sr por medição beta.

Para a análise por espectrometria gama (NRA\_PT\_11) foi usada a geometria “Marinelli” e detetores de germânio hiperpuro (GeHp), acoplados a sistemas de aquisição de dados Multiport II (Canberra). Os dados foram processados usando o *software* Genie 2000 (Canberra). Os sistemas foram calibrados usando padrões radioativos multi-gama rastreáveis ao NIST (Laboratório de Padrões de Radioatividade POLATOM) com energias variando entre 46,5 keV (<sup>210</sup>Pb) e 1836 keV (<sup>88</sup>Y) personalizados para reproduzir exatamente as geometrias das amostras.

As metodologias seguidas para a determinação das atividades alfa total e beta total em águas não salinas – método por fonte concentrada (NRA\_PT\_01) – baseiam-se nas Normas ISO 9696 (2017) e ISO 9697 (2018), respetivamente. A medição de atividade alfa total e beta total é feita em simultâneo num sistema de contagem  $\alpha/\beta$  com um detetor proporcional de fluxo gasoso (TENNELEC, Canberra), previamente calibrado com padrões alfa (<sup>241</sup>Am) e beta (<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y).

A determinação da concentração de atividade em <sup>3</sup>H e <sup>90</sup>Sr foi efetuada recorrendo a análises específicas.

A metodologia para a determinação da radioatividade devida ao <sup>3</sup>H baseou-se na Norma ISO 9698 (2019) com enriquecimento isotópico (Gomes *et al.*, 2017). Partindo de 1 litro de água, não acidificada, procedeu-se a uma purificação, por destilação, e ao enriquecimento isotópico, por eletrólise em corrente contínua, seguido de nova destilação, sendo as amostras posteriormente medidas num espectrómetro de cintilação em meio líquido (Tri-Carb 3170 TR/SL, Packard) (Madruga *et al.*, 2009b).

Para o  $^{90}\text{Sr}$  foi utilizada uma técnica radioquímica baseada em separações e purificações sucessivas da amostra, fixando-se o  $^{90}\text{Sr}$  numa resina da EICHROM específica para este radionuclido. As amostras foram medidas num sistema de deteção de baixo fundo utilizando um detetor proporcional de fluxo gasoso (TENNELEC, Canberra), devidamente calibrado com fontes padrão, preparadas na mesma forma química e com a mesma geometria das amostras a analisar.

### ***1.2.2.2 Resultados e Discussão***

Nas Tabelas I.2 e I.3 apresentam-se os valores da concentração de atividade,  $A$ , dos diferentes radionuclidos analisados em amostras de água da chuva recolhidas em Sacavém (Campus Tecnológico e Nuclear) e em Castelo Branco (estação meteorológica da rede de estações do Instituto Português do Mar e da Atmosfera).

Nas Tabelas I.4 e I.5 apresentam-se os fluxos mensais de deposição atmosférica para Sacavém e Castelo Branco, respetivamente. Os valores de precipitação apresentados nas referidas Tabelas foram obtidos no *site* do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), no caso de Castelo Branco, e através de uma estação meteorológica EMA instalada no CTN, no caso de Sacavém.

Os fluxos mensais foram obtidos multiplicando a concentração de atividade, em  $\text{Bq L}^{-1}$ , pela precipitação acumulada mensalmente, em mm, e correspondem a valores de deposição total (por via húmida e seca), uma vez que os coletores se encontram expostos durante a totalidade do período de amostragem, mesmo na ausência de precipitação. Nas Figuras I.7 e I.8 representam-se graficamente os valores dos fluxos mensais de deposição em atividade alfa e beta totais,  $^7\text{Be}$  e  $^3\text{H}$ , bem como os valores de precipitação em Sacavém e Castelo Branco, respetivamente.

A precipitação acumulada ao longo do ano de 2019 em Sacavém (482 mm) foi da mesma ordem de grandeza da precipitação acumulada na estação de Castelo Branco (558 mm), em ambos os casos significativamente inferior aos registados no ano anterior (773 mm e 795 mm em Sacavém e Castelo Branco, respetivamente).

Os fluxos de deposição de atividade beta total ( $14 \text{ Bq m}^{-2}$ ) e atividade alfa total ( $8 \text{ Bq m}^{-2}$ ) registados em Sacavém são semelhantes aos valores obtidos para Castelo Branco ( $10 \text{ Bq m}^{-2}$  e  $6 \text{ Bq m}^{-2}$ , respetivamente) e da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos no ano anterior. Em relação ao  $^7\text{Be}$ , os fluxos de deposição foram superiores em Sacavém ( $68 \text{ Bq m}^{-2}$ ), relativamente a Castelo Branco ( $34 \text{ Bq m}^{-2}$ ), sendo em ambos os casos significativamente inferiores aos valores registados no ano anterior ( $170 \text{ Bq m}^{-2}$  em Sacavém e  $425 \text{ Bq m}^{-2}$  em Castelo Branco). Os fluxos de deposição para o  $^3\text{H}$  em 2019 foram, tanto em Sacavém como

em Castelo Branco, muito inferiores aos registados no ano anterior, o que se deve às fracas taxas de precipitação registadas ao longo de todo o ano de 2019.

Tabela I.2 - Valores de atividade específica,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq L^{-1}$ ), de radionuclídeos artificiais e naturais em água da chuva colhida em Sacavém (CTN).

Data de Colheita	$^3H$	Fase solúvel $\varnothing \leq 0,45 \mu m$					Fase particulada $\varnothing > 0,45 \mu m$
		$^7Be$	$^{90}Sr$	$^{137}Cs$	Beta total	Alfa total	Beta total
<b>Janeiro</b>	<0,41 (a)	0,160±0,036	(g)	<3,1x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0190±0,0021	0,0055±0,0020	<0,010 (f)
<b>Fevereiro</b>	0,50±0,22	<0,55 (b)	(g)	<52x10 <sup>-3</sup> (d) <sup>1</sup>	0,0502±0,0070	<0,012 (e)	<0,020 (f)
<b>Março</b>	<0,36 (a)	0,170±0,043	<0,38 (c)	<2,8x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0377±0,0031	0,0136±0,0033	<0,0088 (f)
<b>Abril</b>	<0,39 (a)	0,081±0,028	<0,74 (c)	<2,3x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0311±0,0027	0,0095±0,0030	<0,012 (f)
<b>Mai</b>	<0,25 (a)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
<b>Junho</b>	<0,41 (a)	(g)	(g)	(g)	0,0615±0,0048	<0,0054 (e)	<0,020 (f)
<b>Julho</b>	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
<b>Agosto</b>	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
<b>Setembro</b>	<0,42 (a)	(g)	(g)	(g)	0,0465±0,0034	0,0067±0,0027	0,0168±0,0096
<b>Outubro</b>	<0,46 (a)	0,064±0,031	<0,52 (c)	<2,7x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0108±0,0016	0,0065±0,0023	0,0134±0,0054
<b>Novembro</b>	<0,42 (a)	0,229±0,053	<0,50 (c)	<2,4x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0289±0,0028	0,0481±0,0062	0,0071±0,0038
<b>Dezembro</b>	<0,41 (a)	0,172±0,038	<0,39 (c)	<2,5x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0258±0,0025	0,0031±0,0021	0,0138±0,0058

Atividade mínima detetável em  $^3H$  (a),  $^7Be$  (b),  $^{90}Sr$  (c),  $^{137}Cs$  (d), alfa total na fase solúvel (e) e beta total na fase particulada (f); volume de amostra insuficiente para análise (g);

<sup>1</sup> Volume de amostra <30 L (1,0 L)

**Tabela I.3 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  (k=2), (Bq L<sup>-1</sup>), de radionuclídeos artificiais e naturais em água da chuva colhida em Castelo Branco (estação meteorológica).**

Data de Colheita	<sup>3</sup> H	Fase solúvel Ø ≤ 0,45 µm					Fase particulada Ø > 0,45 µm
		<sup>7</sup> Be	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	Beta total	Alfa total	Beta total
<b>Janeiro</b>	<0,37 (a)	<0,68 (b)	(g)	<83x10 <sup>-3</sup> (d) <sup>2</sup>	0,0406±0,0036	0,0135±0,0027	<0,010 (f)
<b>Fevereiro</b>	<0,41 (a)	<0,15 (b)	(g)	<11x10 <sup>-3</sup> (d) <sup>3</sup>	0,0195±0,0021	0,0058±0,0021	<0,011 (f)
<b>Março</b>	<0,41 (a)	(g)	(g)	(g)	0,0237±0,0024	0,0179±0,0033	<0,017 (f)
<b>Abril</b>	<0,39 (a)	0,134±0,058	<0,47 (c)	<2,7x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0107±0,0020	0,0077±0,0022	<0,046 (f)
<b>Mai</b>	<0,24 (a)	<0,22 (b)	(g)	<20x10 <sup>-3</sup> (d) <sup>4</sup>	(g)	(g)	<0,028 (f)
<b>Junho</b>	<0,41 (a)	(g)	(g)	(g)	0,0204±0,0032	0,0085±0,0027	<0,026 (f)
<b>Julho</b>	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
<b>Agosto</b>	<0,44 (a)	(g)	(g)	(g)	0,0179±0,0023	0,0060±0,0026	0,089±0,015
<b>Setembro</b>	<0,42 (a)	<0,26 (b)	(g)	<31x10 <sup>-3</sup> (d) <sup>5</sup>	0,0178±0,0021	0,0078±0,0023	0,0129±0,0055
<b>Outubro</b>	<0,44 (a)	0,079±0,031	(g)	<3,3x10 <sup>-3</sup> (d)	0,0226±0,0027	0,0387±0,0052	0,0171±0,0056
<b>Novembro</b>	<0,42 (a)	0,218±0,049	<0,51 (c)	<2,4x10 <sup>-3</sup> (d)	<0,0063 (e)	0,0057±0,0050	<0,0084 (f)
<b>Dezembro</b>	<0,40 (a)	<0,055 (b)	<0,47 (c)	<2,8x10 <sup>-3</sup> (d)	0,026±0,015	0,0090±0,0057	<0,0060 (f)

Atividade mínima detetável em <sup>3</sup>H (a), <sup>7</sup>Be (b), <sup>90</sup>Sr (c), <sup>137</sup>Cs (d), beta total na fase solúvel (e) e beta total na fase particulada (f); volume de amostra insuficiente para análise (g).

<sup>2</sup> Volume de amostra <30 L (1,0 L)

<sup>3</sup> Volume de amostra <30 L (6,8 L)

<sup>4</sup> Volume de amostra <30 L (2,9 L)

<sup>5</sup> Volume de amostra <30 L (1,7 L)



Tabela I.4 - Fluxos mensais de deposição atmosférica ( $Bq\ m^{-2}\pm U$ ,  $k=2$ ) em Sacavém (CTN).

Data de colheita	Precipitação* (mm)	$^3H$	Fase solúvel $\varnothing \leq 0,45\ \mu m$					Fase particulada $\varnothing > 0,45\ \mu m$
			$^7Be$	$^{90}Sr$	$^{137}Cs$	Beta total	Alfa total	Beta total
<b>Janeiro</b>	44,1	(a)	7,1±1,6	(d)	(a)	0,838±0,093	0,243±0,088	(a)
<b>Fevereiro</b>	12,7	6,4±2,8	(a)	(d)	(a)	0,638±0,089	(a)	(a)
<b>Março</b>	44,9	(a)	7,6±1,9	(a)	(a)	1,69±0,14	0,61±0,15	(a)
<b>Abril</b>	64,4	(a)	5,2±1,8	(a)	(a)	2,00±0,17	0,61±0,19	(a)
<b>Maió</b>	10,2	(a)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)
<b>Junho</b>	16,5	(a)	(d)	(d)	(d)	1,015±0,079	(a)	(a)
<b>Julho</b>	0,9	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)
<b>Agosto</b>	5,3	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)
<b>Setembro</b>	18,1	(a)	(d)	(d)	(d)	0,842±0,062	0,121±0,049	0,30±0,17
<b>Outubro</b>	46,1	(a)	3,0±1,4	(d)	(a)	0,498±0,074	0,30±0,11	0,62±0,25
<b>Novembro</b>	125,2	(a)	28,7±6,6	(a)	(a)	3,62±0,035	6,02±0,78	0,89±0,48
<b>Dezembro</b>	94,0	(a)	16,2±3,6	(a)	(a)	2,43±0,24	0,29±0,20	1,30±0,55

Atividade medida na água da chuva inferior à atividade mínima detetável (a); volume de amostra insuficiente para análise (d). \* Dados obtidos através da estação meteorológica EMA, instalada no CTN.

Tabela I.5 - Fluxos mensais de deposição atmosférica ( $\text{Bq m}^{-2}\pm U$ ,  $k=2$ ) em Castelo Branco (estação meteorológica).

Data de colheita	Precipitação* (mm)	$^3\text{H}$	Fase solúvel $\text{Ø} \leq 0,45 \mu\text{m}$					Fase particulada $\text{Ø} > 0,45 \mu\text{m}$
			$^7\text{Be}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	Beta total	Alfa total	Beta total
<b>Janeiro</b>	24,6	(a)	(a)	(d)	(a)	0,999 $\pm$ 0,089	0,332 $\pm$ 0,066	(a)
<b>Fevereiro</b>	14,2	(a)	(a)	(d)	(a)	0,277 $\pm$ 0,030	0,082 $\pm$ 0,030	(a)
<b>Março</b>	28,5	(a)	(d)	(d)	(d)	0,675 $\pm$ 0,068	0,510 $\pm$ 0,094	(a)
<b>Abril</b>	91,4	(a)	12,2 $\pm$ 5,3	(a)	(a)	0,98 $\pm$ 0,18	0,70 $\pm$ 0,20	(a)
<b>Mai</b>	11,4	(a)	(a)	(d)	(a)	(d)	(d)	(a)
<b>Junho</b>	11,7	(a)	(d)	(d)	(d)	0,239 $\pm$ 0,037	0,099 $\pm$ 0,032	(a)
<b>Julho</b>	2,2	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)	(d)
<b>Agosto</b>	14,6	(a)	(d)	(d)	(d)	0,261 $\pm$ 0,034	0,088 $\pm$ 0,038	1,30 $\pm$ 0,22
<b>Setembro</b>	14,7	(a)	(a)	(d)	(a)	0,262 $\pm$ 0,031	0,115 $\pm$ 0,034	0,190 $\pm$ 0,081
<b>Outubro</b>	43,1	(a)	3,4 $\pm$ 1,3	(d)	(a)	0,97 $\pm$ 0,12	1,67 $\pm$ 0,22	0,74 $\pm$ 0,24
<b>Novembro</b>	81,9	(a)	17,9 $\pm$ 4,0	(a)	(a)	(a)	0,47 $\pm$ 0,41	(a)
<b>Dezembro</b>	220,1	(a)	(a)	(a)	(a)	5,7 $\pm$ 3,3	2,0 $\pm$ 1,3	(a)

Atividade medida na água da chuva inferior à atividade mínima detetável (a); Volume de amostra insuficiente para análise (d); \* Dados obtidos no “site” do Instituto de Meteorologia (<http://www.meteo.pt>);

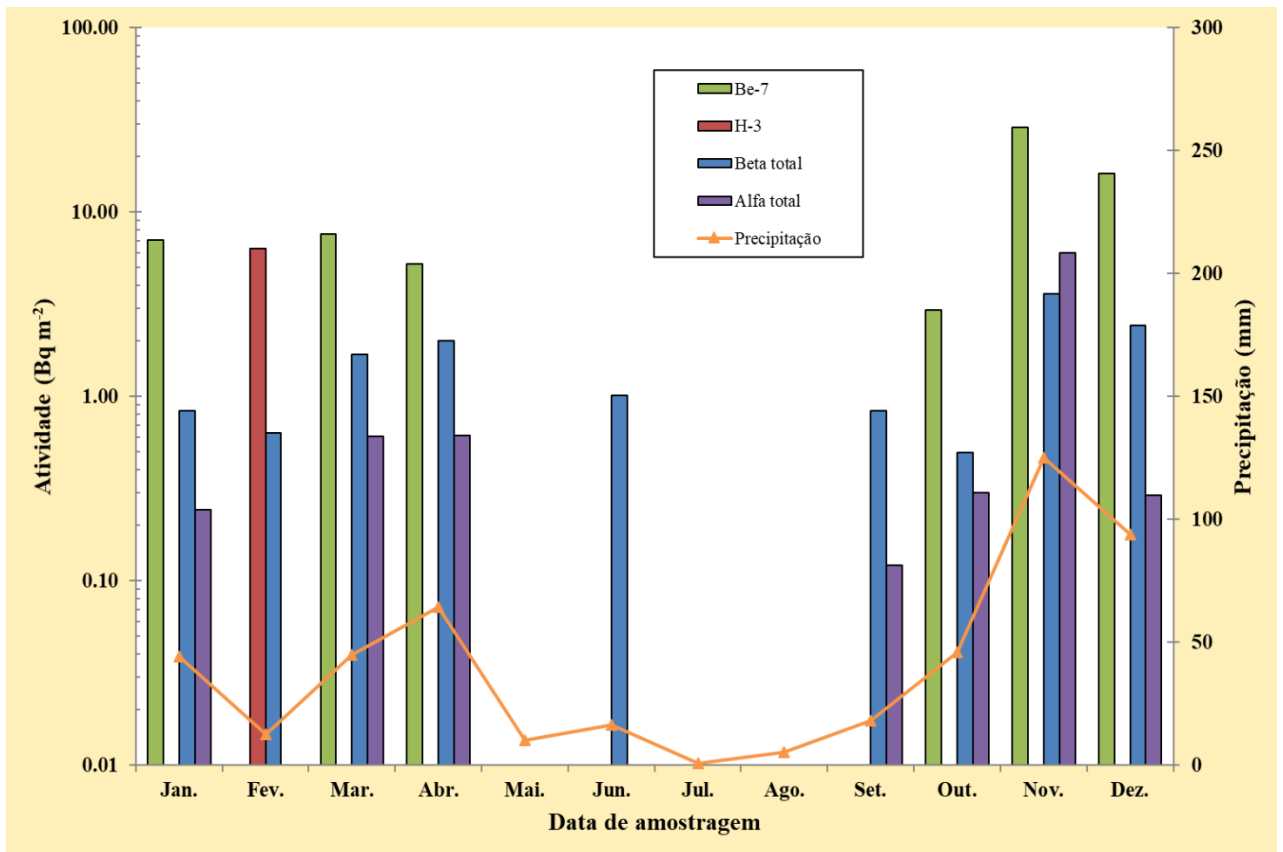


Figura I.7 - Evolução dos fluxos mensais de deposição atmosférica em <sup>7</sup>Be, <sup>3</sup>H, atividade beta total e atividade alfa total e valores de precipitação em Sacavém (CTN).

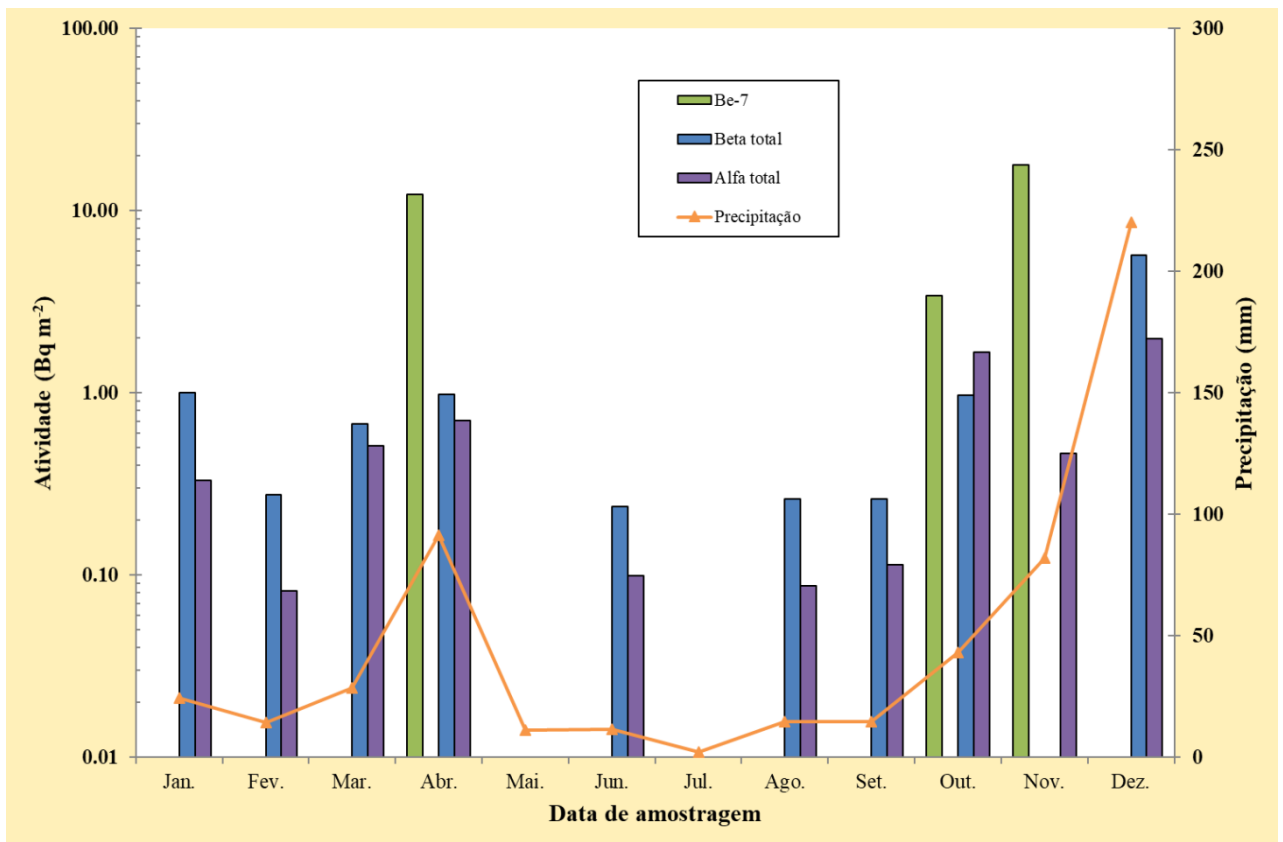


Figura I.8 - Evolução dos fluxos mensais de deposição atmosférica em <sup>7</sup>Be, atividade beta total e atividade alfa total e valores de precipitação em Castelo Branco (estação meteorológica).

## I. 3 RADIOATIVIDADE NO MEIO AQUÁTICO

### I.3.1 Rios

A radioatividade em águas superficiais pode ser devida aos radionuclídeos dissolvidos na fase aquosa e/ou aos radionuclídeos adsorvidos nas partículas em suspensão podendo eventualmente ser incorporada nos sedimentos e nos organismos vivos. A determinação dos teores de radioatividade na vegetação aquática, dada a sua capacidade na fixação de elementos dispersos no ambiente, pode dar informação quantitativa consistente sobre as concentrações de radionuclídeos naturais e artificiais nos ecossistemas. Além dos radionuclídeos de origem natural, tais como  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ , o  $^{222}\text{Rn}$  e descendentes, podem ainda ser detetados o  $^3\text{H}$  (normalmente de origem antropogénica) e os radionuclídeos  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$ . Estes radionuclídeos são produtos de cisão resultantes do funcionamento de centrais nucleares que podem ser libertados para o ambiente em condições normais e/ou após um acidente nuclear.

#### I.3.1.1 Materiais e Métodos

As amostras de água de superfície foram recolhidas em locais de água corrente, afastados da margem dos rios a cerca de 30 cm da superfície. Quando as condições dos rios não o permitiram, foram efetuadas na margem, mas sempre nos mesmos locais. As amostras de água foram recolhidas em bidons de plástico, de acordo com as Normas ISO 5667-5 (1996), e devidamente identificadas.

A amostragem dos sedimentos foi efetuada por arrasto de fundo com o auxílio de um colhedor de sedimentos (cone de Berthois). As amostras foram transportadas para o laboratório em caixas de plástico devidamente identificadas.

Durante o ano de 2019, foram raras as circunstâncias em que se observaram condições de acesso às plantas emergentes da espécie *Cyperus eragrostis* e hidrófitos submersos do género Potamogeton (*P. pectinatus* e/ou *P. crispus*), por duas ordens de razão: por um lado o elevado nível das águas retidas entre as barragens de Cedillo (Espanha) e Fratel (Portugal); por outro lado, a recessão do povoamento de hidrófitos submersos ocorrida em 2018, prolongou-se durante 2019. Como já referido no relatório de vigilância radiológica do 2018 (Madruga *et al.*, 2020a), esta recessão seguiu-se ao aparecimento de sinais de degradação das águas do Tejo em Vila Velha de Ródão (águas escuras, espumas) registados no primeiro trimestre de 2016 e que foram objeto de referência e análise pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA 2017). Por conseguinte, foi escassa a amostragem de plantas durante o ano de 2019, resumindo-se a *P. pectinatus* nos meses de março e abril e *C. eragrostis* em setembro.

As plantas emergentes (*Cyperus eragrostis*) foram colhidas junto à margem, arrancadas pelas raízes, desagregando-se com um ancinho o sedimento em que se inseriam,

para facilitar a extração manual. As plantas foram lavadas nas águas do rio para remoção de sedimentos agregados às raízes e remoção de impurezas agregadas às partes foliares. No trajeto para o laboratório foram acondicionadas em sacos de plástico.

No rio Tejo (Figuras I.1, I.2 e I.9) recolheram-se amostras mensais em V. Velha de Ródão e Valada, e amostras trimestrais nas albufeiras de Fratel e Belver.

No âmbito do Artigo 35 do Tratado EURATOM, a Comissão recomenda que se proceda à medição do caudal do rio durante a colheita da água, principalmente no local de amostragem correspondente à rede dispersa (Vila Velha de Ródão). Para responder a essa recomendação e, como este local de colheita se situa a montante de Fratel, sob a influência do regolho da albufeira de Fratel, considerou-se a utilização dos caudais horários afluentes a esta albufeira como indicativos dos caudais em Vila Velha de Ródão. Através do Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Portuguesa do Ambiente, foi possível a obtenção desses dados que se apresentam na Tabela I.6.

