



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

Máster en Eficiencia y Aprovechamiento Energético

TRABAJO FIN DE MÁSTER

TFM. Nº: **4523M01A021**

TÍTULO: **ESTUDIO DE DISTINTOS PARÁMETROS RADIATIVOS
Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN ENERGÉTICAMENTE
EFICIENTES**

AUTOR: **GORETTI ARIAS FERREIRO**

TUTOR: **JOSÉ LUIS CALVO ROLLE**

FECHA: **JUNIO DE 2018**

Fdo.: EL AUTOR

Fdo.: EL TUTOR

TÍTULO: **ESTUDIO DE DISTINTOS PARÁMETROS RADIATIVOS Y
MEDIDAS DE MITIGACIÓN ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES**

ÍNDICE GENERAL

PETICIONARIO: **ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**
AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N
15405 - FERROL

FECHA: **JUNIO DE 2018**

AUTOR: EL ALUMNO

Fdo.: **GORETTI ARIAS FERREIRO**

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA

1	OBJETIVO.....	11
2	ALCANCE	12
3	RADIOACTIVIDAD	13
3.1	Descubrimiento de la radiactividad.....	13
1.1	radiactividad natural.....	15
3.1.1	Alfa	16
3.1.2	Beta	17
3.1.3	Gamma	18
3.2	Series de desintegración radiactiva.....	19
4	PARÁMETROS RADIATIVOS EN LA EUP	22
4.1	Determinación de los índices de actividad alfa y beta totales	24
4.2	Validación del procedimiento de medida.....	28
4.3	Determinación de la concentración de ⁷ Be.....	32
4.4	Parámetros estadístico descriptivos.....	34
4.5	Evolución de los parámetros radiactivos entre 2006-2016.....	38
4.6	Variación estacional de los parámetros radiactivos en la EUP.....	40
4.7	Análisis de parámetros radiactivos, meteorológicos y contaminantes...	44
4.8	Modelizado de parámetros radiactivos en Ferrol.....	49
5	RADÓN.....	52
5.1	Historia y antecedentes al radón.....	54
5.2	Entrada del radón en edificios.....	57
5.2.1	Suelos	57
5.2.2	Materiales de construcción.....	59
5.2.3	Aire exterior	59
5.2.4	Agua de consumo	59
5.2.5	Gas natural de uso doméstico.....	60

5.3	El radón en los puestos de trabajo	61
5.4	Influencia del clima en la concentración de radón.....	62
5.5	Legislación vigente	63
6	CARTOGRAFÍA DEL POTENCIAL DE RADÓN EN ESPAÑA	64
6.1	Zonas de actuación prioritaria.....	67
7	MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RADÓN.....	71
7.1	Efectos del radón sobre la salud.....	75
7.1.1	Mecanismos de absorción.....	76
8	ESTUDIO Y MITIGACIÓN DEL RADÓN EN EL LRA-UDC	78
8.1	Equipo de medición.....	79
8.2	Metodología	82
8.3	Caso de estudio.....	83
8.4	Solución de mitigación de radón.....	85
8.4.1	Ventilación positiva.....	86
8.5	Instalación de las medidas mitigadoras	87
9	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA MEDIDA DE MITIGACIÓN .	93
10	CONCLUSIONES	95
11	BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS		
12	ANEXOS I.....	105
12.1	Asignación de trabajo fin de máster.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 A. Henri Becquerel (1852-1908)	13
Figura 3-2 Pierre y Marie Curie en el laboratorio (1904)	14
Figura 3-3 Desintegración alfa	16
Figura 3-4 Desintegración beta [7].....	18
Figura 3-5 Desintegración gamma.....	18
Figura 3-6 Capacidad de penetración de las distintas radiaciones [1].....	19
Figura 3-7 Desintegración de la serie 238U [1].	20
Figura 3-8 Desintegración de la serie del ²³² Th [1].	21
Figura 3-9 Desintegración de la serie radiactiva del ²³⁵ U [1].	21
Figura 4-1 Evolución de la concentración de actividad ⁷ Be entre 2006-2011.	23
Figura 4-2 Conjunto de filtros empleados en la toma de muestra de aerosoles.	25
Figura 4-3 Desecador empleado en el LRA-UDC.	25
Figura 4-4 Contador proporcional para determinación de índices alfa y beta.....	26
Figura 4-5 filtros de aerosoles al inicio (izq.) y al final (dcha.) del muestreo.....	28
Figura 4-6 Resultados intercomparación actividad alfa 2013 (CSN) [13].	30
Figura 4-7 Resultados intercomparación actividad alfa 2013 (CSN) [13].	31
Figura 4-8 Filtros para la determinación mensual de ⁷ Be.....	32
Figura 4-9 Detector gamma empleado para determinación de ⁷ Be.....	33
Figura 4-10 Histogramas de frecuencia para actividad alfa y actividad beta.	35
Figura 4-11 Histograma de la concentración ⁷ Be.	36
Figura 4-12 Evolución de la concentración de ⁷ Be.....	37
Figura 4-13 Índice de producción industrial. Fuente: Eurostat.....	38
Figura 4-14 Evolución de los parámetros radiactivos (2006-2016).....	39
Figura 4-15 Variación de la actividad alfa y actividad beta durante el año 2012.	41
Figura 4-16 Diagrama de caja actividad alfa (izq.) y actividad beta (dcha.).....	42
Figura 4-17 Diagrama de caja y bigotes para la concentración de ⁷ Be.	42
Figura 4-18 Recta de regresión actividad alfa/beta para el año 2012.....	43
Figura 4-19 Distancia entre la EUP y la estación meteorológica CIS.	45
Figura 4-20 Frecuencia de