**Tabela I.6 - Valores do caudal afluente à Barragem de Fratel, no rio Tejo, durante a colheita das amostras de água de superfície em Vila Velha de Ródão.**

<b>Data de colheita</b>	<b>Hora da colheita</b>	<b>Caudal afluente <math>m^3 s^{-1}</math></b>
<b>28/01/2019</b>	17h	0,83
<b>21/02/2019</b>	13h	0
<b>27/03/2019</b>	14h	0
<b>15/04/2019</b>	13h	0
<b>28/05/2019</b>	14h	138,52
<b>26/06/2019</b>	14h	224,88
<b>29/07/2019</b>	13h	77,85
<b>27/08/2019</b>	13h	0
<b>30/09/2019</b>	14h	0
<b>29/10/2019</b>	14h	0
<b>27/11/2019</b>	13h	243,68
<b>16/12/2019</b>	13h	0,92



**Figura I.9- Colheita de amostras de água, sedimentos e plantas aquáticas no Rio Tejo.**

No rio Zêzere (Barragem de Castelo de Bode) a amostragem foi mensal. Nos rios Douro (Barca d'Alva), Mondego (Barragem da Aguieira) e Guadiana (Barragem do Alqueva) procedeu-se a uma amostragem anual. Os locais de amostragem estão representados nas Figuras I.1 e I.2.

## Águas

Nas amostras de água de superfície, após filtração, determinou-se a concentração das partículas em suspensão, fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ ) e dos sais dissolvidos, fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ ). Procedeu-se à determinação da atividade beta total (fase particulada) e das atividades alfa total e beta total (fase solúvel) seguindo a metodologia para água não salinas – método por fonte concentrada (NRA\_PT\_01) baseada nas Normas ISO 9696 (2017) e ISO 9697 (2018) respetivamente.

Na fase solúvel, efetuou-se ainda a determinação de concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$  por espectrometria gama.

A determinação da concentração de atividade em  $^{90}\text{Sr}$  e  $^3\text{H}$  realizou-se respetivamente, na fase solúvel e na água não filtrada, por métodos radioquímicos, seguidos de medição beta. As metodologias utilizadas estão descritas em I.2.2.1.

## Sedimentos

No laboratório, os sedimentos foram secos a  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , desagregados e tamisados tendo-se recolhido para análise a fração de sedimento inferior a  $63 \mu\text{m}$  (silte/argila). Amostras representativas foram colocadas em caixa de Petri, devidamente seladas e, posteriormente, (após cerca de 30 dias, tempo necessário para o restabelecimento do equilíbrio secular entre todos os descendentes das famílias radioativas naturais) foi determinada a concentração de atividade dos radionuclidos por espectrometria gama (NRA\_PT\_11).

## Plantas aquáticas

Em laboratório, as plantas foram lavadas abundantemente sob um fluxo de água da torneira, para remoção definitiva de sedimentos e de outros materiais considerados como impurezas. Nestes, incluíram-se pequenos organismos invertebrados que se mantiveram agregados às plantas e cuja remoção no próprio local de colheita nunca é totalmente conseguida. Em *C. eragrostis* fez-se a separação de raízes e partes aéreas para análises em separado. Os sedimentos foram removidos das raízes, após lavagem em água corrente, e no final procedeu-se à lavagem das plantas mergulhando-as em água destilada. O material vegetal foi picado com “*cutter*” ou tesoura e distribuído em lotes para pesagem, registando-se a massa antes e após secagem (72 h) em estufa a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . O material seco foi homogeneizado num triturador e acondicionado em frascos de plástico devidamente selados para posterior (cerca de 30 dias, o tempo necessário para o restabelecimento do equilíbrio secular entre todos os descendentes das famílias radioativas naturais) determinação da concentração de atividade dos radionuclidos por espectrometria gama (NRA\_PT\_11).



### ***1.3.1.2 Resultados e Discussão***

#### Águas

Os valores da concentração de atividade,  $A$ , em águas de superfície colhidas no rio Tejo em Vila Velha de Ródão, Valada do Ribatejo, Barragem de Fratel e Barragem de Belver estão presentes nas Tabelas I.7 a I.10, respetivamente.

Verifica-se que em geral, no rio Tejo, a concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) da matéria dissolvida (fase solúvel) é cerca de 3 ordens de grandeza superior à concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) da matéria em suspensão (fase particulada). A atividade beta total na fase particulada, ao longo do rio, é em geral, inferior ou muito próxima da atividade mínima detetável. Por outro lado, a atividade beta total na fase solúvel apresenta valores mensuráveis mais elevados (cerca de 1 ordem de grandeza) com valores médios de  $187 \pm 20 \text{ mBq L}^{-1}$  e  $133 \pm 29 \text{ mBq L}^{-1}$  em Vila Velha de Ródão (Tabela I.7) e Valada do Ribatejo (Tabela I.8) respetivamente. A atividade alfa total apresenta valores médios mais baixos,  $< 60 \text{ mBq L}^{-1}$  (Tabela I.7) e  $< 39 \text{ mBq L}^{-1}$  (Tabela I.8). Os valores de atividade alfa total e beta total são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em anos anteriores (Rodrigues *et al.*, 2007; Madruga *et al.*, 2008, 2009d, 2010 a 2020a) e dos valores observados em águas de superfície colhidas em rios espanhóis (Heredia *et al.*, 2014 a 2017; Vivas *et al.*, 2019, 2020).

Os valores de concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$  são relativamente constantes não variando ao longo do rio (Tabelas I.7 a I.10). Os valores médios anuais de concentração de atividade em  $^{90}\text{Sr}$  são  $< 1,31 \text{ mBq L}^{-1}$  em V. Velha de Ródão e  $1,51 \pm 0,41 \text{ mBq L}^{-1}$  em Valada do Ribatejo. No que se refere aos valores em  $^{137}\text{Cs}$  situam-se abaixo da atividade mínima detetável, com valores médios inferiores a  $2,6 \text{ mBq L}^{-1}$  em ambos os locais de colheita, V. Velha de Ródão e Valada do Ribatejo. Resultados semelhantes foram observados em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2007a, 2008, 2009a, 2009d, 2010 a 2020a).

Os valores de concentração de atividade média anual,  $A$ , em  $^3\text{H}$  no rio Tejo são  $10,2 \pm 2,1 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $5,5 \pm 1,6 \text{ Bq L}^{-1}$  em V. Velha de Ródão e Valada do Ribatejo respetivamente (Tabelas I.7 e I.8). Na Barragem de Fratel, os valores em  $^3\text{H}$  variam entre  $7,92 \pm 0,77 \text{ Bq L}^{-1}$  (fevereiro) e  $13,7 \pm 1,3 \text{ Bq L}^{-1}$  (maio) (Tabela I.9) e na Barragem de Belver entre  $7,40 \pm 0,73 \text{ Bq L}^{-1}$  (fevereiro) e  $11,4 \pm 1,0 \text{ Bq L}^{-1}$  (maio) (Tabela I.10). No troço do rio Tejo, em Espanha, os valores de concentração de atividade em  $^3\text{H}$ , variaram entre aproximadamente  $5 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $100 \text{ Bq L}^{-1}$  nos anos 2011 a 2018 (Heredia *et al.*, 2014 a 2017; Vivas *et al.*, 2019, 2020).

Na Figura I.10 estão representados os valores mensais das concentrações de atividade em  $^3\text{H}$  no rio Tejo, em V. Velha de Ródão e Valada do Ribatejo, durante os anos 2010 a 2019. Pode observar-se que, a atividade em  $^3\text{H}$  tem vindo a variar ao longo dos meses e dos anos, em ambas as estações, sendo a variação mais acentuada em V. Velha de Ródão. Em 2015, a



variação ao longo do ano foi bastante acentuada, em ambas as estações, tendo-se atingido o valor mais elevado nos meses de setembro/outubro. Em 2019, a tendência observada foi semelhante à de 2018 com valores mais elevados nos meses de março/maio em V. Velha de Ródão e nos meses de junho/julho em Valada do Ribatejo. A variação observada ao longo dos anos pode, contudo, estar relacionada com o normal funcionamento da Central Nuclear de Almaraz, localizada em Espanha, cujos efluentes são descarregados no rio Tejo e, com o sistema de descargas das barragens hídricas ao longo do rio Tejo (Madruça *et al*, 2020b). A análise do gráfico indica, em geral, valores de atividade em  $^3\text{H}$  mais baixos em Valada do Ribatejo, o que é expectável, devido à diluição ao longo do rio.

Na Figura I.11, que representa a variação da concentração de atividade em  $^3\text{H}$  com o valor do caudal do rio em V. Velha de Ródão durante os anos 2014 a 2019, parece observar-se uma relação entre o valor do caudal do rio no momento de colheita da amostra de água e a respetiva concentração em  $^3\text{H}$ . Por exemplo, em situações de caudal mais elevado a atividade em  $^3\text{H}$  diminuiu e, vice-versa, em situações de menor caudal a atividade em  $^3\text{H}$  aumentou. Esta última situação é bastante notória no ano de 2019.

Na Tabela I.11 estão expressos os valores da concentração de atividade,  $A$ , em águas de superfície colhidas no rio Zêzere (barragem de Castelo de Bode). Pode observar-se que no rio Zêzere (Tabela I.11) o valor médio anual da atividade beta total na fase particulada ( $<11,2 \text{ mBq L}^{-1}$ ) é idêntico ao obtido para o rio Tejo enquanto que o obtido na fase solúvel ( $35,0 \pm 7,2 \text{ mBq L}^{-1}$ ) é cerca de 5 vezes inferior (Tabelas I.7 e I.8). Este resultado pode estar relacionado com a concentração da matéria dissolvida que é também inferior (cerca de 6 a 8 vezes) no rio Zêzere.

Os valores obtidos para o  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$  no rio Zêzere (Tabela I.11) são da mesma ordem de grandeza dos observados no rio Tejo. Pela uniformidade dos valores obtidos para os dois rios poder-se-á inferir que a existência destes radionuclídeos está relacionada com a deposição atmosférica e não com o normal funcionamento das centrais nucleares espanholas existentes no rio Tejo (troço espanhol) uma vez que o rio Zêzere não está sujeito à influência dessas centrais.

Os valores obtidos para a concentração de atividade em  $^3\text{H}$  no rio Zêzere (Tabela I.11) são inferiores ao valor de atividade mínima detetável (variando entre  $<0,24$  e  $0,39 \pm 0,24 \text{ Bq L}^{-1}$ ) sendo uma ordem de grandeza inferior aos observados para o rio Tejo. No rio Zêzere, contrariamente ao observado para o rio Tejo, os valores de concentração de atividade em  $^3\text{H}$  têm-se mantido baixos (normalmente abaixo do valor de atividade mínima detetável) e constantes ao longo dos anos (Figura I.10) indicando que este rio não foi influenciado por nenhuma fonte de origem antropogénica.

Na Tabela I.12 estão expressos os valores de concentração de atividade em águas de superfície colhidas no rio Guadiana (barragem de Alqueva), no rio Mondego (barragem da Aguieira) e no rio Douro (barragem do Pocinho). Verifica-se que os valores obtidos para as atividades alfa total e beta total,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$  são da mesma ordem de grandeza dos observados para o rio Tejo. Os valores da concentração de atividade em  $^3\text{H}$  são inferiores aos medidos no rio Tejo e da mesma ordem de grandeza dos observados no rio Zêzere, o que denota a influência no rio Tejo da Central Nuclear de Almaraz (Espanha).

### Sedimentos

Nas Tabelas I.13 a I.15 estão expressos os valores da concentração de atividade,  $A$ , ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), dos radionuclídeos detetados em sedimentos colhidos no rio Tejo, em V. Velha de Ródão, Valada do Ribatejo e na barragem de Belver.

Em V. Velha de Ródão, os valores da concentração de atividade para os radionuclídeos  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  na fração silte/argila variam entre  $128\pm 14 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $434\pm 36 \text{ Bq kg}^{-1}$  e entre  $111\pm 11 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $285\pm 21 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respetivamente. A concentração de atividade em  $^{40}\text{K}$  varia entre  $451\pm 60 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $681\pm 67 \text{ Bq kg}^{-1}$ . O valor médio da concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$  é inferior a  $4,1 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

Os valores das concentrações de atividade em  $^{235}\text{U}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{40}\text{K}$  medidos, na mesma fração granulométrica (diâmetro da partícula  $<63 \mu\text{m}$ ), em sedimentos colhidos em Valada do Ribatejo (Tabela I.14) e na Barragem de Belver (Tabela I.15) são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em V. Velha de Ródão. Valores inferiores (cerca de uma ordem de grandeza) foram obtidos para os radionuclídeos  $^{235}\text{U}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  em sedimentos mais grosseiros (diâmetro da partícula  $<250 \mu\text{m}$ ) colhidos na Barragem de Belver (Tabela I.15). Considerou-se a fração de sedimento  $<250 \mu\text{m}$  porque, após a peneiração, não foi possível obter, da fração  $<63 \mu\text{m}$ , quantidade de amostra suficiente para análise.

Constata-se que, em termos de valores médios, a razão entre as concentrações de atividade  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  é superior à unidade para todos os sedimentos do rio Tejo. Sendo o  $^{228}\text{Ra}$  e o  $^{226}\text{Ra}$  descendentes das séries radioativas do  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  respetivamente, os valores mais elevados obtidos para o  $^{228}\text{Ra}$ , podem estar relacionados com o menor grau de solubilidade e consequentemente menor mobilidade geoquímica do  $^{232}\text{Th}$  relativamente ao  $^{238}\text{U}$ .

Os valores da concentração de atividade dos radionuclídeos (naturais e artificiais) detetados em sedimentos colhidos nos rios Guadiana, Mondego e Douro (Tabela I.16) são da mesma ordem de grandeza dos obtidos para o rio Tejo para as mesmas granulometrias.

Em geral, os valores obtidos para os radionuclídeos analisados em sedimentos dos rios Tejo, Guadiana, Mondego e Douro são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2008, 2009a, 2009d, 2010 a 2020a).

**Tabela I.7 - Valores da concentração de atividade ( $A \pm U$ ,  $k=2$ ) em  $^3\text{H}$ , beta total (fase particulada) e em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , alfa total e beta total na fase solúvel, em água de superfície colhida no rio Tejo (V. Velha de Ródão).**

Data de colheita	$^3\text{H}$ Bq L <sup>-1</sup>	Fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ )		Fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ )				
		Concentração mg L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>	Concentração mg L <sup>-1</sup>	$^{137}\text{Cs}$ mBq L <sup>-1</sup>	$^{90}\text{Sr}$ mBq L <sup>-1</sup>	Alfa Total mBq L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>
<b>Janeiro</b>	6,45±0,64	1,6±0,8	<10,1 (b)	316,7±0,8	<2,8 (c)	1,54±0,50	74±24	174±20
<b>Fevereiro</b>	9,71±0,91	1,0±0,8	<11,1 (b)	337,9±0,8	<2,5 (c)	1,28±0,34	<35 (e)	162±20
<b>Março</b>	13,7±1,2	1,0±0,8	<10,1 (b)	382,0±0,8	<2,5 (c)	1,45±0,39	39±25	188±23
<b>Abril</b>	12,8±1,1	(a)	<10,5 (b)	475,3±0,8	<2,6 (c)	0,70±0,28	60±33	190±26
<b>Mai</b>	12,8±1,1	2,1±0,8	<27,8 (b)	448,6±0,8	<2,5 (c)	<0,57 (d)	50±31	181±25
<b>Junho</b>	9,56±0,90	14,7±0,8	<10,2 (b)	426,6±0,8	<2,5 (c)	1,78±0,62	58±32	174±23
<b>Julho</b>	8,65±0,82	1,1±0,8	<31,1 (b)	453,4±0,8	<2,5 (c)	1,83±0,49	45±32	171±25
<b>Agosto</b>	8,80±0,83	0,9±0,8	9,9±5,1	451,6±0,8	<2,8 (c)	1,93±0,54	<71 (e)	196±26
<b>Setembro</b>	10,4±0,95	2,3±0,8	<8,4 (b)	483,8±0,8	<2,7 (c)	0,95±0,33	73±34	171±25
<b>Outubro</b>	9,81±0,92	(a)	<8,3 (b)	441,8±0,8	<2,6 (c)	1,83±0,53	41±34	193±30
<b>Novembro</b>	10,6±0,97	2,1±0,8	<8,4 (b)	574,4±0,8	<2,7 (c)	1,00±0,33	71±38	209±33
<b>Dezembro</b>	8,87±0,84	1,3±0,8	<9,0 (b)	390,8±0,8	<2,7 (c)	0,84±0,22	104±39	233±34
<b>Média ± <math>\sigma</math></b>	<b>10,2±2,1 (n=12)</b>	<b>2,8±4,2 (n=10)</b>	<b>&lt;12,9 (n=12)</b>	<b>432±69 (n=12)</b>	<b>&lt;2,6 (n=12)</b>	<b>&lt;1,31 (n=12)</b>	<b>&lt;60 (n=12)</b>	<b>187±20 (n=12)</b>

Não se reporta o valor porque a incerteza associada é superior a 100% (a). Atividade mínima detetável em beta total na fase particulada (b),  $^{137}\text{Cs}$  (c),  $^{90}\text{Sr}$  (d) e alfa total na fase solúvel (e).

**Tabela I.8 - Valores da concentração de atividade ( $A \pm U$ ,  $k=2$ ) em  $^3\text{H}$ , beta total (fase particulada) e em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , alfa total e beta total na fase solúvel, em água de superfície colhida no rio Tejo (Valada do Ribatejo).**

Data de colheita	$^3\text{H}$ Bq L <sup>-1</sup>	Fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ )		Fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ )				
		Concentração mg L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>	Concentração mg L <sup>-1</sup>	$^{137}\text{Cs}$ mBq L <sup>-1</sup>	$^{90}\text{Sr}$ mBq L <sup>-1</sup>	Alfa Total mBq L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>
<b>Janeiro</b>	4,99±0,54	1,7±0,8	<10,1 (b)	293,5±0,8	<2,6 (c)	2,17±0,50	53±20	138±17
<b>Fevereiro</b>	4,24±0,50	6,4±0,8	<11,2 (b)	265,2±0,8	<2,5 (c)	1,47±0,40	38±20	130±17
<b>Março</b>	4,23±0,49	1,7±0,8	<10,1 (b)	259,7±0,8	<2,7 (c)	1,60±0,42	29±18	110±15
<b>Abril</b>	5,13±0,56	1,2±0,8	<10,6 (b)	291,0±0,8	<2,2 (c)	2,26±0,55	<26 (d)	137±18
<b>Maiο</b>	5,80±0,61	2,6±0,8	<27,8 (b)	350,8±0,8	<2,8 (c)	0,95±0,34	<32 (d)	135±19
<b>Junho</b>	8,58±0,84	(a)	<10,1 (b)	228,2±0,8	<2,6 (c)	1,46±0,42	<23 (d)	79±12
<b>Julho</b>	8,22±0,79	1,4±0,8	<31,1 (b)	398,4±0,8	<2,6 (c)	1,20±0,31	64±32	164±23
<b>Agosto</b>	4,26±0,50	(a)	<8,1 (b)	315,5±0,8	<2,6 (c)	1,20±0,36	<52 (d)	116±18
<b>Setembro</b>	6,85±0,69	2,0±0,8	<8,4 (b)	373,1±0,8	<2,7 (c)	1,28±0,40	44±24	141±20
<b>Outubro</b>	3,88±0,49	1,4±0,8	<8,4 (b)	243,7±0,8	<2,7 (c)	1,18±0,30	26±16	105±14
<b>Novembro</b>	6,42±0,66	3,7±0,8	<8,4 (b)	407,4±0,8	<2,7 (c)	1,89±0,47	46±26	187±25
<b>Dezembro</b>	3,98±0,48	(a)	<9,0 (b)	285,2±0,8	<2,8 (c)	1,49±0,42	35±21	155±24
<b>Média ± σ</b>	<b>5,5±1,6</b> (n=12)	<b>2,5±1,7</b> (n=9)	<b>&lt;12,8</b> (n=12)	<b>309±60</b> (n=12)	<b>&lt;2,6</b> (n=12)	<b>1,51±0,41</b> (n=12)	<b>&lt;39</b> (n=12)	<b>133±29</b> (n=12)

Não se reporta o valor porque a incerteza associada é superior a 100% (a). Atividade mínima detetável em beta total na fase particulada (b),  $^{137}\text{Cs}$  (c) e alfa total na fase solúvel (d).

**Tabela I.9 - Valores da concentração de atividade ( $A \pm U$ ,  $k=2$ ) em  $^3\text{H}$ , beta total (fase particulada) e em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , alfa total e beta total na fase solúvel, em água de superfície colhida no rio Tejo (Barragem de Fratel).**

Data de colheita	$^3\text{H}$ Bq L <sup>-1</sup>	Fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ )		Fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ )				
		Concentração mg L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>	Concentração mg L <sup>-1</sup>	$^{137}\text{Cs}$ mBq L <sup>-1</sup>	$^{90}\text{Sr}$ mBq L <sup>-1</sup>	Alfa Total mBq L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>
<b>Fevereiro</b>	7,92±0,77	1,4±0,8	<11 (b)	311,6±0,8	<2,7 (c)	1,38±0,37	33±23	160±19
<b>Mai</b>	13,7±1,3	1,7±0,8	<27,7 (b)	471,3±0,8	<2,6 (c)	2,28±0,66	63±34	193±26
<b>Agosto</b>	8,45±0,81	(a)	11,3±5,1	463,4±0,8	<2,7 (c)	1,40±0,38	<53 (d)	197±27
<b>Novembro</b>	9,31±0,87	3,4±0,8	<8,4 (b)	467,1±0,8	<2,7 (c)	1,38±0,48	46±29	202±28

Não se reporta o valor porque a incerteza associada é superior a 100% (a). Atividade mínima detetável em beta total na fase particulada (b),  $^{137}\text{Cs}$  (c) e alfa total na fase solúvel (d).

**Tabela I.10 - Valores da concentração de atividade ( $A \pm U$ ,  $k=2$ ) em  $^3\text{H}$ , beta total (fase particulada) e em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , alfa total e beta total na fase solúvel, em água de superfície colhida no rio Tejo (Barragem de Belver).**

Data de colheita	$^3\text{H}$ Bq L <sup>-1</sup>	Fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ )		Fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ )				
		Concentração mg L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>	Concentração mg L <sup>-1</sup>	$^{137}\text{Cs}$ mBq L <sup>-1</sup>	$^{90}\text{Sr}$ mBq L <sup>-1</sup>	Alfa Total mBq L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>
<b>Fevereiro</b>	7,40±0,73	1,2±0,8	<11,1 (b)	301,2±0,8	<2,4 (c)	1,30±0,34	34±22	163±19
<b>Mai</b>	11,4±1,0	1,7±0,8	<27,7 (b)	412,8±0,8	<2,4 (c)	9,7±2,2	<38 (d)	181±23
<b>Agosto</b>	9,22±0,86	(a)	<8,1 (b)	454,9±0,8	<2,6 (c)	1,94±0,51	<74 (d)	159±26
<b>Novembro</b>	8,92±0,84	2,6±0,8	<8,4 (b)	440,3±0,8	<2,5 (c)	1,76±0,50	51±28	177±26

Não se reporta o valor porque a incerteza associada é superior a 100% (a). Atividade mínima detetável em beta total na fase particulada (b),  $^{137}\text{Cs}$  (c) e alfa total na fase solúvel (d).

**Tabela I.11 - Valores da concentração de atividade ( $A \pm U$ ,  $k=2$ ) em  $^3\text{H}$ , beta total (fase particulada) e em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , alfa total e beta total na fase solúvel, em água de superfície colhida no rio Zêzere (Barragem de Castelo de Bode).**

Data de colheita	$^3\text{H}$ Bq L <sup>-1</sup>	Fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ )		Fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ )				
		Concentração mg L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>	Concentração mg L <sup>-1</sup>	$^{137}\text{Cs}$ mBq L <sup>-1</sup>	$^{90}\text{Sr}$ mBq L <sup>-1</sup>	Alfa Total mBq L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>
<b>Janeiro</b>	<0,39 (a)	1,5±0,8	<10,1 (c)	30,9±0,8	<2,8 (d)	1,72±0,41	<6,1 (e)	17,9±3,0
<b>Fevereiro</b>	<0,41 (a)	(b)	<9,3 (c)	56,0±0,8	<2,7 (d)	3,21±0,82	<6,1 (e)	33,6±4,4
<b>Março</b>	0,39±0,24	(b)	<8,8 (c)	54,9±0,8	<2,6 (d)	1,70±0,36	<5,7 (e)	39,5±4,4
<b>Abril</b>	<0,36 (a)	(b)	<9,6 (c)	54,6±0,8	<2,5 (d)	2,02±0,54	<5,7 (e)	34,5±4,2
<b>Maiο</b>	<0,24 (a)	1,6±0,8	<23,1 (c)	55,1±0,8	<2,8 (d)	2,65±0,61	<5,6 (e)	40,8±4,2
<b>Junho</b>	<0,24 (a)	(b)	<8,4 (c)	58,2±0,8	<2,6 (d)	1,91±0,65	6,2±3,9	37,6±4,0
<b>Julho</b>	<0,41 (a)	1,9±0,8	<25,9 (c)	55,0±0,8	<2,5 (d)	2,28±0,55	6,3±4,2	39,5±4,1
<b>Agosto</b>	<0,43 (a)	(b)	<6,8 (c)	42,7±0,8	<3,2 (d)	1,04±0,34	<8,3 (e)	24,9±3,4
<b>Setembro</b>	<0,43 (a)	(b)	<7,0 (c)	54,8±0,8	<2,7 (d)	2,34±0,64	<4,5 (e)	36,3±3,9
<b>Outubro</b>	<0,42 (a)	(b)	<8,4 (c)	58,0±0,8	<2,6 (d)	1,85±0,45	<5,3 (e)	36,9±4,0
<b>Novembro</b>	<0,41 (a)	(b)	<8,4 (c)	53,6±0,8	<2,1 (d)	1,97±0,50	6,4±3,7	33,9±4,1
<b>Dezembro</b>	<0,41 (a)	(b)	<9,0 (c)	49,4±0,8	<2,7 (d)	2,70±0,73	29,4±6,8	44,3±4,2
<b>Média ± σ</b>	<b>&lt;0,38</b> (n=12)	<b>1,7±0,2</b> (n=3)	<b>&lt;11,2</b> (n=12)	<b>51,9±7,8</b> (n=12)	<b>&lt;2,7</b> (n=12)	<b>2,12±0,57</b> (n=12)	<b>&lt;8,0</b> (n=12)	<b>35,0±7,2</b> (n=12)

Não se reporta o valor porque a incerteza associada é superior a 100% (b). Atividade mínima detetável em  $^3\text{H}$  (a), beta total na fase particulada (c),  $^{137}\text{Cs}$  (d) e alfa total na fase solúvel (e).

**Tabela I.12 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), em  $^3\text{H}$  e beta total (fase particulada) e em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , alfa total e beta total na fase solúvel, em água de superfície colhidas no rio Guadiana (Barragem de Alqueva), no rio Mondego (Barragem da Aguieira) e no rio Douro (Barragem do Pocinho).**

Local de colheita	$^3\text{H}$ Bq L <sup>-1</sup>	Fase particulada ( $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$ )		Fase solúvel ( $\varnothing \leq 0,45 \mu\text{m}$ )				
		Concentração mg L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>	Concentração mg L <sup>-1</sup>	$^{137}\text{Cs}$ mBq L <sup>-1</sup>	$^{90}\text{Sr}$ mBq L <sup>-1</sup>	Alfa Total mBq L <sup>-1</sup>	Beta Total mBq L <sup>-1</sup>
<b>Rio Guadiana</b> (Barragem de Alqueva)	<0,41 (a)	4,7±0,8	<9,6 (c)	376,4±0,8	<5,6 (d)	4,33±0,99	161±42	274±27
<b>Rio Mondego</b> (Barragem da Aguieira)	0,32±0,15	(b)	<10,1 (c)	46,8±0,8	<2,5 (d)	2,66±0,67	<10 (e)	43,6±7,7
<b>Rio Douro</b> (Barragem do Pocinho)	0,51±0,26	1,2±0,8	<10,1 (c)	269,0±0,8	<2,4 (d)	5,1±1,2	56±23	109±14

Não se reporta o valor porque a incerteza associada é superior a 100% (b). Atividade mínima detetável em  $^3\text{H}$  (a), beta total na fase particulada (c),  $^{137}\text{Cs}$  (d) e alfa total na fase solúvel (e).

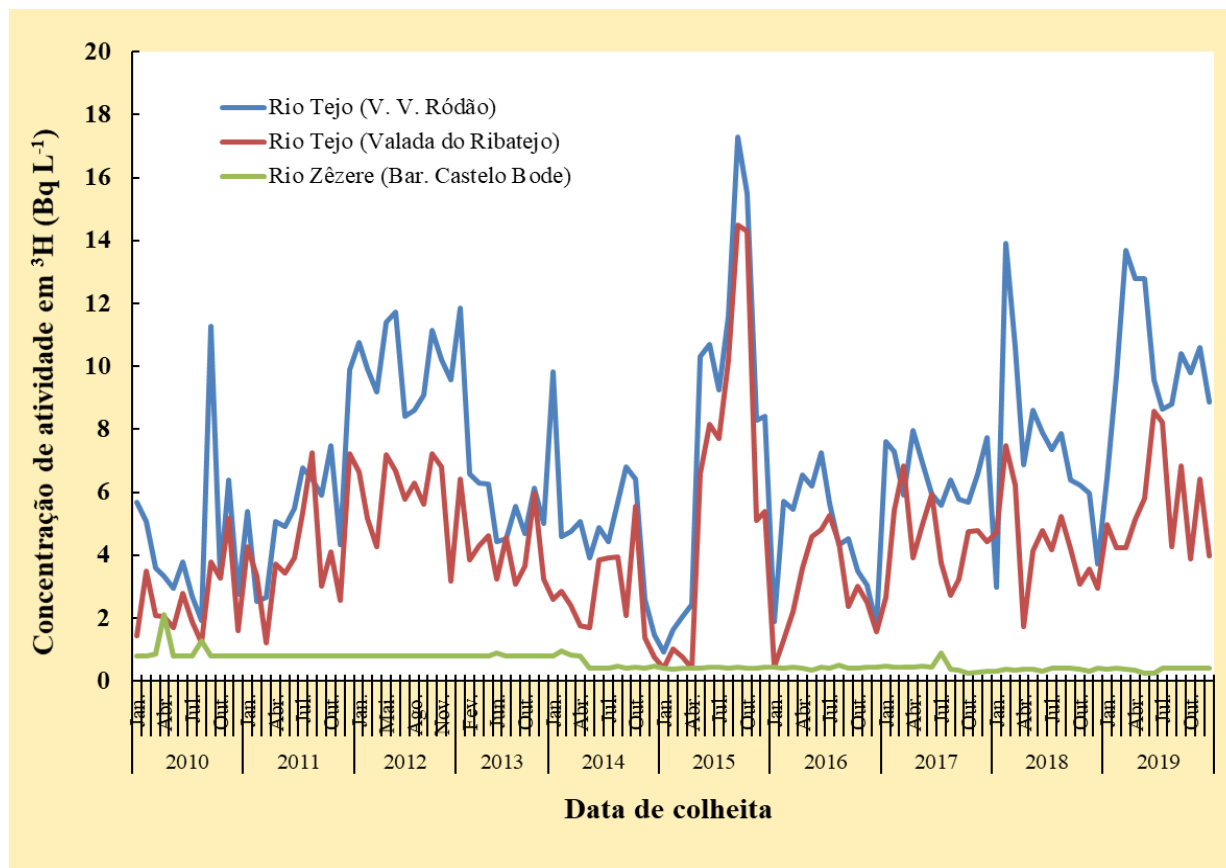


Figura I.10 - Evolução da concentração de atividade em  $^3\text{H}$  ( $\text{Bq L}^{-1}$ ) no Rio Tejo (Vila Velha de Ródão e Valada do Ribatejo) e no rio Zêzere (Barragem de Castelo de Bode), durante os anos 2010 a 2019.

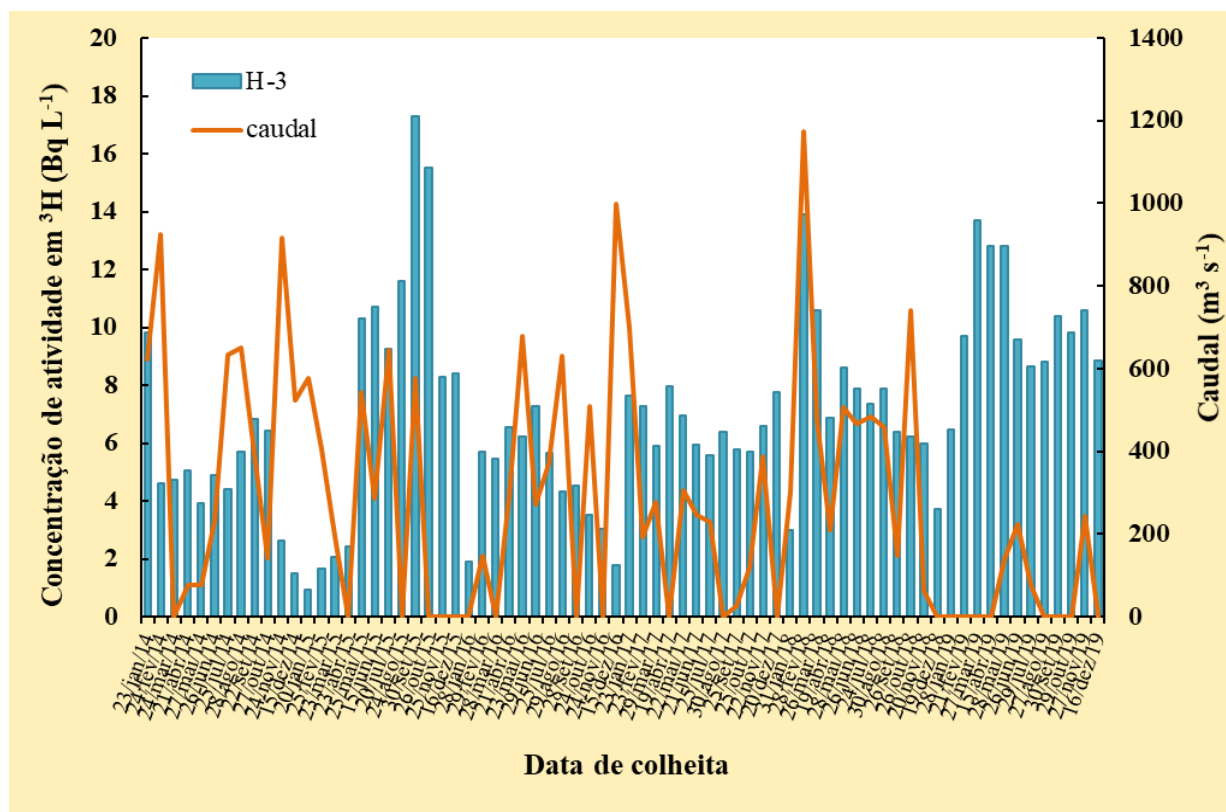


Figura I.11 - Evolução da concentração de atividade em  $^3\text{H}$  ( $\text{Bq L}^{-1}$ ) em função do valor do caudal em Vila Velha de Ródão (Rio Tejo) durante os anos 2014 a 2019.



**Tabela I.13 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq\ kg^{-1}$ ), de radionuclídeos naturais e artificiais emissores gama medidos na fração silte/argila (dimensão da partícula  $<63\ \mu m$ ) de sedimentos colhidos no rio Tejo, em Vila Velha de Ródão.**

Data de colheita	$^{235}U$	$^{228}Ra$	$^{226}Ra$	$^{137}Cs$	$^{40}K$
<b>Janeiro</b>	27±13	218±20	181±15	5,9±1,5	516±62
<b>Fevereiro</b>	<20 (a)	128±14	111±11	5,1±1,6	451±60
<b>Março</b>	<16 (a)	286±24	196±15	4,6±1,2	577±56
<b>Abril</b>	<17 (a)	192±18	188±16	<3,6 (a)	652±66
<b>Maió</b>	<22 (a)	167±16	145±13	<2,8 (a)	681±67
<b>Junho</b>	<17 (a)	339±29	239±19	5,2±1,5	577±61
<b>Julho</b>	<17 (a)	225±21	181±15	4,6±2,3	607±63
<b>Agosto</b>	<20 (a)	274±25	190±15	<4,2 (a)	589±64
<b>Setembro</b>	<14 (a)	173±16	150±12	3,2±1,6	533±56
<b>Outubro</b>	<18 (a)	133±14	111±13	<3,1 (a)	480±56
<b>Novembro</b>	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)
<b>Dezembro</b>	<26 (a)	434±36	285±21	<3,2 (a)	575±59
<b>Média ± <math>\sigma</math> (n=11)</b>	<b>&lt;19</b>	<b>234±93</b>	<b>180±52</b>	<b>&lt;4,1</b>	<b>567±69</b>

**Tabela I.14. - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ) ( $Bq\ kg^{-1}$ ), de radionuclídeos naturais e artificiais emissores gama medidos na fração silte/argila (dimensão da partícula  $<63\ \mu m$ ) de sedimentos colhidos no rio Tejo em Valada do Ribatejo.**

Data de colheita	$^{235}U$	$^{228}Ra$	$^{226}Ra$	$^{137}Cs$	$^{40}K$
<b>Janeiro</b>	20±12	166±16	117±11	<3,1 (a)	677±67
<b>Fevereiro</b>	<18 (a)	287±25	190±15	<2,5 (a)	710±68
<b>Março</b>	<22 (a)	206±19	157±13	<3,1 (a)	733±71
<b>Abril</b>	<12 (a)	155±15	109±10	<2,7 (a)	672±63
<b>Maió</b>	<23 (a)	375±32	263±20	4,2±1,4	525±59
<b>Junho</b>	<20 (a)	167±16	146±13	<4,8 (a)	774±72
<b>Julho</b>	<17 (a)	265±23	181±15	<3,4 (a)	696±66
<b>Agosto</b>	<20 (a)	269±24	178±15	<2,9 (a)	683±68
<b>Setembro</b>	<13 (a)	104±11	87,6±8,7	<3,6 (a)	668±63
<b>Outubro</b>	<16 (a)	140±14	112±11	<2,4 (a)	668±64
<b>Novembro</b>	<17 (a)	160±16	117±11	<2,4 (a)	737±69
<b>Dezembro</b>	<20 (a)	180±17	153±13	<2,6 (a)	714±68
<b>Média ± <math>\sigma</math> (n=12)</b>	<b>&lt;18</b>	<b>206±77</b>	<b>151±48</b>	<b>&lt;3,1</b>	<b>688±61</b>

Atividade mínima detetável (a). Não foi possível proceder à amostragem de sedimentos devido ao elevado nível das águas do rio (b).

**Tabela I.15 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq\ kg^{-1}$ ), de radionuclídeos naturais e artificiais emissores gama medidos na fração areia (dimensão da partícula  $<250\ \mu m$ ) e silte/argila (dimensão da partícula  $<63\ \mu m$ ) de sedimentos colhidos no rio Tejo, na barragem de Belver.**

Data de colheita	Dimensão partícula	$^{235}U$	$^{228}Ra$	$^{226}Ra$	$^{137}Cs$	$^{40}K$
<b>Fevereiro</b>	$<250\ \mu m$	$<3,9$ (a)	$50,4 \pm 6,9$	$44,1 \pm 5,8$	$2,11 \pm 0,60$	$890 \pm 109$
<b>Mai</b>	$<250\ \mu m$	$<3,6$ (a)	$52,0 \pm 4,6$	$38,0 \pm 3,2$	$3,1 \pm 0,4$	$830 \pm 57$
<b>Agosto</b>	$<250\ \mu m$	$<4,1$ (a)	$38,7 \pm 3,5$	$33,6 \pm 2,7$	$2,25 \pm 0,30$	$860 \pm 58$
<b>Novembro</b>	$<63\ \mu m$	$<17$ (a)	$455 \pm 37$	$288 \pm 21$	$<2,8$ (a)	$624 \pm 59$

**Tabela I.16 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq\ kg^{-1}$ ), de radionuclídeos naturais e artificiais emissores gama medidos nas frações areia (dimensão da partícula  $<250\ \mu m$ ) e silte/argila (dimensão da partícula  $<63\ \mu m$ ) de sedimentos colhidos nos rios Guadiana, Mondego e Douro.**

Data de colheita	Local de amostragem	Dimensão partícula	$^{235}U$	$^{228}Ra$	$^{226}Ra$	$^{137}Cs$	$^{40}K$
<b>Abril</b>	<b>Rio Guadiana</b> (Barragem Alqueva)	$<250\ \mu m$	$<3,8$ (a)	$79,4 \pm 6,7$	$39,9 \pm 3,1$	$<0,55$ (a)	$434 \pm 30$
<b>Junho</b>	<b>Rio Mondego</b> (Barragem Aguiçeira)	$<63\ \mu m$	$<21$ (a)	$109 \pm 13$	$92 \pm 10$	$<3,0$ (a)	$541 \pm 62$
<b>Junho</b>	<b>Rio Douro</b> (Barragem do Pocinho)	$<63\ \mu m$	$<20$ (a)	$69 \pm 10$	$75 \pm 14$	$<3,2$ (a)	$440 \pm 60$

Atividade mínima detetável (a);

Plantas aquáticas

Na Tabela I.17 estão expressos os valores da concentração de atividade,  $A$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ , peso seco), de radionuclidos naturais e artificiais determinados nas plantas aquáticas *Cyperus eragrostis* e *Potamogeton pectinatus* colhidas no rio Tejo, em V. Velha de Ródão. Foram detetados radionuclidos naturais das series radioativas do Urânio ( $^{226}\text{Ra}$ ) e Tório ( $^{228}\text{Ra}$ ), o  $^{40}\text{K}$  e o radionuclido de origem artificial,  $^{137}\text{Cs}$ . Na *Cyperus eragrostis* destaca-se o decréscimo da concentração de atividade do rizoma para as partes aéreas para todos os radionuclidos, exceto para o  $^{40}\text{K}$ . Por exemplo, no caso do  $^{226}\text{Ra}$  os valores foram de  $64\pm 19 \text{ Bq kg}^{-1}$  para o rizoma e  $22,7\pm 6,5 \text{ Bq kg}^{-1}$  para as partes aéreas. A concentração mais elevada de  $^{40}\text{K}$  nas partes aéreas de *C. eragrostis* (Tabela I.17) é consistente com a translocação do potássio para as partes verdes das plantas onde pode atingir concentrações citoplasmáticas de 50 a 250 mM (Rodríguez-Navarro, 2000). Este elemento desempenha funções fisiologicamente relevantes (Marschner, 1995; Taiz e Zeiger, 1998), sendo o principal soluto inorgânico osmorregulador controlando a turgência e volume celulares e com isso a proliferação celular e o crescimento da planta. Os resultados em  $^{137}\text{Cs}$  são inferiores à atividade mínima detetável. Relativamente à *Potamogeton pectinatus* observa-se um decréscimo nas concentrações de  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{226}\text{Ra}$  do mês de março para abril e um aumento na concentração de atividade em  $^{40}\text{K}$ . Um valor mensurável ( $1,45\pm 0,31 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) foi obtido para o  $^{137}\text{Cs}$  em março. Em geral, os valores obtidos para os radionuclidos analisados para as duas espécies de plantas são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2016 a 2020a).

**Tabela I.17 - Valores da concentração de atividade,  $A\pm U$  ( $k=2$ ) ( $\text{Bq kg}^{-1}$ , peso seco), de radionuclidos emissores gama em plantas emergentes (*Cyperus eragrostis*, junção) e hidrófitos submersos (*Potamogeton pectinatus*, limo-mestre) presentes no rio Tejo em Vila Velha de Ródão.**

Plantas aquáticas	Data de colheita	$^{235}\text{U}$	$^{228}\text{Ra}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$
<i>Cyperus eragrostis</i>	Setembro	<b>Rizomas</b>				
		<26 (a)	<23 (a)	$64\pm 19$	<3,4 (a)	$326\pm 100$
		<b>Partes Aéreas</b>				
		<14 (a)	<12 (a)	$22,7\pm 6,5$	<2,2 (a)	$613\pm 74$
<i>Potamogeton pectinatus</i>	Março	$5,9\pm 2,6$	$49,8\pm 5,6$	$43,8\pm 3,5$	$1,45\pm 0,31$	$869\pm 59$
	Abril	<11 (a)	$14,3\pm 6,1$	$27,8\pm 4,6$	<1,6 (a)	$1387\pm 38$

Atividade mínima detetável (a).

## I. 4 RADIOATIVIDADE EM ÁGUAS PARA CONSUMO HUMANO

Os radionuclídeos de origem natural estão presentes na crosta terrestre e consequentemente nas águas naturais, entrando facilmente no ciclo da água para consumo humano. A contribuição da água para consumo humano, quer seja de origem superficial ou de profundidade, para a exposição total à radioatividade é diminuta e devida maioritariamente aos radionuclídeos naturais das séries radioativas do Urânio ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  e descendentes) e do Tório ( $^{228}\text{Ra}$ ). Além destes radionuclídeos poderão ser detetados o  $^{40}\text{K}$ , radionuclídeo de origem natural, e outros radionuclídeos ( $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{226}\text{Ra}$ ) que podem surgir no ambiente devido à atividade humana (centrais nucleares, atividade mineira, etc.). A determinação da radioatividade em água para consumo humano pode ser efetuada através das medições de atividades alfa total e beta total, as quais dão uma indicação dos níveis globais de concentração de atividade devida aos radionuclídeos naturais e artificiais emissores alfa e beta e/ou através da análise de radionuclídeos específicos.

### I.4.1 Materiais e Métodos

Com o objetivo de dar cumprimento à legislação nacional e europeia (Decreto-Lei 152/2017 de 7 de dezembro; Diretiva Europeia 2013/51 EURATOM) relativa ao controlo de substâncias radioativas na água destinada ao consumo humano, procedeu-se à pesquisa das atividades alfa total e beta total e dos radionuclídeos  $^3\text{H}$ , radão ( $^{222}\text{Rn}$ ),  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$  dissolvidos em águas para consumo humano.

Recolheram-se amostras de água para consumo humano em Lisboa (Figura I.1) com uma periodicidade mensal. Recolheram-se ainda amostras de água em localidades selecionadas aleatoriamente ao longo do país (Figura I.2). As amostras de água foram recolhidas em torneiras de distribuição ao público.

Para a determinação das atividades alfa total e beta total utilizou-se o método por cintilação em meio líquido (NRA\_PT\_02) baseado na norma ISO 11704 (2018). Nesta técnica, após a determinação prévia do teor em sais, a amostra é concentrada por evaporação lenta, procedendo-se ao ajuste do pH (aproximadamente  $1,5 \pm 0,5$ ) com ácido nítrico antes da sua concentração, dependendo o fator de concentração a aplicar do teor em sais da amostra. Este valor pode variar entre 1 (medida direta para amostras com teor em sais  $> 0,5 \text{ g L}^{-1}$ ) a 10, que é o valor normalmente utilizado em águas pouco salinas. Após concentração, uma alíquota de amostra (8 mL) é transferida para um frasco de cintilação em meio líquido, à qual se adiciona um cocktail de cintilação apropriado. A amostra é medida num espectrómetro de cintilação em meio líquido (Packard Tri-Carb 3170 TR/SL) previamente calibrado e otimizado para a discriminação alfa/beta. A eficiência de contagem é determinada por medição de fontes de calibração alfa ( $^{241}\text{Am}$ ) e beta ( $^{90}\text{Sr}$ ) puras, preparadas nas mesmas condições das

amostras (Figura I.12). A partir do mês de agosto devido a uma avaria no espectrómetro de cintilação em meio líquido (Packard Tri-Carb 3170 TR/SL) as análises para a determinação da atividade alfa/beta total passaram a ser realizadas pelo método por fonte concentrada como descrito em I.2.2.1.

A metodologia utilizada para a determinação da concentração de atividade em  $^3\text{H}$  seguiu o procedimento NRA\_PT\_03, sem enriquecimento isotópico, baseado na Norma ISO 9698 (2019). Após a visita ao IST, dos peritos de verificação do cumprimento das recomendações do Artigo 35 do Tratado EURATOM da Comissão Europeia, que decorreu em dezembro de 2018, decidiu-se optar por analisar as amostras de água para consumo humano utilizando a técnica sem enriquecimento isotópico. A diferença entre as duas técnicas, com e sem enriquecimento isotópico, baseia-se no facto de, no caso do enriquecimento isotópico podemos obter atividades mínimas detetáveis, cerca de uma ordem de grandeza inferior o que nos permite obter valores mensuráveis caso os teores em trítio nas amostras sejam baixos. Contudo esta técnica é mais morosa do ponto de vista laboratorial e no caso das águas para consumo humano pode não se justificar uma vez que o valor paramétrico estipulado na legislação é de  $100 \text{ Bq L}^{-1}$  (Diretiva Europeia 2013/51 EURATOM e no Decreto-Lei 152/2017 de 7 de dezembro), valor cerca de duas ordens de grandeza superior à atividade mínima detetável (aprox.  $4 \text{ Bq L}^{-1}$ ) para a técnica sem enriquecimento.

Para a determinação da concentração de atividade em  $^{222}\text{Rn}$  utilizou-se o método por cintilação em meio líquido (NRA\_PT\_09) baseado na norma ISO 13164-4 (2015). A metodologia consiste na extração de um volume de 10 mL de água, com o auxílio de uma seringa, do vasilhame contendo a amostra, e na sua injeção lenta no fundo do frasco de cintilação, o qual já deve conter 10 mL de um cocktail de cintilação específico (imiscível com água), sem causar turbulência, de modo a minimizar as perdas de radão. A medição deverá ser iniciada, pelo menos, 3 h após a sua preparação, garantindo desta forma o equilíbrio secular entre o  $^{222}\text{Rn}$  e os seus descendentes. A atividade alfa da amostra é medida num espectrómetro de cintilação em meio líquido (Packard Tri-Carb 3170 TR/SL) previamente calibrado com soluções padrão de  $^{226}\text{Ra}$ . Os padrões de calibração, após a preparação, são acondicionados no laboratório durante um mês, de forma a garantir o equilíbrio secular entre o  $^{226}\text{Ra}$  e o seu descendente  $^{222}\text{Rn}$ , após o qual se procede à sua medição.

Nas amostras de água colhidas em Lisboa procedeu-se ainda à determinação das concentrações de atividade em  $^{137}\text{Cs}$ , por espectrometria gama, e em  $^{90}\text{Sr}$ , por medição beta de acordo com o procedimento descrito em I.2.2.1.



**Figura I.12- Preparação e medição de amostras de água para consumo humano para a determinação da concentração de atividade alfa/beta e dos radionuclídeos  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{222}\text{Rn}$ .**

#### I.4.2 Resultados e Discussão

Nas Tabelas I.18 e I.19 estão expressos os valores da concentração de atividade,  $A$  ( $\text{Bq L}^{-1}$ ), em  $^3\text{H}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  e da atividade alfa total e atividade beta total, em amostras de água para consumo humano recolhidas mensalmente em Lisboa e aleatoriamente em vários locais do país, respetivamente.

Na Tabela I.18 apresentam-se ainda os valores da concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$ . Como se pode observar, os valores da concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$ , situam-se abaixo do valor de atividade mínima detetável, sendo o valor médio anual inferior a  $2,6 \text{ mBq L}^{-1}$ . Os valores em  $^{90}\text{Sr}$  foram todos mensuráveis, variando entre  $0,99 \pm 0,31 \text{ mBq L}^{-1}$  (dezembro) e  $4,1 \pm 1,1 \text{ mBq L}^{-1}$  (maio) e da mesma ordem de grandeza dos obtidos para o  $^{137}\text{Cs}$ . Estes valores são semelhantes aos reportados nos relatórios da Comissão Europeia (EUR 23950 EN, 2009; De Cort *et al.*, 2018).

Relativamente ao  $^3\text{H}$  os valores da concentração de atividade nas amostras de água recolhidas em Lisboa (Tabela I.18) situam-se abaixo do valor da atividade mínima detetável, com um valor médio anual  $< 3,9 \text{ Bq L}^{-1}$ . Das águas amostradas ao longo do país (Tabela I.19) os valores variando entre  $< 3,7 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $< 3,9 \text{ Bq L}^{-1}$ , são idênticos aos obtidos em Lisboa. Em geral, os valores observados são da ordem de grandeza dos reportados em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2008, 2009b, 2009d, 2010 a 2020a;) e muito inferiores (Madruga *et al.*, 2020b) ao valor paramétrico,  $100 \text{ Bq L}^{-1}$ , recomendado na Diretiva Europeia 2013/51 EURATOM e no Decreto-Lei 152/2017 de 7 de dezembro.

Relativamente ao radão a maioria dos valores situam-se abaixo da atividade mínima detetável (variando entre  $<0,39 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $<0,82 \text{ Bq L}^{-1}$ ) com exceção da amostra proveniente de Barca D'Alva cujo valor de concentração de atividade é de  $11,2 \pm 1,3 \text{ Bq L}^{-1}$  (Tabela I.19). A partir do mês de agosto devido à avaria do equipamento de medição por cintilação em meio líquido não foi possível a realização destas análises. O valor mensurável é cerca de 2 ordens de grandeza inferior ao valor paramétrico ( $500 \text{ Bq L}^{-1}$ ) definido no Decreto-Lei 152/2017 de 7 de dezembro. O baixo teor de radão observado nestas águas indica tratar-se de águas de origem superficial (rios, albufeiras, etc.). Foram reportados valores para a concentração de atividade em radão variando entre  $<0,3 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $77 \pm 9 \text{ Bq L}^{-1}$  em águas recolhidas em várias localidades na Finlândia durante os anos 2014 a 2017 (STUK-B 226, 2018).

Os valores de atividade alfa total, das amostras de água recolhidas em Lisboa (Tabela I.18) variam entre valores inferiores a  $0,018 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $0,035 \pm 0,015 \text{ Bq L}^{-1}$ . Para a atividade beta total os resultados situam-se entre  $0,050 \pm 0,012 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $0,161 \pm 0,049 \text{ Bq L}^{-1}$ . Os valores das atividades alfa total e beta total determinados nas amostras de água recolhidas em vários locais do país (Tabela I.19) são, em geral, da mesma ordem de grandeza dos medidos em Lisboa, com exceção da água recolhida em Barca D'Alva, cujo valor em alfa total ( $0,147 \pm 0,037 \text{ Bq L}^{-1}$ ) se aproxima do valor paramétrico ( $0,1 \text{ Bq L}^{-1}$ ). Os outros valores são muito inferiores aos valores paramétricos recomendados (alfa total:  $0,1 \text{ Bq L}^{-1}$ ; beta total:  $1 \text{ Bq L}^{-1}$ ) na Diretiva Europeia 2013/51 EURATOM e no Decreto-Lei 152/2017 de 7 de dezembro.

Numa perspetiva conservativa, considerou-se para o cálculo da dose efetiva por ingestão os valores máximos das atividades em  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^3\text{H}$  determinadas na água de consumo colhida em Lisboa (Tabela I.18), considerando os respetivos coeficientes de dose,  $2,8 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$  ( $^{90}\text{Sr}$ ),  $1,3 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) e  $1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1}$  ( $^3\text{H}$ ) (ICRP 119, 2012) e um consumo anual *per capita* de 730 litros (WHO, 2011). A dose efetiva devida à ingestão dessa água foi de  $0,16 \mu\text{Sv a}^{-1}$ . A contribuição para a dose variou entre os três radionuclídeos, sendo mais elevada para o  $^{90}\text{Sr}$  (52%) seguindo-se o  $^3\text{H}$  (31%) e o  $^{137}\text{Cs}$  (17%). Os valores de dose efetiva são comparáveis aos obtidos em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2008, 2009d, 2010 a 2020a). Na Finlândia, a dose de radiação devida à ingestão dos radionuclídeos,  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{137}\text{Cs}$  através da água para consumo humano variou entre  $0,02 \mu\text{Sv a}^{-1}$  e  $0,3 \mu\text{Sv a}^{-1}$  de 2014 a 2019 (STUK-B 190, 2015; STUK-B 204, 2016; STUK-B 215, 2017; STUK-B 226, 2018; STUK-B 236, 2019; STUK-B 249, 2020). No Reino Unido a dose efetiva de radiação (radionuclídeos artificiais) devida à ingestão de água foi inferior a  $1 \mu\text{Sv a}^{-1}$  durante os anos de 2014 a 2019 (RIFE-20, 2015; RIFE-21, 2016; RIFE-22, 2017; RIFE-23, 2018; RIFE-24, 2019; RIFE-25, 2020).

Tabela I.18 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), (Bq L<sup>-1</sup>), em <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>3</sup>H, <sup>222</sup>Rn, atividade alfa total e atividade beta total em água para consumo humano colhida em Lisboa.

Data de colheita	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>3</sup> H	<sup>222</sup> Rn	Alfa total	Beta total
<b>Janeiro</b>	<2,8x10 <sup>-3</sup> (a)	(2,61±0,63)x10 <sup>-3</sup>	<4,1 (b)	<0,41 (c)	<0,034 (d)	<0,077 (e)
<b>Fevereiro</b>	<2,8x10 <sup>-3</sup> (a)	(1,69±0,41)x10 <sup>-3</sup>	<4,0 (b)	<0,68 (c)	<0,034 (d)	<0,078 (e)
<b>Março</b>	<2,0x10 <sup>-3</sup> (a)	(2,32±0,58)x10 <sup>-3</sup>	<4,0 (b)	<0,45 (c)	<0,032 (d)	<0,076 (e)
<b>Abril</b>	<2,7x10 <sup>-3</sup> (a)	(1,90±0,43)x10 <sup>-3</sup>	<4,0 (b)	<0,40 (c)	<0,032 (d)	0,141±0,048
<b>Maió</b>	<2,2x10 <sup>-3</sup> (a)	(4,1±1,1)x10 <sup>-3</sup>	<3,9 (b)	<0,40 (c)	<0,035 (d)	0,131±0,048
<b>Junho</b>	<3,0x10 <sup>-3</sup> (a)	(2,13±0,53)x10 <sup>-3</sup>	<3,8 (b)	<0,39 (c)	<0,031 (d)	0,161±0,049
<b>Julho</b>	<2,6x10 <sup>-3</sup> (a)	(1,53±0,37)x10 <sup>-3</sup>	<4,0 (b)	<0,41 (c)	0,023±0,014	0,050±0,012
<b>Agosto</b>	<2,7x10 <sup>-3</sup> (a)	(1,11±0,38)x10 <sup>-3</sup>	<4,0 (b)	(f)	<0,018 (d) (g)	0,064±0,012 (g)
<b>Setembro</b>	<2,6x10 <sup>-3</sup> (a)	(1,75±0,48)x10 <sup>-3</sup>	<4,0 (b)	(f)	<0,018 (d) (g)	0,073±0,013 (g)
<b>Outubro</b>	<2,4x10 <sup>-3</sup> (a)	(1,72±0,43)x10 <sup>-3</sup>	<3,8 (b)	(f)	0,029±0,016 (g)	0,116±0,014 (g)
<b>Novembro</b>	<2,8x10 <sup>-3</sup> (a)	(1,56±0,44)x10 <sup>-3</sup>	<3,9 (b)	(f)	0,035±0,015 (g)	0,077±0,013 (g)
<b>Dezembro</b>	<2,6x10 <sup>-3</sup> (a)	(0,99±0,31)x10 <sup>-3</sup>	<3,8 (b)	(f)	0,017±0,011 (g)	0,056±0,012 (g)
<b>Média ± σ</b>	<2,6x10 <sup>-3</sup> (n=12)	(1,95±0,82)x10 <sup>-3</sup> (n=12)	<3,9 (n=12)	<0,45 (n=7)	<0,028 (n=12)	<0,092 (n=12)

Atividade mínima detetável em <sup>137</sup>Cs (a), <sup>3</sup>H (b), <sup>222</sup>Rn (c), atividade alfa total (d) e atividade beta total (e); Não foi possível realizar esta análise devido à avaria do equipamento de medição por cintilação em meio líquido (f); A partir do mês de agosto devido à avaria do equipamento de medição por cintilação em meio líquido as análises alfa/beta total realizaram-se pelo método da fonte concentrada (g).



**Tabela I.19 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq L^{-1}$ ), em  $^3H$ ,  $^{222}Rn$ , atividade alfa total e atividade beta total em água para consumo humano colhida em vários locais do país.**

Data de colheita	Local de Amostragem	$^3H$	$^{222}Rn$	Alfa total	Beta total
<b>Abril</b>	Reguengos de Monsaraz	<3,9 (a)	<0,50 (b)	0,044±0,022	0,211±0,051
<b>Abril</b>	Évora	<3,9 (a)	<0,50 (b)	<0,032 (c)	0,210±0,050
<b>Junho</b>	Barca D'Alva	<3,7 (a)	11,2±1,3	0,147±0,037	0,117±0,019
<b>Junho</b>	Guarda	<3,7 (a)	<0,79 (b)	(d)	(d)
<b>Junho</b>	Arcozelo da Serra	<3,8 (a)	<0,82 (b)	(d)	(d)

Atividade mínima detetável em  $^3H$  (a),  $^{222}Rn$  (b) e atividade alfa total (c); Não foi possível realizar estas análises devido à avaria do equipamento de medição por cintilação em meio líquido e por a quantidade de resíduo não ser suficiente para a realização da análise alfa/beta total pelo método da fonte concentrada (d).

## I.5 RADIOATIVIDADE EM COMPONENTES DA CADEIA ALIMENTAR

A avaliação do nível de radioatividade na dieta mista dá uma indicação da potencial contaminação radioativa do Homem através da cadeia alimentar. Essa avaliação poderá ser feita através da análise de alimentos individualizados ou da refeição completa sendo a refeição completa mais representativa da dieta mista.

O consumo de leite e derivados constitui uma das vias mais importantes de transferência dos radionuclidos do ambiente para o Homem. O seu controlo radiológico dá uma indicação imediata da contaminação radioativa das pastagens, originada pela deposição atmosférica ou pela utilização na rega de água proveniente de aquíferos contaminados (ex. zonas de exploração de minério radioativo). Em caso de contaminação os radionuclidos artificiais normalmente detetados são o  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  e  $^{90}\text{Sr}$ . O  $^{40}\text{K}$ , sendo um radionuclido de origem natural, está também presente no leite. O  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  e  $^{90}\text{Sr}$  são radionuclidos de origem artificial que poderão ser libertados para o ambiente devido ao mau funcionamento de uma instalação nuclear ou após um acidente nuclear.

### I.5.1 Materiais e Métodos

#### Componentes Individuais e Refeição Completa

O plano de amostragem dos diferentes componentes da cadeia alimentar consistiu na obtenção de: *i*) amostras mensais de carne, fruta, vegetal e tubérculo adquiridas ao produtor, e cuja recolha foi efetuada no Continente pela Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE) através de um protocolo de colaboração entre o IST e a ASAE, e nas Regiões Autónomas pela Inspeção Regional das Atividades Económicas dos Açores e pela Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais da Madeira (Figura I.2); e *ii*) uma amostragem anual (carne, fruta, vegetal, farinha, peixe, marisco) adquirida em supermercados da região de Lisboa (Figura I.2). Com este plano, procurou-se que as amostragens dos diferentes componentes fossem tão representativas quanto possível da situação nacional.

As amostras de refeição completa (correspondendo ao almoço e jantar) foram recolhidas, mensalmente, na cantina da Universidade de Lisboa (Figura I.1). A composição de cada amostra está descrita na Tabela I.21.

As amostras de componentes da cadeia alimentar e de refeições completas foram trituradas, homogeneizadas e colocadas em porta-amostras de 1 litro com a geometria “Marinelli”. A determinação da concentração de atividade nos radionuclidos  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  e  $^{40}\text{K}$  foi efetuada por espectrometria gama (Figura I.13) de acordo com o procedimento técnico (NRA\_PT\_11). Para a determinação do  $^{90}\text{Sr}$ , procedeu-se à separação deste radionuclido de outros elementos interferentes fazendo-se passar a amostra, após a incineração e diluição em

meio ácido, através de uma resina específica para o estrôncio (Eichrom). A medição beta na solução foi efetuada por cintilação em meio líquido usando um espectrómetro Packard Tri-Carb 3170 TR/SL. A concentração de atividade em  $^{90}\text{Sr}$  foi determinada após o equilíbrio radioativo entre o  $^{90}\text{Sr}$  e o seu descendente  $^{90}\text{Y}$  (Lopes & Madruga 2009a e 2009b; Lopes *et al.* 2010).

### Leite

Foram analisadas amostras de leite em natureza (sem qualquer tratamento) provenientes do produtor, através das cooperativas leiteiras, e recolhidas nos tanques à entrada das fábricas de transformação e distribuição de leite e produtos lácteos. Foram analisadas amostras mensais recolhidas na Lactogal (Vila do Conde) e Serraleite (Portalegre) (Figura I.1) e amostras trimestrais na Lactogal (Tocha-Cantanhede) e Parmalat (Águas de Moura) (Figura I.2). Procedeu-se também à análise de duas amostras anuais de leite adquiridas diretamente ao produtor, provenientes dos Açores e da Madeira respetivamente (Figura I.2). Estas amostras foram recolhidas pelas entidades referidas anteriormente para a colheita de alimentos.

Nestas amostras determinou-se a concentração de atividade para os radionuclídeos  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{40}\text{K}$ . Para a determinação da concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$  e  $^{40}\text{K}$ , foi utilizada como metodologia, a análise por espectrometria gama, em geometria “Marinelli”, (NRA\_PT\_11) efetuada diretamente em uma amostra de 1 litro de leite (Figura I.13). Para a determinação do  $^{90}\text{Sr}$  seguiu-se o procedimento descrito anteriormente para os componentes da cadeia alimentar e para a refeição completa.



**Figura I.13 - Preparação de amostras de produtos alimentares e medição por espectrometria gama.**

## I.5.2 Resultados e Discussão

### Componentes Individuais e Refeição Completa

Na Tabela I.20 estão expressos os valores das concentrações de atividade,  $A$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), dos radionuclídeos  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{40}\text{K}$  detetados em produtos da cadeia alimentar recolhidos em várias regiões de Portugal Continental, na Madeira e nos Açores. A análise de  $^{90}\text{Sr}$  foi efetuada só em alguns dos alimentos, carne e couve, por serem os mais representativos. A possível existência de radionuclídeos artificiais nestes alimentos é devida à deposição atmosférica dos radionuclídeos diretamente em alimentos de folhas (ex. couve) e indiretamente, através das pastagens, que servem de alimento aos animais sendo, conseqüentemente, transferidos à carne.

Da análise dos resultados presentes na Tabela I.20 constata-se que a concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$  se situa em geral, abaixo dos valores da atividade mínima detetável (variando entre  $0,08 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $0,25 \text{ Bq kg}^{-1}$ ). Algumas amostras apresentaram valores mensuráveis, mas da ordem de grandeza da atividade mínima detetável. As amostras de carne provenientes da Ilha Terceira, nos Açores, foram as que apresentaram valores quantificáveis em  $^{137}\text{Cs}$  mais elevados. As amostras colhidas em abril e novembro apresentaram o valor de  $1,59 \pm 0,16 \text{ Bq kg}^{-1}$  e de  $0,65 \pm 0,12 \text{ Bq kg}^{-1}$  respetivamente. Os valores em  $^{131}\text{I}$  apresentam-se abaixo da atividade mínima detetável. Relativamente à atividade em  $^{90}\text{Sr}$  a maioria dos resultados é inferior à atividade mínima detetável que se situa entre  $0,017 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $0,077 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Os valores quantificáveis, variando entre  $0,039 \pm 0,022 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $0,240 \pm 0,056 \text{ Bq kg}^{-1}$  correspondem maioritariamente a amostras de couve. É de salientar que devido à localização geográfica acontece com regularidade a deteção dos radionuclídeos  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$  em amostras (leite e/ou carne) provenientes dos Açores, que poderá ser devido à deposição atmosférica destes radionuclídeos após os testes nucleares dos anos 60 do século passado e do acidente nuclear de Fukushima. A atividade em  $^{40}\text{K}$  apresenta valores variando entre  $21,8 \pm 2,8 \text{ Bq kg}^{-1}$  (mexilhões) e  $142 \pm 10 \text{ Bq kg}^{-1}$  (batata). É importante salientar que a dispersão dos resultados em  $^{40}\text{K}$  é devida principalmente ao tipo de amostra, apresentado valores mais elevados as amostras de carne e batata.

Os resultados obtidos são, em geral, consistentes com as medições efetuadas em anos anteriores em produtos da cadeia alimentar (Madruga *et al.*, 2008, 2009c, 2010 a 2020a).

Os valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) em refeições completas estão expressos na Tabela I.21. Os valores da concentração de atividade do  $^{137}\text{Cs}$  são inferiores à atividade mínima detetável, variando entre  $0,057 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $0,15 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Foram detetados valores vestigiais de  $^{90}\text{Sr}$  ( $0,028 \pm 0,013 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) na amostra recolhida no mês de junho. Os valores da atividade mínima detetável em  $^{90}\text{Sr}$  situaram-se entre  $<0,022 \text{ Bq kg}^{-1}$  e  $<0,078 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

kg<sup>-1</sup>. Os valores em <sup>40</sup>K variam entre 31,7±2,3 Bq kg<sup>-1</sup> e 66,6±4,9 Bq kg<sup>-1</sup>. Os valores situam-se, em geral, na gama dos valores obtidos para os componentes da cadeia alimentar individualizados. Resultados semelhantes foram obtidos em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2008, 2009c, 2009d, 2010 a 2020a).

No Reino Unido foram reportados para o ano de 2019 (RIFE-25, 2020) valores inferiores a 0,02 Bq kg<sup>-1</sup> e 0,022 Bq kg<sup>-1</sup> para o <sup>137</sup>Cs e <sup>90</sup>Sr respetivamente, em amostras de refeições completas adquiridas em cantinas. Os mesmos autores reportam para o <sup>40</sup>K valores que variam entre 90-120 Bq kg<sup>-1</sup>. Valores da mesma ordem de grandeza foram reportados em anos anteriores (RIFE-20, 2015; RIFE-21, 2016; RIFE-22, 2017; RIFE-23, 2018; RIFE-24, 2019).

Partindo do pressuposto que as amostras de refeição completa são representativas da dieta portuguesa pode fazer-se uma estimativa da atividade ingerida por dia por pessoa. Considerando que uma pessoa ingere normalmente duas refeições completas por dia (almoço e jantar) calculou-se, a partir da concentração em atividade medida (Bq kg<sup>-1</sup>) e da massa (kg) correspondente às duas refeições, a atividade dos radionuclídeos ingeridos por dia/*per capita* (Bq d<sup>-1</sup>). Os resultados obtidos apresentando valores inferiores a 0,13 Bq d<sup>-1</sup> e 0,076 Bq d<sup>-1</sup> para o <sup>137</sup>Cs e <sup>90</sup>Sr respetivamente, estão presentes na Tabela I.21 (*em itálico*). Estes valores são semelhantes aos reportados em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2010 a 2020a) e inferiores aos publicados para outros países europeus (Alemanha, Espanha, Finlândia, Inglaterra e Suécia). Para os anos 2004-2006 foram reportados para os países da união europeia (EUR 23950 EN, 2009) valores médios trimestrais entre <0,2 Bq d<sup>-1</sup> e 11 Bq d<sup>-1</sup> para o <sup>137</sup>Cs e entre <0,1 Bq d<sup>-1</sup> e 0,45 Bq d<sup>-1</sup> para o <sup>90</sup>Sr. Para o ano de 2011 (De Cort *et al.*, 2018) foram reportados por 26 dos países membros da união europeia valores médios trimestrais variando entre <0,2 Bq d<sup>-1</sup> e 0,92 Bq d<sup>-1</sup> para o <sup>137</sup>Cs e entre <0,1 Bq d<sup>-1</sup> e 1,8 Bq d<sup>-1</sup> para o <sup>90</sup>Sr. Em Espanha, foram reportados para o ano de 2017 (Vivas *et al.*, 2019) valores máximos de 0,009 Bq d<sup>-1</sup> e 0,08 Bq d<sup>-1</sup> para o <sup>137</sup>Cs e <sup>90</sup>Sr respetivamente. Relativamente ao <sup>40</sup>K obtiveram-se valores variando entre 41,6±23,9 Bq d<sup>-1</sup> e 81,0±39,4 Bq d<sup>-1</sup>. O valor típico reportado para os países europeus é de 100 Bq d<sup>-1</sup> (De Cort *et al.*, 2018).

No que se refere à contribuição para a dose de radiação devida à ingestão da dieta mista (refeição completa), tendo em consideração a concentração de atividade máxima referente aos radionuclídeos artificiais <sup>137</sup>Cs e <sup>90</sup>Sr (Tabela I.21), a dose de radiação estimada devida à ingestão destes radionuclídeos através da refeição completa (dieta mista) não deverá exceder 1,4 μSv a<sup>-1</sup>, sendo a maior contribuição (≈ 56%) devida ao <sup>90</sup>Sr. Inversamente, na Finlândia (STUK-B 190, 2015; STUK-B 204, 2016; STUK-B 215, 2017; STUK-B 226, 2018; STUK-B 236, 2019; STUK-B 249, 2020) a maior contribuição é atribuída ao <sup>137</sup>Cs (≈ 90%)

provavelmente devido à influência do acidente nuclear de Chernobyl. O valor da dose de radiação reportado para 2019 foi inferior a  $3,5 \mu\text{Sv a}^{-1}$  (STUK-B 249, 2020).

### Leite

Nas Tabelas I.22 a I.26 estão presentes os valores da concentração de atividade,  $A$  ( $\text{Bq L}^{-1}$ ) em  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{40}\text{K}$  em leite proveniente de várias regiões de Portugal Continental e das Regiões Autónomas.

Verifica-se que os valores da concentração de atividade em  $^{137}\text{Cs}$  são inferiores ao valor da atividade mínima detetável, variando entre  $<0,05 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $<0,17 \text{ Bq L}^{-1}$ . Os valores em  $^{131}\text{I}$  situam-se abaixo do mínimo detetável e são da ordem de grandeza dos obtidos para o  $^{137}\text{Cs}$ . Relativamente ao  $^{90}\text{Sr}$ , os valores da atividade mínima detetável, variam entre  $<0,012 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $<0,039 \text{ Bq L}^{-1}$ . Valores mensuráveis, mas da ordem de grandeza da atividade mínima detetável, foram detetados em algumas das amostras. Em Espanha foram reportados, para o ano de 2017 (Vivas *et al.*, 2019), valores médios anuais variando entre  $0,008 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $0,048 \text{ Bq L}^{-1}$  para o  $^{137}\text{Cs}$  e entre  $0,008 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $0,042 \text{ Bq L}^{-1}$  para o  $^{90}\text{Sr}$ . Valores semelhantes foram reportados em Espanha para o ano 2018 (Vivas *et al.*, 2020). No relatório da Comissão Europeia referente aos anos 2004-2006 (EUR 23950 EN, 2009) foram reportados valores médios trimestrais variando entre valores inferiores a  $0,5 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $1,2 \text{ Bq L}^{-1}$  para o  $^{137}\text{Cs}$  e valores inferiores a  $0,2 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $0,37 \text{ Bq L}^{-1}$  para o  $^{90}\text{Sr}$  respetivamente. Os valores da concentração de atividade em  $^{40}\text{K}$  são mais elevados do que os obtidos para os outros radionuclidos e relativamente constantes variando entre  $43,3 \pm 4,8 \text{ Bq L}^{-1}$  e  $52,5 \pm 3,7 \text{ Bq L}^{-1}$ . Resultados semelhantes foram obtidos em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2008, 2009c, 2010 a 2020a).

Procedeu-se ao cálculo da dose de radiação devida à ingestão de leite, com base na taxa anual de consumo de 200 litros *per capita* (De Cort *et al.*, 2018), nos valores de concentração de atividade mínima e máxima em  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$  e nos respetivos coeficientes de dose (ICRP119, 2012) aplicáveis a um adulto médio para a categoria de membro do público. Obtiveram-se valores de dose de radiação por ingestão para o conjunto dos dois radionuclidos que variam entre  $0,23 \mu\text{Sv a}^{-1}$  e  $0,88 \mu\text{Sv a}^{-1}$  sendo, neste caso, idêntica (cerca de 50%) a contribuição devida a cada um dos radionuclidos. Os valores de dose de radiação são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em anos anteriores (Madruga *et al.* 2007b, 2008, 2009c, 2009d, 2010 a 2020a). A Finlândia reportou valores de dose de radiação devida ao  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$  variando entre  $0,5 \mu\text{Sv a}^{-1}$  e  $2,0 \mu\text{Sv a}^{-1}$  (STUK-B190, 2015; STUK-B204, 2016; STUK-B215, 2017; STUK-B226, 2018; STUK-B236, 2019; STUK-B249, 2020;) considerando um consumo *per capita* de 140 litros.

**Tabela I.20 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq\ kg^{-1}$ , peso fresco), dos radionuclídeos  $^{137}Cs$ ,  $^{131}I$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{40}K$  em produtos da cadeia alimentar.**

Entidade responsável pela colheita	Data de colheita	Local de colheita	Produto	$^{137}Cs$	$^{131}I$	$^{90}Sr$	$^{40}K$		
ASAE (Região Norte)	Fevereiro	Porto	Couve	<0,14 (a)	<0,24 (b)	<0,033 (c)	90,9±7,2		
		Viseu	Batata	<0,13 (a)	<0,28 (b)	-	127,7±9,0		
			Maçã	<0,12 (a)	<0,19 (b)	-	32,8±3,3		
Direção Regional de Agricultura da Região Autónoma da Madeira	Março	Braga	Carne (Bovino)	<0,13 (a)	<0,35 (b)	<0,029 (c)	113,5±8,4		
			Funchal	Couve	<0,15 (a)	<0,22 (b)	<0,035 (c)	73,4±6,3	
		Funchal	Batata	<0,14 (a)	<0,36 (b)	-	142±10		
			Anona	<0,11 (a)	<0,15 (b)	-	66±5,5		
	Funchal	Carne (Bovino)	<0,25 (a)	<3,6 (b)	<0,017 (c)	90,3±6,8			
		ASAE (Região Algarve)	Março	Faro	Couve	<0,14 (a)	<0,33 (b)	<0,022 (c)	73,5±6,0
				Faro	Cenoura	<0,14 (a)	<0,36 (b)	-	104,1±8,1
Laranja	<0,12 (a)				<0,16 (b)	-	52,9±4,8		
Carne (Borrego)	<0,11 (a)				<0,66 (b)	<0,046 (c)	108,1±8,0		
ASAE (Região de Lisboa e Vale do Tejo)	Abril	Lisboa	Alface	<0,14 (a)	<0,13 (b)	-	76,4±6,3		
			Cebola	<0,12 (a)	<0,71 (b)	-	33,4±3,4		
			Pera	<0,13 (a)	<0,08 (b)	-	34,2±2,7		
	Setúbal	Carne (Suíno)	<0,09 (a)	<0,28 (b)	<0,039 (c)	114,3±8,1			
		Inspeção Regional das Atividades Económicas dos Açores	Abril	Terceira	Couve	<0,14 (a)	<0,78 (b)	0,039±0,022	68,9±5,9
Terceira	Batata			<0,13 (a)	<0,76 (b)	-	114,7±8,5		
	Laranja			<0,14 (a)	<0,10 (b)	-	41,7±3,6		
	Carne (Bovino)			1,59 ± 0,16	<0,08 (b)	<0,040 (c)	96,9±7,0		
ASAE (Região Centro)	Maio	Coimbra	Couve	0,39 ± 0,12	<0,20 (b)	0,149±0,030	56,4±5,2		
		Aveiro	Batata	<0,12 (a)	<0,18 (b)	-	128,8±9,5		
			Viseu	Maçã	<0,09 (a)	<0,10 (b)	-	26,9±2,8	
		Leiria	Carne (Bovino)	<0,10 (a)	<0,17 (b)	<0,062 (c)	98,9±7,4		
ASAE (Região Alentejo)	Junho	Évora	Espinafres	<0,13 (a)	<0,18 (b)	-	76,7±6,3		
		Beja	Batata	<0,12 (a)	<0,39 (b)	-	126,2±9,3		
			Portalegre	Cereja	<0,10 (a)	<0,59 (b)	-	66,4±5,1	
		Portalegre	Carne (Bovino)	<0,11 (a)	<0,60 (b)	<0,055 (c)	78,8±6,2		
ASAE (Região Norte)	Junho	Aveiro	Couve	<0,14 (a)	<0,89 (b)	0,128±0,024	92,2±7,2		
			Batata	<0,13 (a)	<0,41 (b)	-	136,1±10,0		
			Laranja	<0,12 (a)	<0,32 (b)	-	44,6±4,1		
		Porto	Carne (Suíno)	<0,09 (a)	<0,74 (b)	(d)	96,8±7,0		

Atividade mínima detetável em  $^{137}Cs$  (a),  $^{131}I$  (b) e  $^{90}Sr$  (c); perda da amostra durante a análise (d)

Tabela I.20: continuação

Entidade responsável pela colheita	Data de colheita	Local de colheita	Produto	$^{137}\text{Cs}$	$^{131}\text{I}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{40}\text{K}$
Laboratório de Proteção e Segurança Radiológica	Julho	Supermercado Região de Lisboa	Tomate	<0,14 (a)	<0,15 (b)	-	61,5±5,6
			Melão	<0,12 (a)	<0,15 (b)	-	50,4±4,5
			Farinha	<0,08 (a)	<0,30 (b)	-	34,9±3,0
			Sardinhas	<0,12 (a)	<2,3 (b)	-	61,7±5,2
			Mexilhão	<0,11 (a)	<2,3 (b)	-	21,8±2,8
			Carne (Perú)	<0,12 (a)	<0,12 (b)	<0,074 (c)	108,3±8,1
ASAE (Região Algarve)	Setembro	Faro	Couve	<0,16 (a)	<0,29 (b)	<0,044 (c)	53,4±5,1
			Batata Doce	<0,13 (a)	<0,17 (b)	-	36,4±3,8
			Laranja	<0,11 (a)	<0,11 (b)	-	54,8±4,8
			Carne (Borrego)	<0,12 (a)	<0,34 (b)	<0,064 (c)	105,5±7,9
ASAE (Região Centro)	Outubro	Aveiro	Alface	<0,13 (a)	<0,18 (b)	-	62,9±5,4
			Cebola	<0,13 (a)	<0,59 (b)	-	36,5±3,7
		Coimbra	Pera	<0,11 (a)	<0,24 (b)	-	26,2±2,9
			Carne (Bovino)	0,246±0,092	<1,0 (b)	<0,077 (c)	101,0±7,6
Direção Regional de Agricultura da Região Autónoma da Madeira	Outubro	Funchal	Couve roxa	<0,15 (a)	<0,38 (b)	<0,020 (c)	92,7±7,5
			Batata	<0,10 (a)	<0,37 (b)	-	139,6±9,8
			Maçã	<0,09 (a)	<0,36 (b)	-	31,5±3,0
			Carne (Bovino)	0,111±0,065	<0,56 (b)	0,098±0,022	91,1±6,7
Inspeção Regional das Atividades Económicas dos Açores	Novembro	Terceira	Couve	<0,15 (a)	<0,28 (b)	0,098±0,022	92,6±7,6
			Batata	0,28±0,11	<0,48 (b)	-	104,5±7,9
			Laranja	<0,12 (a)	<0,34 (b)	-	43,7±4,0
			Carne (Bovino)	0,65±0,12	<7,7 (b)	<0,066 (c)	117,5±8,6
ASAE (Região Norte)	Novembro	Porto	Couve	<0,13 (a)	<0,45 (b)	0,240±0,056	101,4±8,0
			Batata	<0,20 (a)	<0,34 (b)	-	134,7±9,8
		Porto	Maçã	<0,11 (a)	<0,18 (b)	-	37,1±3,6
			Carne (Bovino)	<0,12 (a)	<6,8 (b)	<0,059 (c)	95,1±7,2
ASAE (Região de Lisboa e Vale do Tejo)	Dezembro	Lisboa	Couve	<0,11 (a)	<0,96 (b)	<0,048 (c)	78,3±6,1
			Batata Doce	0,117±0,068	<0,98 (b)	-	43,3±3,9
			Maçã	<0,08 (a)	<0,98 (b)	-	28,7±2,9
			Carne (Bovino)	<0,12 (a)	<1,8 (b)	<0,058 (c)	102,8±7,7

Atividade mínima detetável em  $^{137}\text{Cs}$  (a),  $^{131}\text{I}$  (b) e  $^{90}\text{Sr}$  (c);



**Tabela I.21 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ) em  $Bq\ kg^{-1}$  (peso fresco) e em  $Bq\ d^{-1}$  por pessoa (valores em *itálico*) para os radionuclídeos  $^{137}Cs$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{40}K$  em refeições completas adquiridas na cantina da Universidade de Lisboa.**

Data de Colheita	Composição das refeições	$^{137}Cs$	$^{90}Sr$	$^{40}K$
<b>Janeiro</b>	Creme de legumes com lombardo, esparguete á bolonhesa, pastéis de bacalhau com arroz de feijão e feijão verde cozido, salada de fruta.	<0,057 (a) <0,087 (a)	<0,035 (b) <0,053 (b)	31,7±2,3 48,2±19,2
<b>Fevereiro</b>	Caldo verde, empadão de atum, febras fritas com arroz branco, gelatina de pêssego.	<0,085 (a) <0,106 (a)	<0,022 (b) <0,028 (b)	65,2±4,8 81,0±39,4
<b>Março</b>	Sopa de alho francês, bifés de vaca de cebolada com arroz branco, esparguete com atum e salada de alface e tomate, gelatina de pêssego.	<0,058 (a) <0,061 (a)	<0,043 (b) <0,045 (b)	39,5±3,0 41,6±23,9
<b>Abril</b>	Sopa de espinafres, bifés de frango fritos com batata frita, frango estufado com esparguete e salada de alface e cenoura ralada, gelatina de morango.	<0,069 (a) <0,065 (a)	<0,052 (b) <0,049 (b)	64,5±4,6 60,7±39,0
<b>Maió</b>	Creme de cenoura, red fish assado no forno com batata frita e salada de alface, carne de vaca estufada com arroz branco, gelatina de pêssego.	<0,059 (a) <0,075 (a)	<0,031 (b) <0,039 (b)	50,3±3,7 63,3±30,4
<b>Junho</b>	Caldo verde, calamares com arroz branco e legumes salteados, febras fritas com esparguete e cenoura ralada, maçã assada.	<0,059 (a) <0,093 (a)	0,028 ± 0,013 0,044 ± 0,026	40,1±3,1 63,3±24,3
<b>Julho</b>	Creme de legumes, alheira com batata frita e ovo estrelado, maçã assada.	<0,081 (a) <0,057 (a)	<0,045 (b) <0,032 (b)	66,6±4,9 47,2±40,3
<b>Setembro</b>	Creme de cenoura, salmão grelhado com puré de batata, red fish com batata assada e couve flor cozida, pudim de baunilha.	<0,068 (a) <0,089 (a)	<0,048 (b) <0,063 (b)	60,1±4,3 78,5±36,3
<b>Outubro</b>	Creme de cenoura, filetes de pescada com arroz de feijão, alheira com batata frita e grelos salteados, pudim de baunilha.	<0,066 (a) <0,083 (a)	<0,060 (b) <0,076 (b)	45,9±3,4 57,8±27,7
<b>Novembro</b>	Creme de cenoura, alheira com batata frita, ovo estrelado e salada de alface, bifés de frango grelhados com arroz branco e salada de alface e tomate, maçã cozida.	<0,15 (a) <0,13 (a)	<0,078 (b) <0,066 (b)	64,6±4,7 54,4±39,0
<b>Dezembro</b>	Caldo verde, empadão de carne com legumes salteados, febras fritas com esparguete, maçã assada.	<0,062 (a) <0,110 (a)	<0,035 (b) <0,062 (b)	42,6±3,2 75,3±25,8

Atividade mínima detetável em  $^{137}Cs$  (a) e  $^{90}Sr$  (b).

**Tabela I.22 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq L^{-1}$ ), dos radionuclídeos  $^{137}Cs$ ,  $^{131}I$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{40}K$  em leite proveniente da Lactogal (Vila do Conde).**

Data de colheita	$^{137}Cs$	$^{131}I$	$^{90}Sr$	$^{40}K$
<b>Fevereiro</b>	<0,12 (a)	<0,10 (b)	<0,025 (c)	48,2±4,2
<b>Março</b>	<0,08 (a)	<0,11 (b)	<0,021 (c)	49,3±4,0
<b>Abril</b>	<0,07 (a)	<0,18 (b)	<0,023 (c)	48,0±3,6
<b>Mai</b>	<0,15 (a)	<0,13 (b)	<0,026 (c)	43,3±4,8
<b>Junho</b>	<0,10 (a)	<0,10 (b)	<0,015 (c)	46,2±4,1
<b>Julho</b>	<0,084 (a)	<0,11 (b)	<0,022 (c)	46,7±3,8
<b>Agosto</b>	<0,08 (a)	<0,09 (b)	<0,021 (c)	44,8±3,7
<b>Setembro</b>	<0,11 (a)	<0,16 (b)	<0,036 (c)	46,0±4,1
<b>Outubro</b>	<0,11 (a)	<0,17 (b)	<0,035 (c)	46,1±4,2
<b>Novembro</b>	<0,09 (a)	<0,13 (b)	<0,024 (c)	50,7±4,1
<b>Dezembro</b>	<0,11 (a)	<0,12 (b)	0,016±0,010	50,0±4,4

Atividade mínima detetável em  $^{137}Cs$  (a),  $^{131}I$  (b) e  $^{90}Sr$  (c).

**Tabela I.23 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq L^{-1}$ ), dos radionuclídeos  $^{137}Cs$ ,  $^{131}I$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{40}K$  em leite proveniente da Serraleite (Portalegre).**

Data de colheita	$^{137}Cs$	$^{131}I$	$^{90}Sr$	$^{40}K$
<b>Fevereiro</b>	<0,08 (a)	<0,07 (b)	<0,023 (c)	51,5±4,1
<b>Março</b>	<0,11 (a)	<0,11 (b)	<0,022 (c)	46,5±4,1
<b>Abril</b>	<0,09 (a)	<0,12 (b)	<0,009 (c)	44,5±3,7
<b>Mai</b>	<0,08 (a)	<0,10 (b)	<0,021 (c)	47,4±3,9
<b>Junho</b>	<0,08 (a)	<0,15 (b)	<0,016 (c)	46,8±3,8
<b>Julho</b>	<0,11 (a)	<0,11 (b)	<0,022 (c)	46,8±4,2
<b>Agosto</b>	<0,08 (a)	<0,12 (b)	<0,033 (c)	47,6±3,9
<b>Setembro</b>	<0,11 (a)	<0,09 (b)	<0,036 (c)	47,4±4,2
<b>Outubro</b>	<0,11 (a)	<0,12 (b)	<0,039 (c)	45,1±4,1
<b>Novembro</b>	<0,10 (a)	<0,10 (b)	<0,023 (c)	46,1±4,1
<b>Dezembro</b>	<0,08 (a)	<0,12 (b)	<0,012 (c)	48,8±4,0

Atividade mínima detetável em  $^{137}Cs$  (a),  $^{131}I$  (b) e  $^{90}Sr$  (c).

**Tabela I.24 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq L^{-1}$ ), dos radionuclídeos  $^{137}Cs$ ,  $^{131}I$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{40}K$  em leite proveniente da Lactogal (Tocha).**

Data de colheita	$^{137}Cs$	$^{131}I$	$^{90}Sr$	$^{40}K$
<b>Abril</b>	<0,10 (a)	<0,32 (b)	<0,016 (c)	49,5±4,0
<b>Julho</b>	<0,11 (a)	<0,14 (b)	<0,018 (c)	46,2±4,1
<b>Outubro</b>	<0,11 (a)	<0,10 (b)	<0,030 (c)	45,9±4,1

Atividade mínima detetável em  $^{137}Cs$  (a),  $^{131}I$  (b) e  $^{90}Sr$  (c).

**Tabela I.25 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq L^{-1}$ ), dos radionuclídeos  $^{137}Cs$ ,  $^{131}I$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{40}K$  em leite proveniente da Parmalat (Águas de Moura).**

Data de colheita	$^{137}Cs$	$^{131}I$	$^{90}Sr$	$^{40}K$
<b>Março</b>	<0,10 (a)	<0,14 (b)	<0,025 (c)	48,5±4,1
<b>Junho</b>	<0,17 (a)	<0,13 (b)	<0,017 (c)	47,5±3,8
<b>Setembro</b>	<0,11 (a)	<0,21 (b)	<0,024 (c)	48,5±4,3
<b>Dezembro</b>	<0,10 (a)	<0,13 (b)	<0,016 (c)	48,4±3,9

Atividade mínima detetável em  $^{137}Cs$  (a),  $^{131}I$  (b) e  $^{90}Sr$  (c).

**Tabela I.26 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq L^{-1}$ ), dos radionuclídeos  $^{137}Cs$ ,  $^{131}I$ ,  $^{90}Sr$  e  $^{40}K$  em leite proveniente das Regiões autónomas (Madeira e Açores).**

Data de colheita	Local de colheita	$^{137}Cs$	$^{131}I$	$^{90}Sr$	$^{40}K$
<b>Março</b>	<b>Madeira</b> (Funchal)	<0,09 (a)	<0,11 (b)	<0,021 (c)	44,1±4,0
<b>Outubro</b>	<b>Madeira</b> (S. Vicente)	<0,05 (a)	<0,07 (b)	<0,034 (c)	52,5±3,7
<b>Abril</b>	<b>Açores</b> (Terceira)	<0,12 (a)	<0,11 (b)	<0,034 (c)	51,9±4,1
<b>Novembro</b>	<b>Açores</b> (Terceira)	<0,11 (a)	<0,11 (b)	0,079±0,020	45,8±4,1

Atividade mínima detetável em  $^{137}Cs$  (a),  $^{131}I$  (b) e  $^{90}Sr$  (c).

## I.6 RADIOATIVIDADE EM SOLOS

### I.6.1 Materiais e Métodos

Procedeu-se a uma amostragem anual de solos recolhidos aleatoriamente em diferentes locais no país. Os locais de amostragem estão representados na Figura I.2.

A colheita deve ser feita num local o mais plano possível, não arborizado e sem afloramentos rochosos. Seleciona-se uma área de amostragem de aproximadamente 1 m<sup>2</sup>. Na área selecionada recolhem-se 5 amostras, uma em cada vértice e uma no centro do quadrado, a cerca de 10 cm de profundidade. A recolha é efetuada com uma pá em metal e a amostra compósita, resultante das 5 amostras, é colocada num saco ou numa caixa em plástico. No laboratório, os solos foram secos a 105°C, desagregados e passados por um peneiro com um crivo de 1000 µm de diâmetro, tendo-se retido para análise a fração de granulometria inferior a 1000 µm. Da amostra, previamente homogeneizada, retirou-se uma alíquota que se colocou num porta-amostras hermeticamente fechado. A análise por espectrometria gama (NRA\_PT\_11) processou-se ao fim de um mês de modo a assegurar o equilíbrio radioativo entre os radionuclidos das séries radioativas do <sup>238</sup>U e do <sup>232</sup>Th e os seus descendentes.

### I.6.2 Resultados e Discussão

Na Tabela I.27 estão presentes os valores da concentração de atividade, A (Bq kg<sup>-1</sup>), dos radionuclidos naturais e artificiais detetados em solos provenientes de várias regiões do país.

Como se pode observar os valores da concentração de atividade em <sup>235</sup>U situam-se abaixo dos valores da atividade mínima detetável, com exceção do valor medido em Vila Velha de Ródão. Os valores da concentração de atividade em <sup>228</sup>Ra e <sup>226</sup>Ra são da mesma ordem de grandeza e situam-se entre 17,9±2,1 Bq kg<sup>-1</sup> e 58,0±5,6 Bq kg<sup>-1</sup> e entre 12,3±1,6 Bq kg<sup>-1</sup> e 62,9±5,2 Bq kg<sup>-1</sup>, respetivamente. A concentração de atividade em <sup>40</sup>K varia entre 469±34 Bq kg<sup>-1</sup> (Mourão) e 807±57 Bq kg<sup>-1</sup> (Alto da Sapinha). Os valores da concentração de atividade em <sup>137</sup>Cs variam entre 0,87±0,39 Bq kg<sup>-1</sup> (Mourão) e 6,10±0,65 Bq kg<sup>-1</sup> (Alto da Sapinha). O <sup>7</sup>Be não foi detetado nos solos analisados. Valores variando entre 0,24 Bq kg<sup>-1</sup> e 27 Bq kg<sup>-1</sup> foram reportados para a concentração de atividade em <sup>137</sup>Cs em solos espanhóis (Vivas *et al.*, 2019). Em geral, os resultados obtidos são semelhantes aos observados em anos anteriores em solos recolhidos ao longo do país (Madruça *et al.*, 2008, 2009d, 2010 a 2020a).

**Tabela I.27 - Valores da concentração de atividade,  $A \pm U$  ( $k=2$ ), ( $Bq\ kg^{-1}$ ), de radionuclídeos naturais e artificiais emissores gama em solos provenientes de várias regiões do país.**

Local de amostragem	$^{235}U$	$^{228}Ra$	$^{226}Ra$	$^{137}Cs$	$^{40}K$	$^7Be$
<i>Mourão</i>	<3,6 (a)	17,9±2,1	12,3±1,6	0,87±0,39	469±34	<33 (a)
<i>Aguieira</i>	<4,3 (a)	47,8±4,4	55,1±4,4	<1,1 (a)	768±54	<79 (a)
<i>Alto da Sapinha</i>	<4,9 (a)	57,3±5,4	59,9±4,8	6,10±0,65	807±57	<47 (a)
<i>Vila Velha de Ródão</i>	10,4±3,4	58,0±5,6	62,9±5,2	5,16±0,65	634±47	<113 (a)

Atividade mínima detetável (a).

## I.7 DOSE DE RADIAÇÃO GAMA AMBIENTAL

### I.7.1 Material e Métodos

Durante o ano de 2019 deu-se continuidade à avaliação da dose de radiação gama ambiental com detetores passivos termoluminescentes nos pontos de medida localizados em Bragança, Castelo Branco, Faro, Funchal, Lisboa, Penhas Douradas, Ponta Delgada e Porto.

Com o objetivo de garantir a segurança física dos dosímetros durante os períodos de exposição de cerca de três meses, no exterior, facilitar os processos de colocação, remoção e envio dos dosímetros ao CTN para avaliação, e ainda, tendo em consideração o carácter contínuo da monitorização ambiental, escolheram-se pontos de medida localizados no interior dos parques das estações meteorológicas do Instituto de Meteorologia, em cada uma das localidades acima mencionadas. No caso de Faro, os dosímetros são colocados no Campus de Gambelas da Universidade do Algarve e em Lisboa e no Porto, nos Institutos Geofísicos das respetivas Universidades, sítios em Lisboa e em Vila Nova de Gaia.

Em 2019 utilizou-se a metodologia descrita anteriormente (Alves *et al.*, 1999; Madruga *et al.*, 2006; Alves *et al.*, 2006a e 2006b; Pereira *et al.*, 2016). Realizaram-se quatro campanhas de monitorização, correspondendo aproximadamente, aos quatro trimestres do ano. Os dosímetros foram enviados para as estações de medida e regressaram ao CTN por correio normal sempre acompanhados por um conjunto de dosímetros de trânsito, com o intuito de identificar e eventualmente corrigir, alguma exposição anómala verificada durante os trajetos. Em todos os pontos de medida, os dosímetros foram sempre expostos no ambiente exterior, a um metro do solo.

O dosímetro termoluminescente utilizado consiste no porta-dosímetro *Harshaw 8855* contendo um cartão com dois detetores TLD-100, calibrado em termos do equivalente de dose ambiente  $H^*(10)$  (Pereira *et al.*, 2016). Os dosímetros são lidos nos leitores semi-automáticos *Harshaw 6600*, sendo a eficiência de cada detetor corrigida através da aplicação do respetivo fator de correção individual, de acordo com metodologia anteriormente descrita (Alves *et al.*, 2004, 2006a, 2006b e 2006c). Em cada ponto de medida foram colocados seis dosímetros, agrupados em três conjuntos de dois, todos expostos durante o mesmo intervalo de tempo. O primeiro conjunto de dois dosímetros foi irradiado a uma dose de referência antes da colocação no ponto de medida; o segundo conjunto de dois dosímetros foi irradiado à mesma dose de referência depois do tempo de exposição; o terceiro conjunto de dosímetros não recebeu qualquer irradiação além da dose de radiação natural que se pretende avaliar. Findo o período de integração, os três conjuntos foram lidos simultaneamente. Com os conjuntos irradiados antes e depois do período de exposição no exterior pretende-se corrigir o *fading* (desvanecimento térmico) e/ou as alterações de sensibilidade induzidas pela temperatura

ambiente e suportadas pelos dosímetros durante o tempo de exposição (Alves *et al.*, 1999, Pereira *et al.*, 2016). Para cada ponto de medida, determinou-se o respetivo fator de correção de *fading*, que foi aplicado ao valor de dose avaliado com os dosímetros não irradiados.

Os resultados apresentados estão todos expressos em termos do débito de equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , em unidades de  $nSv.h^{-1}$ .

### I.7.2 Resultados e Discussão

Na Tabela I.28 representam-se os valores médios do débito de equivalente de dose ambiente medidos nos vários pontos do País nos quatro trimestres de 2019, bem como a respetiva incerteza, obtida a partir do desvio padrão das leituras. Apresentam-se também os valores médios anuais para 2019, bem como a respetiva incerteza, calculada considerando todas as leituras individuais efetuadas nos quatro trimestres. Os mesmos valores estão graficamente representados na Figura I.14.

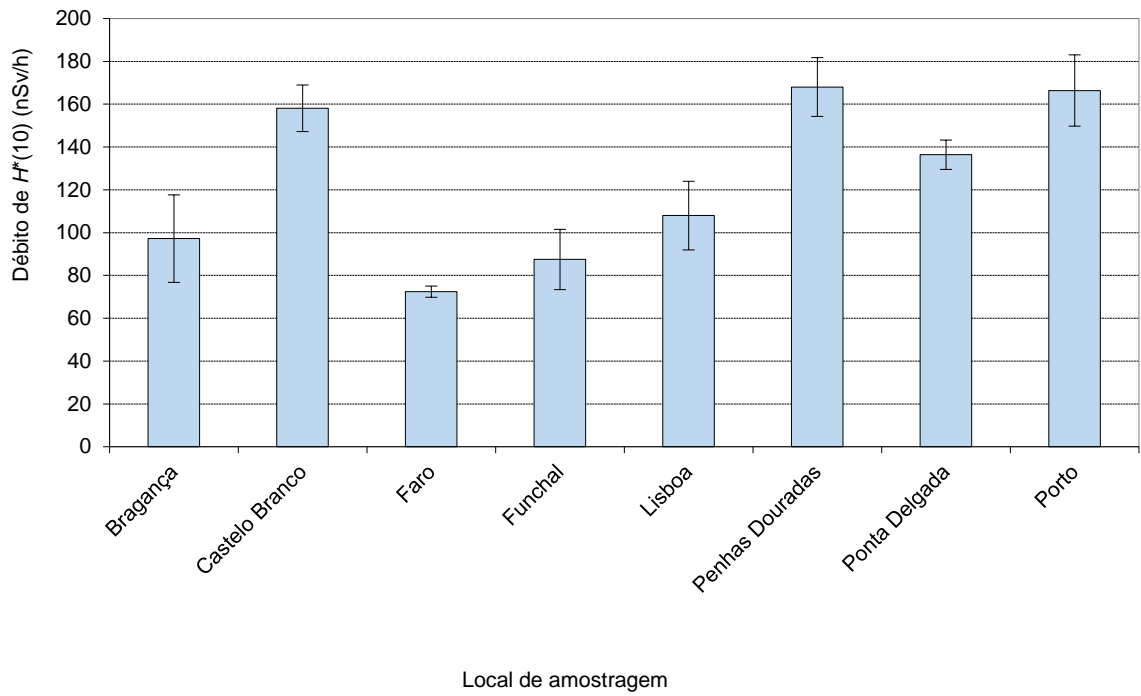
Os valores médios do débito de equivalente de dose ambiente avaliados nos vários pontos do País dependem fundamentalmente da constituição geológica dos solos, bem como da altitude média do ponto de medida (Amaral, 1995). De uma maneira geral, observa-se que os valores medidos em 2019 se encontram no intervalo de variação constituído pelos valores reportados em anos anteriores, de 2006 a 2018 (Madruga *et al.*, 2009 a 2020a). Os valores medidos em 2019 e apresentados na Tabela I.28 podem ser considerados valores normais, compatíveis com valores anteriormente publicados para cada uma destas regiões (Amaral, 1995).

**Tabela I.28 – Valores médios dos trimestres I a IV e valor médio anual do débito do equivalente de dose ambiente medido em cada uma das localidades do País (valores expressos em  $nSv.h^{-1}$ ).**

Ponto de medida	I	II	III	IV	Ano 2019
Bragança	115±9	79±19	84±8	110±21	97±20
Castelo Branco	174±5	152±6	150±7	156±5	158±11
Faro	74±2	-	74±2(a)	70±1	72±3
Funchal	93±1	83±0	75±2	98±28	87±14
Lisboa	115±22	115±21	104±15	98±14	108±16
Penhas Douradas	181±4	147±4	174±6	170±1	168±14
Ponta Delgada	145±7	136±8	132±4	133±0	136±7
Porto	nd	158±23	179±6	162±18	166±17

(a) Dosímetros utilizados durante os trimestres II e III; (nd) não devolvido.





**Figura I.14 – Valor médio anual para 2019 do débito de equivalente de dose ambiente medido nos vários pontos do País (valores expressos em nSv.h<sup>-1</sup>).**

## I.8 CONCLUSÕES

Do vasto conjunto de resultados obtidos para os diferentes tipos de amostras (aerossóis, água da chuva, águas de superfície, águas para consumo humano, produtos alimentares, leite, sedimentos, solos, etc.) pode concluir-se que os teores de radioatividade são baixos e, em geral, consistentes com os valores reportados em anos anteriores. As concentrações de atividade dos radionuclídeos de origem natural, designadamente das famílias do Urânio, do Tório, e o  $^{40}\text{K}$ , são valores típicos do fundo radioativo natural, isto é, não alterados pela ação humana. As concentrações de atividade dos radionuclídeos de origem artificial, designadamente  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  e  $^3\text{H}$ , são muito baixas e, frequentemente, abaixo dos valores da atividade mínima detetável.

A estimativa de dose de radiação devida à inalação e ingestão de radionuclídeos artificiais por um elemento médio da população Portuguesa é de aproximadamente  $2,4 \mu\text{Sv a}^{-1}$ , isto é, cerca de 0,24% do limite de dose para membros do público,  $1 \text{ mSv a}^{-1}$  (Decreto Lei 108/2018, de 3 de dezembro). Este valor aumenta, atingindo cerca de 1% do limite de dose, se os radionuclídeos de origem natural,  $^{210}\text{Pb}$ , no ar inalado e  $^{222}\text{Rn}$  na água para consumo humano forem considerados na estimativa da dose de radiação (Madruga *et al*, 2020c).

Os níveis de radioatividade detetados em 2019 são muito baixos e não têm significado sob o ponto de vista radiológico não apresentando qualquer efeito nocivo para o ambiente e para a saúde da população Portuguesa.

## **AGRADECIMENTOS**

- À Autoridade de Segurança Alimentar e Económica (ASAE) que, através do protocolo de colaboração entre o IST e a ASAE, procede à colheita de amostras de géneros alimentícios em Portugal Continental.
- À Inspeção Regional das Atividades Económicas dos Açores e à Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais da Madeira pelo apoio prestado na colheita e envio de amostras de géneros alimentícios das respetivas regiões autónomas.
- Às Empresas Lactogal-Produtos Alimentares S.A, Jerónimo Martins-Lacticínios de Portugal S.A. e Parmalat Portugal- Produtos Alimentares S.A, pela disponibilidade na cedência das amostras de leite.
- Aos Serviços de Ação Social da Universidade de Lisboa (SASUL) pela cedência das amostras de refeição completa.
- À Câmara Municipal de Lisboa/Divisão do Ambiente por ter autorizado a colheita de amostras de água para consumo humano no Laboratório de Bromatologia em Lisboa.
- Ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera, por ter permitido a colocação e substituição periódica dos detetores TLD nas estações meteorológicas instaladas no Continente e nas Regiões Autónomas, bem como a instalação de um colhedor de deposição atmosférica nas instalações de Castelo Branco.
- À Universidade do Algarve (Campus de Gambelas), à Universidade de Lisboa (Instituto Geofísico Infante D. Luís) e à Universidade do Porto (Serra do Pilar, Vila Nova de Gaia), por terem permitido a colocação e pela substituição periódica dos detetores TLD nos respetivos parques meteorológicos.

## REFERÊNCIAS

- Abe T., Kosako T., Komura K. (2010). Relationship between variations of  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{212}\text{Pb}$  concentrations and sub-regional atmospheric transport: simultaneous observation at distant locations. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 113-121.
- Alves J.G., Muñiz J.L., Gómez Ros J.M., Delgado A. (1999). A Comparative Study on the Thermal Stability of LiF:Mg, Ti and LiF:Mg,Cu,P Detectors for Environmental Monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.*, 85, 253-257.
- Alves J.G., Abrantes J.N., Margo O., Rangel S., Santos L. (2004). Long-Term Stability of a TLD-Based Individual Monitoring System. *Radiat. Prot. Dosim.* 120, 1-4, 289-292.
- Alves J.G., Novais L., Rangel S. (2006a). Environmental gamma radiation monitoring at ITN. In Atas do 10<sup>th</sup> International Symposium on Radiation Physics, Coimbra (Portugal), setembro 2006.
- Alves J.G., Novais L., Rangel S., Calado A. (2006b). Testes para a implementação da dosimetria ambiental com detetores termoluminescentes individuais. *Relatório Interno*, novembro 2006.
- Alves J.G., Novais L., Rangel S., Flores E. (2006c). Quality assurance and quality control programme in use at the individual monitoring service of ITN-DPRSN. In Atas do 2<sup>nd</sup> European IRPA Congress, Paris (França), maio 2006.
- Amaral, E.M. (1995). Exposição à Radiação Gama Natural Terrestre – relação entre as doses de radiação e os radionuclídeos primordiais existentes no solo. *Monografia* apresentada para prestação de provas de acesso à categoria de Investigador Auxiliar.
- APA 2017. Relatório sobre a qualidade da água superficial no rio Tejo. Agência Portuguesa do Ambiente, Março 2017, 36 pp.  
[https://apambiente.pt/zdata/DESTAQUES/2017/Qualidade%20agua%20superficial%20rio%20tejo/RELATRIO%20Tejo\\_mar2017\\_Final.pdf](https://apambiente.pt/zdata/DESTAQUES/2017/Qualidade%20agua%20superficial%20rio%20tejo/RELATRIO%20Tejo_mar2017_Final.pdf)
- Baskaran M. (2011). Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 500-513.
- Carvalho A.C., Reis M., Silva L., Madruga M.J. (2013). A decade of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  activity in surface aerosols measured over the western Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 67, 193-202.
- COM/473/EURATOM (2000). Commission Recommendation of 8 June 2000, Official Journal of the European Commission, nº 191, 27<sup>th</sup> July 2000.
- De Cort, M., Tollefsen, T., Marin Ferrer, M., Vanzo, S., Hernandez Ceballos, M. A., Nweke, E., De Felice, L., Martino, S., Tognoli, P. V., Tanner, V. (2018). Environmental Radioactivity in the European Community, EUR 29564 ISBN 978-92-79-98376-4. doi: 10.2760/74810, JRC114644.
- Decreto-Lei 138/2005 de 17 de agosto (D.R. nº 157, 1<sup>a</sup> Série)
- Decreto-Lei 152/2017 de 7 de dezembro (D.R. nº 235, 1<sup>a</sup> Série).
- Decreto-Lei 108/2018, de 3 de dezembro (D.R. nº 232, 1<sup>a</sup> Série).
- Diretiva Conselho 2013/51 EURATOM of 22 October 2013 laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. OJEU L296/12, 7.11.2013.
- Dueñas C., Orza J.A.G., Cabello M., Fernández M.C., Cañete S., Pérez M., Gordo E. (2011). Air mass origin and its influence on radionuclide activities ( $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$ ) in aerosol

- particles at a coastal site in the Western Mediterranean, *Atmospheric Research* 101, 205-214.
- EUR 23950 EN (2009). Environmental Radioactivity in the European Community (2004-2006). *Radiation Protection* N° 161, ISBN 978-92-79-12984-1.
- Gomes A.R., Abrantes J., Libânio A., Madruga M.J., Reis M. (2017). Determination of tritium in water using electrolytic enrichment: methodology improvements. *J Radioanal Nucl Chem* 314, 669-674. doi: 10.1007/s10967-017-5456-y.
- Heinrich P., Coindreau O., Grillon Y., Blanchard X., Gross P. (2007). Simulation of the atmospheric concentrations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  and comparison with daily observations at three surface sites. *Atmospheric Environment*, 41, 6610-6621.
- Heredia S., Tovar I., Castillo C., Collantes R., Carmona A., Salvador L. (2014). Programas de Vigilância Radiológica Ambiental - Resultados 2013. Colección Informes Técnicos, 41.2014. Referencia INT-04.35, Consejo de Seguridad Nuclear, Depósito legal: M-32338-2014.
- Heredia S., Tovar I., Castillo C., Collantes R., Salvador L. (2015). Programas de Vigilância Radiológica Ambiental - Resultados 2014. Colección Informes Técnicos, 47.2015. Referencia INT-04.37, Consejo de Seguridad Nuclear, Depósito legal: M-36774-2015.
- Heredia S., Vivas P., Tovar I., Gómez A., Castillo C., Collantes R., Salvador L. (2017). Programas de Vigilância Radiológica Ambiental - Resultados 2015. Colección Informes Técnicos, 48.2017. Referencia INT-04.38, Consejo de Seguridad Nuclear, Depósito legal: M-10458-2017.
- Hernandez F., Karlsson L., Hernandez-Armas J. (2007). Impact of the tropical storm Delta on the gross alpha, gross beta,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activities measured in atmospheric aerosol and water samples collected in Tenerife (Canary Islands). *Atmospheric Environment*, 41, 4940-4948.
- ICRP 119 (2012). Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. Vol 41 supplement 1, ISBN 978-1-4557-5430-4.
- ISO 5667-5 (1996). Water Quality-Sampling, Part 5- Guidance on Sampling of Drinking Water Used for Food and Beverage Processing, setembro 1996.
- ISO 13164-4 (2015). Water quality - Radon-222 - Part 4: Test method using two-phase liquid scintillation counting, junho 2015.
- ISO 9696 (2017). Water quality - Gross alpha activity - Test method using thick source, outubro 2017.
- ISO 9697 (2018). Water quality - Gross beta activity - Test method using thick source, novembro 2018.
- ISO 11704 (2018). Water quality - Gross alpha and gross beta activity - Test method using liquid scintillation counting, novembro 2018.
- ISO 9698 (2019). Water Quality - Tritium - Test method using liquid scintillation counting, maio 2019.
- Leppänen A-P, Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Paatero J. (2012). Cosmogenic  $^7\text{Be}$  and  $^{22}\text{Na}$  in Finland: Production, observed periodicities and the connection to climatic phenomena, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 74, 164-180.
- Lopes I., Madruga M.J. (2009a). Application of Liquid Scintillation Counting Technique to Determine  $^{90}\text{Sr}$  in Milk Samples. In: Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, J. Eikenberg, M. Jaggi, H Beer, H Baehrle (Ed) pp 331-337, Radiocarbon, The University of Arizona, USA.

- Lopes I., Madruga M.J. (2009b). Measurements of Strontium-90 in Portuguese Milk Samples Using Liquid Scintillation Counting Technique. *Radioprotection*, Vol 44, nº5, 217-220.
- Lopes I., Madruga M.J., Mourato A., Abrantes J., Reis M. (2010). Determination of  $^{90}\text{Sr}$  in Portuguese Foodstuffs. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 286: 335-340.
- Madruga M.J., Carvalho F.P, Reis M., Pinhão N., Alves, J.H., Sequeira M.M., Ferrador G., Gameiro M.A., Oliveira J.M, Libânio A., Pereira M. A., Silva, G., Lopes I., Abrantes J., Silva L., Machado L., Gomes A.R., Lemos A.S., Oliveira E., Rodrigues F., Carvalhal G., Fonseca H., Novais L. (2006). Vigilância Radiológica a Nível Nacional (Ano 2005). Relatório DPRSN, Série A, nº30/2006, ISBN 972-8660-31-6. Depósito Legal 194022/03.
- Madruga M.J., Sequeira M.M., Lopes I., Gomes A.R., Rodrigues F. (2007a). Radiocésio, Radioestrôncio e Trítio em Águas de Superfície nos Rios Tejo e Zêzere. In: Um Futuro Sustentável, Ambiente, Sociedade e Desenvolvimento, Editores C. Borrego et al, Vol.2, 624-630, ISBN 978-972-789-230-3.
- Madruga M.J., Lemos S., Machado L. (2007b). Determinação de Atividade de Estrôncio-90 em Leites. Avaliação da Dose de Radiação para a População Portuguesa. In: Um Futuro Sustentável, Ambiente, Sociedade e Desenvolvimento, Editores C. Borrego et al, Vol.1, 141-147, ISBN 978-972-789-230-3.
- Madruga M.J., Carvalho F.P, Reis M., Pinhão N., Alves, J.H., Corisco J., Trindade R., Oliveira J.M, Libânio A., Mourato A., Silva G., Portugal L., Lopes I., Abrantes J., Silva L., Torres L., Malta M., Gomes A.R., Carvalhal G., Fonseca H., Melo J., Pereira M., Batista A. (2008). Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2007). Relatório DPRSN, Série A, nº32/2008, ISBN 978-972-8660-33-8. Depósito Legal 194022/03.
- Madruga M.J., Sequeira M.M., Silva L., Lopes I., Gomes A.R., Rodrigues F. (2009a). Radiological Survey in Tejo River (Portugal). *Radioprotection*, Vol 44, nº5, 171-176.
- Madruga M.J., Sequeira M.M., Gomes A.R. (2009b). Determination of Tritium in Waters by Liquid Scintillation Counting. In: Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, J. Eikenberg, M. Jaggi, H Beer, H Baehrle (Ed) pp 353-359, *Radiocarbon*, The University of Arizona, USA.
- Madruga M.J., Gomes A.R., Silva L., Abrantes J., Pinhão N. (2009c). Estimate of Effective Dose to Portuguese Population from Artificial Radionuclides in Foodchain Products. *Radioprotecção* Vol II, Nº 14-15, 44-53.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Trindade R., Pinhão N., Oliveira J.M., Libânio A., Mourato A., Silva G., Portugal L., Lopes I., Silva L., Abrantes J., Torres L., Malta M., Gomes A.R., Carvalhal G., Fonseca H., Melo J., Pereira M., Batista A. (2009d) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2008). *Internal Report* DPRSN, Série A, nº33/2009, ISBN 978-989-96542-0-4, Depósito Legal 194022/03, pp. 143.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Trindade R., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Torres L., Portugal L., Malta M., Libânio A., Mourato A., Silva G., Santos L., Batista A., Gomes A.R., Carvalhal G., Fonseca H., Melo J., Pereira M. (2010) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2009). *Internal Report* UPSR, Série A, nº37/2010, ISBN 978-989-96542-5-9, Depósito Legal 194022/03, pp. 146.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Trindade R., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Libânio A., Mourato A., Silva G., Santos L., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Carvalhal G., Melo J., Pereira M. (2011) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2010). *Internal Report* UPSR, Série A, nº38/2011, ISBN 978-989-96542-6-6, Depósito Legal 194022/03, pp. 135.

- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Carvalhal G., Melo J., Pereira M. (2013) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2011). *Internal Report LPSR, Série A, nº39/2013*, ISBN 978-989-96542-7-3, Depósito Legal 194022/03, pp. 137.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Carvalhal G., Pereira M. (2014) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2012). *Internal Report LPSR, Série A, nº40/2014*, ISBN 978-989-96542-8-0, pp. 137.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Carvalhal G., Pereira M. (2015) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2013). *Internal Report LPSR, Série A, nº41/2015*, ISBN 978-989-96542-9-7, pp. 135.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Santos M., Pereira M., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Gomes A.R., Andrade E. (2016) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2014). *Internal Report LPSR, Série A, nº42/2016*, ISBN 978-989-20-6528-1, pp. 149.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Andrade E., Pereira J. (2017) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2015). *Internal Report LPSR, Série A, nº43/2017*, ISBN 978-989-99833-0-4, pp. 144.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Lopes I., Pereira J., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G. (2018a) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2016). *Internal Report LPSR, Série A, nº44/2018*, ISBN 978-989-99833-1-1, pp. 150.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Pereira J., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G. (2018b) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2017). *Internal Report LPSR, Série A, nº45/2018*, ISBN 978-989-99833-2-8, pp. 132.
- Madruga M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Pereira J., Abrantes J., Oliveira J.M., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G. (2020a) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2018). *Internal Report LPSR, Série A, nº47/2020*, ISBN 978-989-99833-4-2, pp. 126.
- Madruga M.J., Gomes A.R., Abrantes J., Libânio A., Reis M. (2020b). Assessment of tritium distribution in rain, surface and drinking water in Portugal during 2006–2017 period. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 324, 149–158. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07049-0>.
- Madruga M.J., Gomes A.R., Abrantes J., Santos M., Andrade E., Mourato A., Libânio A., Reis M. (2020c). Internal effective dose assessment for the public based on the environmental radioactivity data in Portugal. *Radiation Physics and Chemistry* Vol 168, March 2020, 108558. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108558>.

- Marschner H (1995). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 889 pp.
- NRA\_PT\_01 (2017). Determinação da concentração de atividade alfa total e beta total em águas não salinas. Método por fonte concentrada. Publicação interna IST/LPSR.
- NRA\_PT\_02 (2017). Determinação da concentração de atividade alfa total e beta total em águas não salinas. Método por cintilação em meio líquido. Publicação interna IST/LPSR.
- NRA\_PT\_03 (2017). Determinação da concentração de atividade de trítio em águas. Método por cintilação em meio líquido. Publicação interna IST/LPSR.
- NRA\_PT\_09 (2017). Determinação da concentração de atividade de  $^{222}\text{Rn}$  em águas Método de extração líquido-líquido (2 fases) e medição por detetor de cintilação em meio líquido. Publicação interna IST/LPSR.
- NRA\_PT\_11 (2017). Determinação da atividade de uma amostra por espectrometria gama com detetores HPGe. Publicação interna IST/LPSR.
- Pan J., Yang Y., Zhang G., Shi J., Zhu X., Li Y., Yu H. (2011). Simultaneous observation of seasonal variations of beryllium-7 and typical POPs in near-surface atmospheric aerosols in Guangzhou, China. *Atmospheric Environment* 45, 3371-3380.
- Pereira M.F., J. Pereira, S. Rangel, M. Saraiva, L.M. Santos, J.V. Cardoso, J.G. Alves (2016). Environmental monitoring with passive detectors at CTN in Portugal. *Radiat. Prot. Dosim.* 170 (1-4), 342-345 doi:10.1093/rpd/ncv479.
- RIFE-20 (2015). Radioactivity in Food and the Environment, 2014. Environment Agency, Food Standards Agency, Food Standards Scotland, Natural Resources, Northern Ireland Environment Agency, ISSN 1365-6414, 2015.
- RIFE-21 (2016). Radioactivity in Food and the Environment, 2015. Environment Agency, Food Standards Agency, Food Standards Scotland, Natural Resources, Northern Ireland Environment Agency, ISSN 1365-6414, 2016.
- RIFE-22 (2017). Radioactivity in Food and the Environment, 2016. Environment Agency, Food Standards Agency, Food Standards Scotland, Natural Resources Wales, Northern Ireland Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency, ISSN 1365-6414, 2017.
- RIFE-23 (2018). Radioactivity in Food and the Environment, 2017. Environment Agency, Food Standards Agency, Food Standards Scotland, Natural Resources Wales, Northern Ireland Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency, ISSN 1365-6414, 2018.
- RIFE-24 (2019). Radioactivity in Food and the Environment, 2018. Environment Agency, Food Standards Agency, Food Standards Scotland, Natural Resources Wales, Northern Ireland Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency, ISSN 1365-6414, 2019.
- RIFE-25 (2020). Radioactivity in Food and the Environment, 2019. Environment Agency, Food Standards Agency, Food Standards Scotland, Natural Resources Wales, Northern Ireland Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency, ISSN 1365-6414, 2020.
- Rodrigues F., Gomes A. R., Sequeira, M. M., Madruga M.J., Machado L. (2007). Medidas de Atividade Beta total e Beta Residual nos Rios Tejo e Zêzere (2001 a 2005). In: Um Futuro Sustentável, Ambiente, Sociedade e Desenvolvimento, Editores C. Borrego et al, Vol.4, 1516-1521, ISBN 978-972-789-230-3.
- Rodriguez-Navarro A (2000). Potassium transport in fungi and plants. *Biochim. Biophys. Acta*, 1469: 1-3



- STUK-B 190 (2015). Surveillance of Environmental Radiation in Finland, Annual Report 2014, P. Vesterbacka ed. ISBN 978-952-309-267-9 (pdf).
- STUK-B 204 (2016). Surveillance of Environmental Radiation in Finland, Annual Report 2015, P. Vesterbacka ed. ISBN 978-952-309-328-7 (pdf).
- STUK-B 215 (2017). Surveillance of Environmental Radiation in Finland, Annual Report 2016, P. Vesterbacka ed. ISBN 978-952-309-379-9 (pdf).
- STUK-B 226 (2018). Surveillance of Environmental Radiation in Finland, Annual Report 2017, P. Vesterbacka ed. ISBN 978-952-309-423-9 (pdf).
- STUK-B 236 (2019). Environmental Radiation Monitoring in Finland. Annual Report 2018. Mattila Aleks, Inkinen Samu (eds.). ISBN 978-952-309-434-5 (pdf).
- STUK-B 249 (2020). Environmental Radiation Monitoring in Finland. Annual Report 2019. Mattila Aleks, Inkinen Samu (eds.). ISBN ISBN 978-952-309-461-1 (pdf).
- Taiz L e Zeiger E (1998). Plant Physiology. Sinauer Associates, 792 pp.
- Vallés I., Camacho A., Ortega X., Serrano I., Blázquez S., Pérez S. (2009). Natural and anthropogenic radionuclides in airborne particulate samples collected in Barcelona (Spain), *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 102-107.
- Vivas P., Heredia S., Gómez A., Fernández B., Ruiz J., Castillo C., González M.J. (2019). Programas de Vigilância Radiológica Ambiental - Resultados 2017. Colección Informes Técnicos, 50.2019. Referencia INT-04.40, Consejo de Seguridad Nuclear, Depósito legal: M-41809-2018.
- Vivas P., Heredia S., Gómez A., Fernández B., Ruiz J., Castillo C., González M.J. (2020). Programas de Vigilância Radiológica Ambiental - Resultados 2018. Colección Informes Técnicos, 52.2020. Referencia INT-04.42, Consejo de Seguridad Nuclear, Depósito legal: M-40291-2019.
- WHO (2011). Guidelines for Drinking Water Quality, chapter 9: Radiological Aspects. 4<sup>th</sup> edition, ISBN 978-924-154-815-1.



## **II. PROGRAMA ESPECÍFICO PARA O CAMPUS TECNOLÓGICO E NUCLEAR (SACAVÉM)**

### ***Investigadores***

Mário Reis  
Maria José Madruga  
João Alves

### ***Técnicos Superiores***

Alfredo Baptista  
Ana Rita Gomes  
Eva Andrade  
Joana Pereira  
Marta Santos  
Miguel Pereira  
Pedro Pereira  
Sérgio Dias

### ***Técnicos***

Albertina Libânio  
Anabela Mourato  
Gabriel Silva



## II.1. INTRODUÇÃO

O Programa de Monitorização Radiológica Ambiental específico para o Campus Tecnológico e Nuclear (CTN) tem como principais objetivos: avaliar os níveis de radioatividade no ambiente exterior do *campus* do CTN, bem como a sua tendência de variação e deteção de eventuais alterações; verificar que são respeitados os limites de descarga estabelecidos e permitir a intervenção atempada caso ocorram condições não planeadas; contribuir para a obtenção de dados que permitam avaliar a exposição de membros do público e trabalhadores; estabelecer um suporte e organização de dados que facilite a informação ao público e entidades competentes.

O programa baseia-se na monitorização ambiental da radiação externa, através da avaliação da dose gama ambiental recorrendo a medições em contínuo e medições integradas, na monitorização da radioatividade atmosférica, através da amostragem e análise de aerossóis e na monitorização da transferência de radionuclídeos por deposição, através da análise de amostras de água da chuva e da análise de amostras da camada superficial do solo. Procura-se, ainda, avaliar as descargas (líquidas e gasosas) para o ambiente, através de monitorização na fonte. Os locais e tipo de amostragem são apresentados nas Figuras II.1 e II.2.

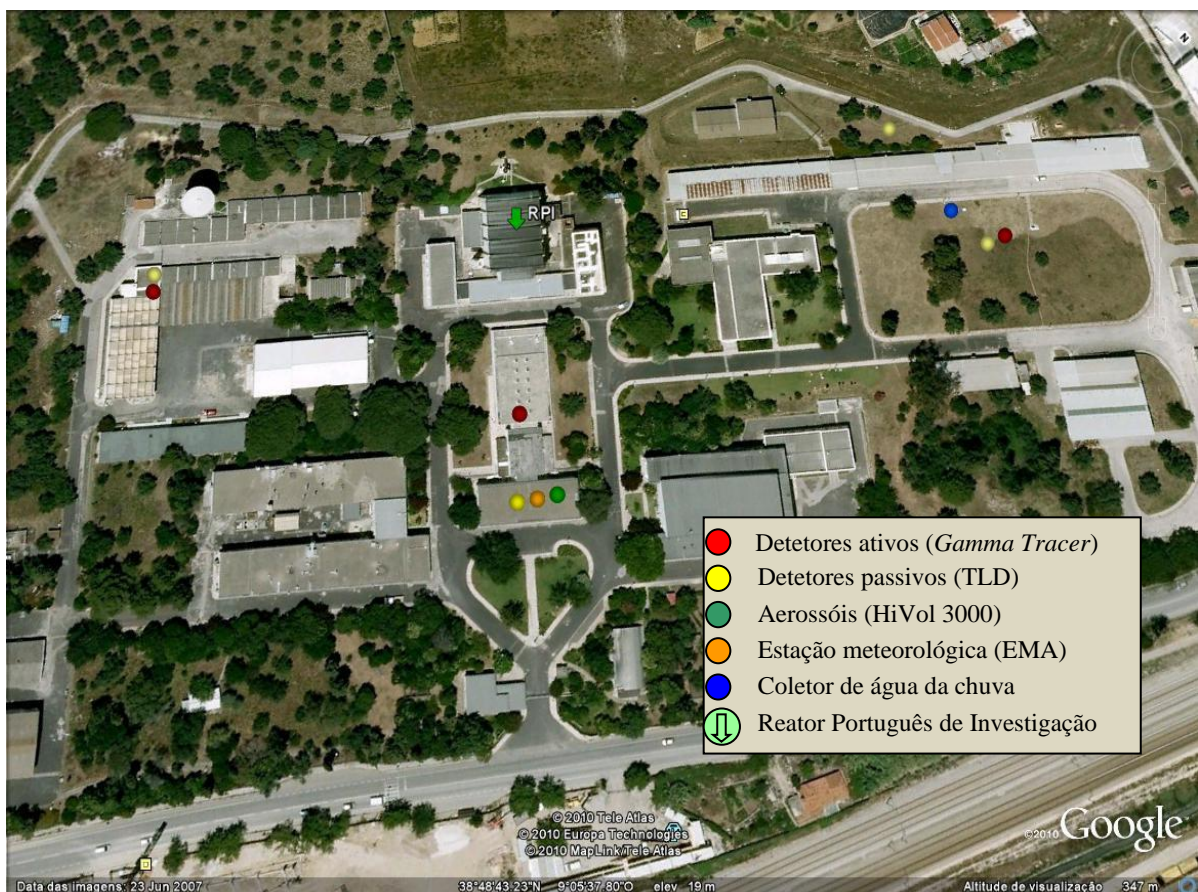


Fig. II.1 – Vista geral do CTN, indicando a localização dos pontos de amostragem



**Fig. II.2 – Vista da área envolvente ao CTN, incluindo a localização dos pontos de amostragem de solos (no exterior e no interior do *campus*).**



## **II.2. RADIOATIVIDADE NA ATMOSFERA**

### **II.2.1 Aerossóis**

#### ***II.2.1.1. Material e Métodos***

Os procedimentos relativos à amostragem e métodos analíticos utilizados para a determinação de radionuclídeos em amostras de aerossol encontram-se descritos no Capítulo I.

#### ***II.2.1.2. Resultados e Discussão***

Os valores da concentração média mensal para os radionuclídeos detetados em partículas de aerossol são apresentados na Tabela I.1 do Capítulo I. Durante o ano de 2019 não se detetaram quaisquer radionuclídeos antropogénicos em partículas de aerossol não havendo, por isso, qualquer indicação de possíveis contaminações por via atmosférica provenientes de instalações situadas no *campus* do CTN.

### **II.2.2. Deposição Atmosférica**

#### ***II.2.2.1. Material e Métodos***

Os procedimentos relativos à amostragem e métodos analíticos utilizados para a determinação de radionuclídeos em água da chuva encontram-se descritos no Capítulo I.

#### ***II.2.2.2. Resultados e Discussão***

Os valores de concentração de atividade,  $A$ , dos diferentes radionuclídeos analisados em amostras de água da chuva recolhidas em Sacavém (*campus* do CTN), os respetivos fluxos mensais de deposição atmosférica e a sua evolução ao longo do ano de 2019 em função da precipitação acumulada mensalmente são apresentados, respetivamente, nas Tabelas I.2 e I.4 e na Figura I.7 do Capítulo I. Os valores de precipitação foram obtidos através de uma estação meteorológica (EMA), instalada no telhado do edifício da Administração.

Os valores de concentração de atividade em radionuclídeos naturais e artificiais medidos em amostras de água da chuva colhidas no *campus* do CTN foram baixos ao longo de todo o ano e inferiores aos observados em 2018. A precipitação acumulada ao longo de 2019 (482 mm) foi muito inferior à precipitação acumulada no ano anterior (773 mm).

No caso do  $^{137}\text{Cs}$  e do  $^{90}\text{Sr}$ , radionuclídeos antropogénicos, os valores foram, ao longo de todo o ano, inferiores à atividade mínima detetável. Os fluxos de deposição anuais obtidos para a atividade alfa total e atividade beta total ( $8 \text{ Bq m}^{-2}$  e  $14 \text{ Bq m}^{-2}$ , respetivamente) são idênticos aos registados em 2018, sendo da mesma ordem de grandeza relativamente aos reportados por outros autores (Dueñas *et al.*, 2009).

## II.3. RADIOATIVIDADE EM SOLOS

### II.3.1 Material e Métodos

No âmbito do programa de monitorização específico do CTN, foram efetuadas colheitas mensais de amostras da camada superficial do solo em dois pontos distintos: no interior do perímetro do *campus*, em frente ao edifício da Química (Figura II.1) e no exterior do *campus*, nas instalações da Petrogal (Figura II.2).

Os procedimentos relativos à amostragem e aos métodos analíticos utilizados encontram-se descritos no Capítulo I.

### II.3.2. Resultados e Discussão

Na Tabela II.1 apresentam-se os valores de concentração de atividade (em Bq kg<sup>-1</sup>) de emissores gama naturais e artificiais detetados em amostras de solos colhidas em frente ao edifício da Química, no *campus* do CTN.

Como se pode observar na Tabela II.1, os valores de concentração de atividade em <sup>137</sup>Cs variaram entre <1,2 Bq kg<sup>-1</sup> e 7,60±0,74 Bq kg<sup>-1</sup>, correspondendo a valores vestigiais, da mesma ordem de grandeza dos obtidos em amostras de solos de diferentes regiões do país (Capítulo I) e não apresentando alterações significativas relativamente à gama de valores reportados no ano anterior (2,81±0,38 Bq kg<sup>-1</sup> e 7,85±0,68 Bq kg<sup>-1</sup>).

À semelhança do ocorrido em 2018, os valores de atividade específica em <sup>131</sup>I situaram-se, ao longo de todo o ano de 2019, abaixo da atividade mínima detetável.

Na Tabela II.2, onde se apresentam os resultados obtidos para as amostras recolhidas nas instalações da Petrogal (fora do perímetro do CTN), verifica-se que os valores de concentração de atividade em <sup>137</sup>Cs para o ano de 2019 foram sempre inferiores à atividade mínima detetável. O mesmo se verificou para os valores de concentração de atividade em <sup>131</sup>I, não se tendo observado nenhum valor superior à atividade mínima detetável.

Estes resultados não evidenciam qualquer indício de contaminação com origem em instalações existentes no campus do CTN.



**Tabela II.1 – Valores de concentração de atividade,  $A \pm 2\sigma$  (Bq kg<sup>-1</sup>), de emissores gama naturais e artificiais em solos do *campus* do CTN (recolhidos em frente ao edifício de Química)**

Data de colheita	<sup>235</sup> U	<sup>228</sup> Ra	<sup>226</sup> Ra	<sup>137</sup> Cs	<sup>131</sup> I	<sup>40</sup> K	<sup>7</sup> Be
<b>Janeiro</b>	7,1±3,9	34,7±3,8	32,8±3,2	4,34±0,74	<0,93 (a)	359±29	<4,5 (a)
<b>Fevereiro</b>	<4,8 (a)	51,7±4,9	40,4±3,5	5,65±0,79	<0,82 (a)	507±37	<6,2 (a)
<b>Março</b>	6,7±3,5	52,7±5,0	43,9±3,8	5,30±0,71	<0,72 (a)	573±42	<5,0 (a)
<b>Abril</b>	<4,4 (a)	48,9±4,6	38,6±3,4	5,60±0,61	<0,73 (a)	509±37	<3,3 (a)
<b>Mai</b>	6,2±3,1	48,8±4,7	35,6±3,2	6,19±0,85	<0,89 (a)	544±40	<5,7 (a)
<b>Junho</b>	6,3±3,2	45,6±4,5	36,8±3,4	5,32±0,53	<0,61 (a)	555±40	<5,6 (a)
<b>Julho</b>	<4,4 (a)	49,8±4,7	39,2±3,4	4,14±0,71	<0,76 (a)	559±41	<5,6 (a)
<b>Agosto</b>	<6,3 (a)	54,6±5,2	52,9±4,4	5,44±0,65	<0,83 (a)	557±42	<5,1 (a)
<b>Setembro</b>	<7,4 (a)	51,9±4,9	44,3±3,9	4,46±0,78	<0,61 (a)	560±41	<6,4 (a)
<b>Outubro</b>	<6,4 (a)	58,8±5,4	40,9±3,5	6,54±0,80	<0,71 (a)	563±41	<4,1 (a)
<b>Novembro</b>	5,1±3,1	63,7±5,9	59,8±4,8	7,60±0,74	<1,0 (a)	669±48	<6,8 (a)
<b>Dezembro</b>	<4,7 (a)	41,4±4,1	30,0±2,8	<1,2 (a)	<0,74 (a)	578±44	<6,2 (a)
<b>Média ± σ (n=12)</b>	<b>&lt;5,8</b>	<b>50,2±7,6</b>	<b>41,3±8,3</b>	<b>&lt;5,1</b>	<b>&lt; 0,78</b>	<b>544±71</b>	<b>&lt;5,4</b>

Atividade mínima detetável (a);

Tabela II.2 – Valores de concentração de atividade,  $A \pm 2\sigma$  (Bq kg<sup>-1</sup>), de emissores gama naturais e artificiais em solos do *campus* da Petrogal

Data de colheita	<sup>235</sup> U	<sup>228</sup> Ra	<sup>226</sup> Ra	<sup>137</sup> Cs	<sup>131</sup> I	<sup>40</sup> K	<sup>7</sup> Be
<b>Janeiro</b>	<4,3 (a)	41,4±4,0	27,4±2,6	<0,54 (a)	<0,82 (a)	608±43	<3,8 (a)
<b>Fevereiro</b>	<3,7 (a)	37,8±3,8	26,5±2,5	<0,68 (a)	<0,68 (a)	656±47	<5,2 (a)
<b>Março</b>	<5,4 (a)	39,1±3,8	26,4±2,5	<1,0 (a)	<0,70 (a)	583±42	<5,1 (a)
<b>Abril</b>	<3,9 (a)	27,7±3,0	24,3±2,4	<0,62 (a)	<0,92 (a)	637±46	<4,6 (a)
<b>Mai</b>	<5,1 (a)	41,4±3,9	28,1±2,5	<0,52 (a)	<0,76 (a)	577±41	11,9±3,8
<b>Junho</b>	<4,4 (a)	41,0±3,9	28,9±2,7	<0,88 (a)	<0,59 (a)	597±43	6,9±3,7
<b>Julho</b>	<4,6 (a)	42,4±4,1	30,5±2,8	<0,64 (a)	<0,83 (a)	682±48	<4,7 (a)
<b>Agosto</b>	<3,8 (a)	39,0±3,8	26,4±2,4	<0,66 (a)	<0,62 (a)	577±42	<4,0 (a)
<b>Setembro</b>	<4,3 (a)	41,9±3,9	28,9±2,6	<0,55 (a)	<0,54 (a)	588±41	<5,1 (a)
<b>Outubro</b>	<4,9 (a)	40,0±3,9	27,1±2,6	<0,63 (a)	<0,76 (a)	612±44	<6,0 (a)
<b>Novembro</b>	<5,8 (a)	21,6±2,7	36,4±3,3	<0,81 (a)	<0,85 (a)	645±47	<5,0 (a)
<b>Dezembro</b>	<4,4 (a)	32,0±3,4	25,0±2,5	<0,64 (a)	<0,49 (a)	468±35	<4,7 (a)
<b>Média ± σ (n=12)</b>	<b>&lt;4,6</b>	<b>37,1±6,6</b>	<b>28,0±3,2</b>	<b>&lt;0,68</b>	<b>&lt;0,71</b>	<b>603±54</b>	<b>&lt;5,6</b>

Atividade mínima detetável (a)

## II.4. DOSE DE RADIAÇÃO GAMA AMBIENTAL

### II.4.1. Detetores Ativos

#### II.4.1.1. Material e Métodos

O controlo contínuo da radiação gama ambiental, no interior do perímetro do CTN, é efetuado através de um sistema *Shortlink* composto por três sondas *GammaTracer-XL* (instaladas em outubro de 2004) e por uma central de controlo. As sondas foram instaladas tendo em consideração a direção preferencial do vento relativamente à localização do Reator Português de Investigação (RPI). Uma vez que os ventos predominantes sopram de Nordeste, as sondas estão localizadas a Sul (Biblioteca), Este (LPSR) e Oeste (Oficinas) do RPI, abrangendo, desta forma, a maior área possível (ver Figura II.1).

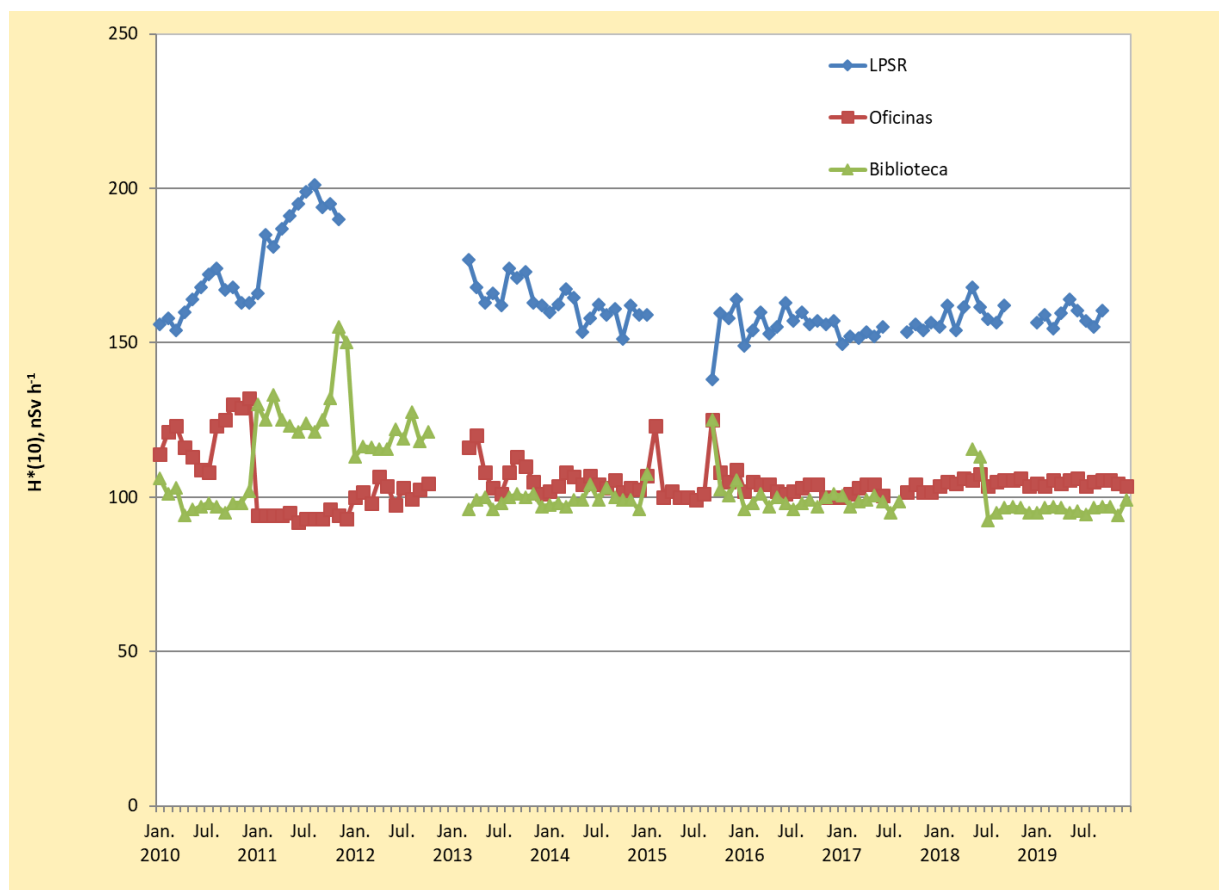
As sondas *GammaTracer-XL* estão equipadas com um sistema de comunicação via rádio (433,5 MHz) que permite o envio de dados para a central em ciclos de tempo ajustáveis. Possuem, ainda, uma memória interna que possibilita o armazenamento de dados, permitindo salvar a informação caso ocorram falhas na comunicação via rádio. O sistema *Shortlink* é baseado no princípio de rádio unidirecional, ou seja, a sonda envia informação para a central sem receber qualquer tipo de confirmação, o que permite prolongar a vida das baterias. A distância máxima para a transmissão de dados é de 5 km. Para a programação e manutenção das sondas é utilizado um servidor de rede portátil, *DataGATE*, com uma porta de infravermelhos que estabelece a interface com um PC (Madureira & Portugal, 2006).

Cada sonda é constituída por dois detetores de radiação Geiger-Müller, cada um deles com um canal independente, tendo uma maior sensibilidade para baixas doses e outra maior sensibilidade para altas doses, funcionando em simultâneo para doses intermédias. As sondas são sensíveis para uma gama de energias entre 45 e 2000 keV e para débitos de dose ambiente na gama dos 10 nSv h<sup>-1</sup> aos 10 Sv h<sup>-1</sup>. Os valores de débito de dose e parâmetros relacionados são registados minuto a minuto. Para prolongar a vida das baterias, as sondas encontram-se configuradas para, em situação normal, enviar dados para a central a cada 60 minutos. O primeiro nível de alarme encontra-se atualmente definido para os 300 nSv h<sup>-1</sup>, diminuindo a periodicidade de envio dos dados para cada 10 minutos. O segundo nível de alarme está definido para 1 µSv h<sup>-1</sup>, sendo o envio dos dados efetuado minuto a minuto (Madureira & Portugal, 2006).

#### II.4.1.2. Resultados e Discussão

O débito de equivalente de dose ambiente variou, durante o ano de 2019, entre 85 e 109 nSv h<sup>-1</sup> no ponto localizado no telhado do edifício da Biblioteca (Administração), entre 95 e 116 nSv h<sup>-1</sup> no ponto localizado junto às Oficinas e entre 144 e 173 nSv h<sup>-1</sup> no ponto

localizado junto ao LPSR (referido como PPR1 relativamente aos detetores passivos). Os valores médios anuais foram, respetivamente,  $96\pm 1$  nSv h<sup>-1</sup>,  $105\pm 1$  nSv h<sup>-1</sup> e  $159\pm 3$  nSv h<sup>-1</sup>. Na Figura II.3 apresenta-se a evolução dos valores médios mensais no período compreendido entre 2010 e 2019. Devido à avaria da sonda localizada no ponto de amostragem LPSR os valores neste ponto reportam-se só até ao mês de setembro de 2019.



**Figura II.3 – Variação dos valores médios mensais do débito de equivalente de dose ambiente nos locais de medição do CTN (valores expressos em nSv h<sup>-1</sup>)**

Pode-se observar através do gráfico que os valores médios do débito de equivalente de dose ambiente registados pelas sondas localizadas na Biblioteca e junto às Oficinas são mais próximos entre si (comparativamente aos valores registados junto ao LPSR). Por outro lado, os valores do débito de equivalente de dose ambiente no ponto localizado junto ao LPSR são significativamente superiores aos registados nos outros locais. A persistência na ocorrência de valores mais elevados neste ponto de medição deve-se ao facto de a sonda estar localizada na proximidade do pavilhão de armazenamento de resíduos radioativos de média e baixa atividade do CTN. Este facto é confirmado pelos resultados obtidos através de detetores passivos, concretamente os localizados na envolvente do Pavilhão de Resíduos (PRR1, PRR2, PRR3 e PRR4), cujo valor médio do débito de equivalente de dose ambiente variou entre  $155$  nSv h<sup>-1</sup> e  $192$  nSv h<sup>-1</sup>.

Em termos relativos, os resultados apresentados são consistentes com os obtidos através de detetores passivos (ver capítulo II.4.2, Tabela II.3), não indiciando a ocorrência de qualquer emissão acidental.

## II.4.2. Detetores Passivos

### II.4.2.1. Material e Métodos

Durante o ano de 2019 monitorizou-se a dose de radiação gama ambiental no CTN, em Sacavém, com detetores passivos termoluminescentes do mesmo tipo dos usados nas medidas realizadas no País (Madruga *et al.*, 2009 a 2020a). Monitorizam-se sete pontos de medida, designadamente, Administração, Oficinas, LMRI, PRR1, PRR2, PRR3 e PRR4. Os dosímetros foram colocados a um metro do plano de referência em suportes que não oferecem resistência ao vento, sendo que os dosímetros identificados como LMRI, PRR1, PRR2, PRR3 e PRR4 estão posicionados a um metro do solo e os dosímetros identificados como Administração e Oficinas encontram-se a um metro sobre os terraços dos respectivos edifícios.

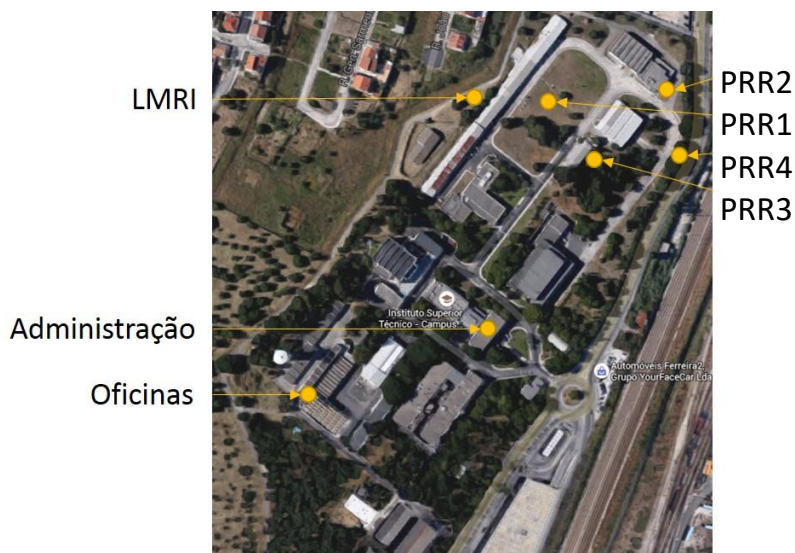


Figura II.4 – Localização dos pontos de medida, de acordo com a numeração indicada na Tabela II.3.



Figura II.5 – Dosímetros ambientais expostos no ponto de medida PRR1.

Em cada trimestre colocaram-se em cada ponto de medida dois conjuntos de dosímetros que permaneceram expostos durante intervalos de tempo correspondentes aos períodos de integração mínimo e máximo, variando de 90 até cerca de 172 dias, fazendo coincidir o último conjunto avaliado em cada trimestre com o último dosímetro devolvido pelas estações de monitorização espalhadas no País. Em média, durante cada trimestre do ano, realizaram-se duas avaliações em cada ponto de medida.

O dosímetro termoluminescente utilizado consiste no porta-dosímetro *Harshaw* 8855 contendo um cartão com dois detetores de TLD-100, calibrado em termos do equivalente de dose ambiente  $H^*(10)$  (Pereira *et al.*, 2016). Os dosímetros são lidos nos leitores semi-automáticos *Harshaw* 6600, sendo a eficiência de cada detetor corrigida através da aplicação do respetivo fator de correção individual, de acordo com metodologia anteriormente descrita (Alves *et al.*, 2004, 2006a, 2006b e 2006c). Para cada período de integração, em cada ponto de medida, colocaram-se dois grupos de seis dosímetros, agrupados em três conjuntos de dois, todos expostos durante o mesmo intervalo de tempo. O primeiro conjunto de dois dosímetros foi irradiado a uma dose de referência antes da colocação no ponto de medida; o segundo conjunto de dois dosímetros foi irradiado à mesma dose de referência depois do tempo de exposição; o terceiro conjunto de dosímetros não recebeu qualquer irradiação além da dose de radiação natural que se pretende avaliar. Findo o período de integração pretendido, os três conjuntos foram lidos simultaneamente. Com os conjuntos irradiados antes e depois do período de exposição no exterior pretende-se corrigir o *fading* (desvanecimento térmico) e/ou as alterações de sensibilidade induzidas pela temperatura ambiente e suportadas pelos dosímetros durante o tempo de integração (Alves *et al.*, 1999, Pereira *et al.*, 2016). Para cada ponto de medida, determinou-se o respetivo fator de correção de *fading*, que foi aplicado ao valor de dose avaliado com os dosímetros não irradiados (Pereira *et al.*, 2016b). Os dosímetros foram todos distribuídos pelos respetivos pontos de medida no dia em que foram preparados (*reset*) e foram todos processados (lidos) no mesmo dia em que foram removidos.

Os resultados que se apresentam neste relatório estão todos expressos em termos do débito de equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , em unidades de  $nSv.h^{-1}$ .

#### **II.4.2.2. Resultados e Discussão**

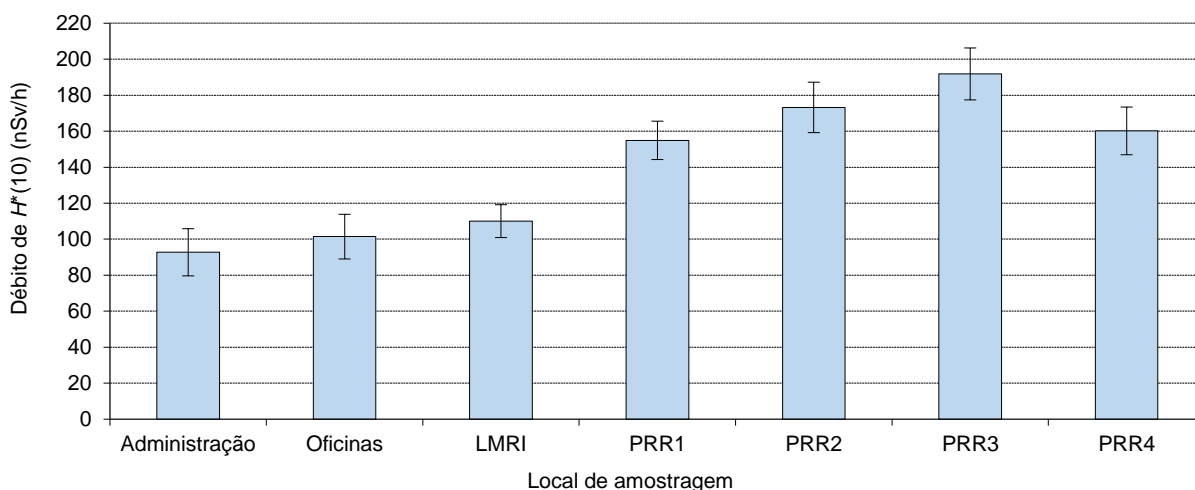
Na Tabela II.3 apresentam-se os valores médios do débito de equivalente de dose ambiente medido nos sete pontos localizados no CTN, calculados a partir das leituras realizadas nos quatro trimestres de 2019. A respetiva incerteza foi obtida a partir do desvio padrão dos valores medidos. Na mesma tabela apresentam-se também os valores médios anuais para 2019, calculados a partir dos valores trimestrais, bem como a respetiva incerteza,

determinada considerando todas as medidas efetuadas. Estes valores estão também representados na Figura II.6.

**Tabela II.3 – Valores médios do débito do equivalente de dose ambiente medido em cada ponto de medida no CTN em cada trimestre e respetivo valor médio anual (valores expressos em nSv.h<sup>-1</sup>).**

Ponto de medida	I	II	III	IV	Ano 2019
Administração	98±7	87±11	88±8	98±21	93±13
Oficinas	111±16	94±7	97±12	104±10	101±12
LMRI	120±7	104±9	105±7	111±6	110±9
PRR1	165±6	150±11	150±1	154±9	155±11
PRR2	174±13	177±8	157±8	185±5	173±14
PRR3	200±10	192±19	185±7	190±19	192±14
PRR4	162±12	166±7	147±7	166±18	160±13

Observa-se que os valores médios do débito de equivalente de dose ambiente medidos nos pontos Oficinas, Administração e LMRI são muito próximos entre si, e que os valores medidos nos pontos de medida PRR1, PRR2, PRR3 e PRR4 são sistematicamente mais elevados. Tal como sugerido nos relatórios de anos anteriores, estes últimos pontos de medida localizam-se próximos do pavilhão de armazenamento de resíduos radioativos de média e baixa atividade, e provavelmente, por esta razão os valores medidos são sistematicamente mais elevados do que os registados nos outros três pontos de medida.



**Figura II.6 – Valores médios anuais para 2019 do débito de equivalente de dose ambiente medido nos sete pontos de medida no CTN (valores expressos em nSv.h<sup>-1</sup>).**

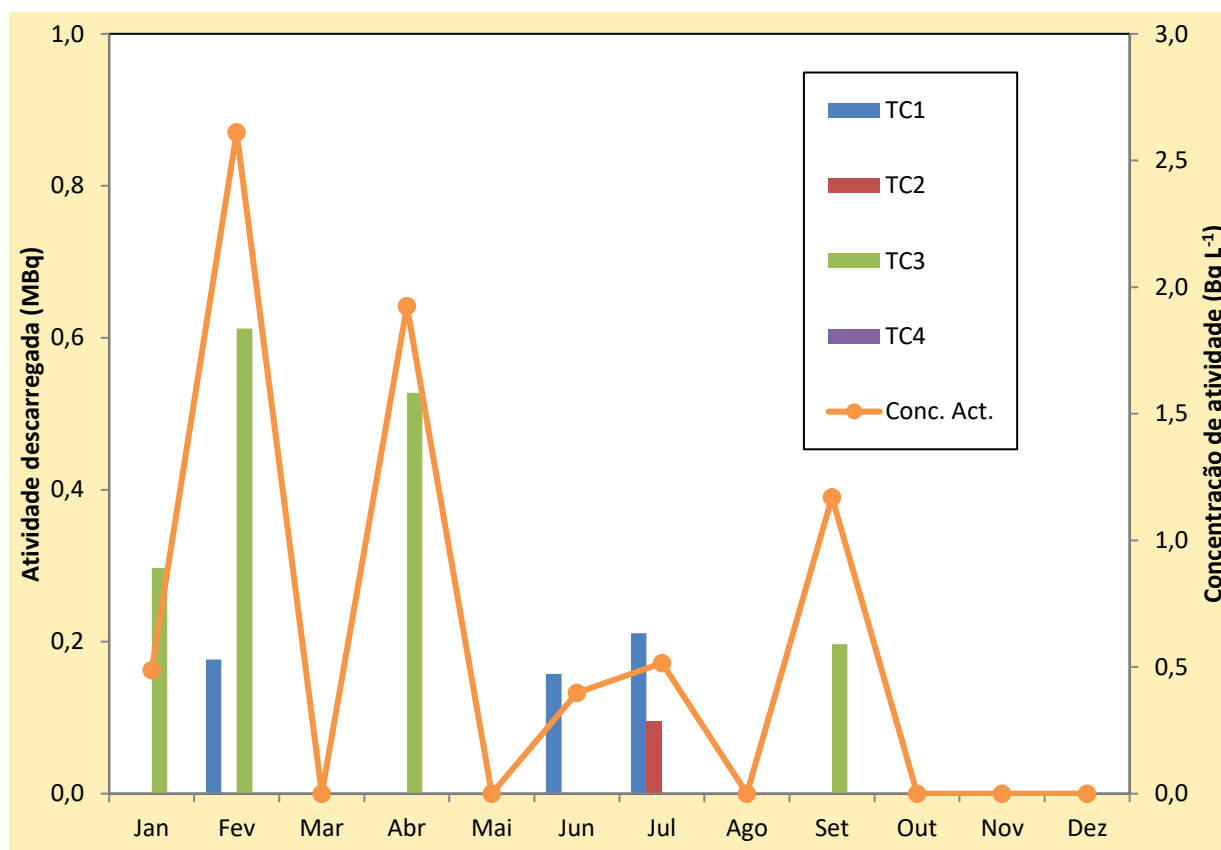
De uma maneira geral, observa-se que os valores trimestrais e o valor médio anual, registados em cada ponto de medida são semelhantes aos registados em anos anteriores (Madruga *et al.*, 2009 a 2020a). Os valores medidos e apresentados na Tabela II.3 são valores considerados normais, compatíveis com valores anteriormente publicados (Amaral, 1995).

## II.5. MONITORIZAÇÃO NA FONTE

### II.5.1. Descargas Líquidas

Durante o ano de 2019, o controlo dos níveis de radioatividade nos efluentes líquidos recebidos na Estação de Controlo de Descargas dos Efluentes Líquidos Radioativos (ECoDELiR) e descarregados para a ETAR foi efetuado através de amostragem discreta. As análises às amostras de efluentes foram realizadas no laboratório de medida do Núcleo Operacional de Proteção Radiológica (NOPR).

Na Figura II.7 são apresentadas as atividades totais descarregadas ao longo do ano, bem como a variação mensal da concentração de atividade total.



**Figura II.7 – Variação mensal da atividade descarregada por tanque durante o ano de 2019 e variação mensal da concentração de atividade total para o mesmo período.**

A atividade total descarregada ao longo do ano de 2019 foi 2,3 MBq, idêntica à atividade descarregada nos últimos dois anos (0,62 MBq em 2018, 2 MBq em 2017) e significativamente inferior à atividade total descarregada em anos anteriores (49 MBq em 2016 e 89 MBq em 2015). A maior contribuição para a atividade total descarregada proveio do tanque TC3 (1,6 MBq), não se tendo verificado qualquer descarga do tanque TC4. Como se pode observar através da Figura II.7, registaram-se descargas nos meses de janeiro, fevereiro, abril, junho, julho e setembro, com uma concentração de atividade máxima de 2,6 Bq L<sup>-1</sup> (em fevereiro), muito inferior ao limite de descarga em vigor no IST (740 Bq L<sup>-1</sup>). A diminuição



nos valores da atividade total descarregada em 2019, tendência já observada em 2018 e 2017, deve-se fundamentalmente à desativação do Reator Português de Investigação (RPI), que ocorreu durante o ano de 2016.

## II.6. CONCLUSÕES

Os resultados do Programa de Monitorização relativo ao ano de 2019 mostram que os níveis de radioatividade de origem antrópica no ambiente exterior do CTN são baixos. As concentrações de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  e  $^3\text{H}$  mantiveram-se, na maior parte dos casos, abaixo da atividade mínima detetável ou em níveis sem significado do ponto de vista da proteção radiológica.

A dose de radiação gama ambiental, monitorizada através de detetores passivos e detetores ativos (rede de deteção gama em contínuo), manteve-se ao longo de todo o ano em valores considerados normais, não indiciando a ocorrência de qualquer anomalia ou emissão acidental.

As concentrações de atividade nos efluentes líquidos descarregados para a ETAR, situaram-se, ao longo de todo o ano, muito abaixo do limite de descarga em vigor no IST.

## REFERÊNCIAS

- Alves J.G., Muñiz J.L., Gómez Ros J.M. and Delgado A., (1999). A comparative study on the thermal stability of LiF:Mg,Ti and LiF:Mg,Cu,P detectors for environmental monitoring. *Radiat. Prot. Dosim.*, 85, 253-257.
- Alves J.G., Abrantes J.N., Margo O., Rangel S., Santos L., (2004). Long-Term Stability of a TLD-Based Individual Monitoring System. *Radiation Protection Dosimetry*, 120, 1-4, 289-292.
- Alves J.G., Novais L., Rangel S. (2006a). Environmental gamma radiation monitoring at ITN. In *Actas do 10<sup>th</sup> International Symposium on Radiation Physics*, Coimbra (Portugal), Setembro 2006.
- Alves J.G., Novais L., Rangel S., Calado A. (2006b). Testes para a implementação da dosimetria ambiental com detectores termoluminescentes individuais. *Relatório Interno*, novembro 2006.
- Alves J.G., Novais L., Rangel S., Flores E. (2006c). Quality assurance and quality control programme in use at the individual monitoring service of ITN-DPRSN. In *Atas do 2<sup>nd</sup> European IRPA Congress*, Paris (França), maio 2006.
- Amaral E.M., (1995). Exposição à Radiação Gama Natural Terrestre – relação entre as doses de radiação e os radionuclídeos primordiais existentes no solo. Monografia apresentada para prestação de provas de acesso à categoria de Investigador Auxiliar.
- Dueñas C., Fernández M.C., Cañete S., Pérez Barea J.J., Pérez M., (2009). Effects of collector types in sampling of atmospheric depositional fluxes, *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, 198-202.
- Madruça M.J., Carvalho F.P, Reis M., Alves J., Corisco J., Trindade R., Pinhão N., Oliveira J.M, Libânio A., Mourato A., Silva G., Portugal L., Santos L., Lopes I., Silva L., Abrantes J., Torres L., Malta M., Gomes A.R., Carvalhal G., Fonseca H., Melo J., Pereira M., Batista A., (2009). Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2008). Relatório UPSR, Série A, nº33/09, ISBN 978-989-96542-0-4, Depósito Legal 194022/03.
- Madruça M.J., Carvalho F.P, Reis M., Alves J., Corisco J., Trindade R., Lopes I., Abrantes J., Silva L., Torres L., Portugal L., Malta M., Libânio A., Mourato A., Silva G., Oliveira J.M, Santos L., Batista A., Gomes A.R., Carvalhal G., Fonseca H., Melo J., Pereira M., (2010). Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2009). Relatório UPSR, Série A, nº37/10, ISBN 978-989-96542-5-9, Depósito Legal 194022/03.
- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Trindade R., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Libânio A., Mourato A., Silva G., Santos L., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Carvalhal G., Melo J., Pereira M. (2011) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2010). *Internal Report UPSR*, Série A, nº38/2011, ISBN 978-989-96542-6-6, Depósito Legal 194022/03, pp. 135.
- Madruça M.J., F.P. Carvalho, M. Reis, J. Alves, J.A. Corisco, I. Lopes, J. Abrantes, J.M. Oliveira, L. Silva, L. Portugal, M. Malta, Y. Romanets, A. Libânio, A. Mourato, G. Silva, A. Batista, A.R. Gomes, E. Andrade, G. Carvalhal, J. Melo, M. Pereira (2013). Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2011). *Internal Report LPSR*, Série A, nº39/13, ISBN 978-989-96542-7-3, Depósito Legal 194022/03, pp. 137.
- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Carvalhal G., Pereira M. (2014) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2012). *Internal Report LPSR*, Série A, nº40/2014, ISBN 978-989-96542-8-0, pp. 137.

- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Carvalhal G., Pereira M. (2015) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2013). *Internal Report LPSR, Série A, nº41/2015*, ISBN 978-989-96542-9-7, pp. 135.
- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Portugal L., Malta M., Santos M., Pereira M., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Gomes A.R., Andrade E. (2016) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2014). *Internal Report LPSR, Série A, nº42/2016*, ISBN 978-989-20-6528-1, pp. 149.
- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Lopes I., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G., Andrade E., Pereira J. (2017) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2015). *Internal Report LPSR, Série A, nº43/2017*, ISBN 978-989-99833-0-4, pp. 144.
- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Lopes I., Pereira J., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G. (2018a) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2016). *Internal Report LPSR, Série A, nº44/2018*, ISBN 978-989-99833-1-1, pp. 150.
- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Pereira J., Abrantes J., Oliveira J.M., Silva L., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G. (2018b) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2017). *Internal Report LPSR, Série A, nº45/2018*, ISBN 978-989-99833-2-8, pp. 132.
- Madruça M.J., Carvalho F.P., Reis M., Alves J., Corisco J.A., Batista A., Gomes A.R., Andrade E., Pereira J., Abrantes J., Oliveira J.M., Malta M., Santos M., Pereira M., Pereira P., Romanets Y., Libânio A., Mourato A., Silva G. (2020a) Programas de Monitorização Radiológica Ambiental (Ano 2018). *Internal Report LPSR, Série A, nº47/2020*, ISBN 978-989-99833-4-2, pp. 126.
- Madureira L., Portugal L., (2006). Rede de Detecção de Radiação Gama Ambiente no ITN, Trabalho apresentado no âmbito do Mestrado em Engenharia Física Tecnológica – Segurança e Proteção Radiológica, IST.
- Pereira M.F., J. Pereira, S. Rangel, M. Saraiva, L.M. Santos, J.V. Cardoso, J.G. Alves, (2016a) Environmental monitoring with passive detectors at CTN in Portugal. *Radiat. Prot. Dosim.* 170 (1-4), 342-345, doi:10.1093/rpd/ncv479.
- Pereira J., M.F. Pereira, S. Rangel, M. Saraiva, J.G. Alves. (2016) *Fading effect of LiF:Mg,Ti and LiF:Mg,Cu,P for Ext-Rad and wholebody detectors*. *Radiat. Prot. Dosim.* 170 (1-4), 177-180.

## ANEXO I. GARANTIA DA QUALIDADE ANALÍTICA E RESULTADOS

Um dos principais objetivos do Laboratório de Proteção e Segurança Radiológica (LPSR) é a garantia de qualidade dos resultados emitidos, o que tem vindo a ser conseguido com a manutenção de um sistema de Gestão de Qualidade que inclui o cumprimento de vários requisitos, nomeadamente a validação e a acreditação das técnicas radioanalíticas, a participação em ensaios de intercomparação laboratorial externos, etc.

Algumas das técnicas radioanalíticas em uso no referido laboratório nomeadamente, as aplicadas a águas de consumo, de nascente, minerais e naturais doces (*medição alfa total e beta total por fonte concentrada; medição alfa total e beta total por cintilação em meio líquido; determinação da concentração de atividade em trítio,  $^3\text{H}$ ; determinação da concentração de atividade de radão,  $^{222}\text{Rn}$ , pelo método de extração líquido-líquido, 2 fases, e medição por detetor de cintilação em meio líquido*) e a matrizes sólidas e líquidas (*determinação da concentração de radionuclídeos emissores gama por espectrometria gama de alta resolução*) entre outras, estão acreditadas pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC), de acordo com a NP EN ISO/IEC 17025:2018. O Certificado de Acreditação (nº L0620) está disponível para consulta em [http://www.ipac.pt/pesquisa/ficha\\_lae.asp?id=L0620](http://www.ipac.pt/pesquisa/ficha_lae.asp?id=L0620).

O LPSR procede anualmente à avaliação externa da qualidade dos resultados das análises participando em exercícios de intercomparação para a determinação da concentração de radionuclídeos artificiais e naturais em amostras ambientais (aerossóis, águas, solos, leite, etc.). Estes exercícios são organizados por entidades internacionais, tais como: Agência Internacional de Energia Atómica (IAEA, Seibersdorf- Áustria ou Mónaco), Consejo de Seguridad Nuclear (CSN, Madrid-Espanha), Comissão Europeia (EC, Geel-Bélgica), etc.

Em 2019, no âmbito da determinação da concentração de atividade de radionuclídeos artificiais e naturais em amostras ambientais o LPSR participou nos seguintes exercícios:

- *EC-JRC-REM 2019 proficiency test on gross alpha/beta activity measurements in water.*
- *IAEA-RML-2019-01-Proficiency Test for determination of radionuclides in seawater.*
- *ALMERA Proficiency Test (IAEA-TEL-2019-04) - Proficiency test on determination of anthropogenic and natural radionuclides in water, shrimp and simulated aerosol filter samples.*
- *Ejercicio interlaboratorio CSN-CIEMAT (2019) – Determinación de emisores alfa, beta y gamma en aguas de consumo y marina.*

Os resultados da participação do LPSR em exercícios de intercomparação, comunicados informalmente (resultados preliminares) ou publicados em relatórios estavam, em geral, dentro do critério aceitável atribuído pelas entidades organizadoras e podem ser consultados nos seguintes documentos:

- ✓ *REM 2019 preliminary report- Determination of gross alpha/beta activity concentrations in water. Ref. ARES (2020) 4588612 (03/09/2020).*
- ✓ *IAEA-RML-2019-01-Proficiency Test for determination of radionuclides in seawater (preliminary summary report), June 2020.*
- ✓ *ALMERA Proficiency Test (IAEA-TEL-2019-04) - Proficiency test on determination of anthropogenic and natural radionuclides in water, shrimp and simulated aerosol filter samples. Individual Evaluation Report Part I and Part II (October 2019).*
- ✓ *Llauradó, M., Tent J., González O. Evaluación del Ejercicio de Intercomparación CSN-CIEMAT 2019 entre Laboratorios de Medida de Radiactividad Ambiental (Agua de consumo y marina), CSN, Abril 2020 (draft).*

## ANEXO II. GLOSSÁRIO

<b>Atividade</b>	Corresponde a uma certa quantidade de um radionuclido num determinado estado energético e num dado momento e expressa-se como o número médio de transições nucleares espontâneas (desintegrações) desse estado energético num determinado intervalo de tempo.
<b>Becquerel (Bq)</b>	Unidade de atividade (S.I.) que representa a atividade de uma quantidade de material radioativo na qual o número médio de transições nucleares espontâneas (desintegrações) por segundo é igual a 1. (1 Bq= uma desintegração por segundo).
<b>Coefficientes de dose</b>	Fatores que determinam a exposição à radiação ionizante de órgãos individuais e de todo o organismo por incorporação de radionuclidos. Os coeficientes de dose dependem do radionuclido, do tipo de incorporação (inalação/ingestão), da composição química do radionuclido e da idade do indivíduo.
<b>Concentração de atividade</b>	Quantidade de material radioativo por unidade de volume ou massa em gases, sólidos ou líquidos. A concentração de atividade pode ser expressa em Bq m <sup>-3</sup> , Bq L <sup>-1</sup> ou Bq kg <sup>-1</sup> .
<b>Contaminação radioativa</b>	Contaminação de qualquer matéria, superfície ou ambiente ou de um indivíduo por substâncias radioativas.
<b>Dose efetiva</b>	Soma das doses equivalentes, devido à radiação externa e interna, em todos os tecidos e órgãos do organismo ponderada pelos respetivos fatores de ponderação tecidual (tem em consideração a sensibilidade do tecido e órgão). A unidade de medição é o Sievert (Sv).
<b>Dose equivalente</b>	A dose absorvida num tecido ou órgão ponderada pelo fator de ponderação da radiação para o respetivo tipo e qualidade de radiação. A unidade de medição é o Sievert (Sv).
<b>Dose Indicativa (DI)</b>	Dose efetiva comprometida para um ano devido à ingestão de todos os radionuclidos cuja presença tiver sido detetada num abastecimento de água destinada ao consumo humano, tanto de origem natural como artificial, excluindo o Trítio, o Potássio-40, o Radão e os produtos de vida curta de desintegração do Radão.
<b>Dose de radiação externa</b>	Dose resultante da exposição do Homem a fontes de radiação externas não envolvendo ingestão ou inalação de radionuclidos.
<b>Dose de radiação interna</b>	Dose resultante da exposição do Homem a fontes de radiação envolvendo ingestão ou inalação de radionuclidos.
<b>Equivalente de dose ambiental H*(10)</b>	Equivalente de dose num ponto de um campo de radiação que seria produzido pelo campo expandido e alinhado correspondente na esfera ICRU a uma profundidade <i>d</i> no raio oposto ao sentido do campo alinhado. A unidade de equivalente de dose ambiental é o Sievert (Sv).
<b>Fundo radioativo natural</b>	Radiação devida à radioatividade que ocorre naturalmente, principalmente a radiação proveniente da presença de radionuclidos de vida longa (ex. series radioativas naturais do Urânio e Tório) e dos seus descendentes na crosta terrestre, atmosfera e radiação cósmica.
<b>Isótopo radioativo</b>	Nuclido do mesmo elemento com diferente número de neutrões.
<b>Período de semidesintegração</b>	O tempo durante o qual a quantidade de um radionuclido (e consequentemente a sua atividade) se reduz a metade do seu valor original. Cada radionuclido tem a sua própria taxa de decaimento.
<b>Radiação ionizante</b>	Radiação suficientemente energética, capaz de produzir iões direta ou indiretamente, emitida pelas partículas alfa, beta, raios gama, Raios-X e

	neutrões.
<b>Radioatividade</b>	O decaimento espontâneo ou a desintegração de um núcleo atômico instável acompanhado pela emissão de radiação (ex. partículas alfa, beta, radiação gama, etc.).
<b>Radionuclido (nuclido radioativo)</b>	Um isótopo instável de um elemento que decai ou se desintegra espontaneamente emitindo radiação ionizante.
<b>Radionuclidos artificiais</b>	Radionuclidos de origem artificial, produzidos pelo homem e libertados no ambiente deliberadamente ou por acidente.
<b>Radionuclidos cosmogênicos</b>	Radionuclidos de origem natural, que têm períodos curtos da escala temporal dos fenômenos geológicos, mas que são continuamente produzidos através da interação da radiação cósmica com gases atmosféricos.
<b>Radionuclidos naturais</b>	Radionuclidos de origem natural, presentes no planeta desde a sua formação, com períodos de semidesintegração muito longos.
<b>Sievert (Sv)</b>	Ver: dose efetiva e dose equivalente; Millisievert (mSv) é 1/1000 do Sievert (Sv).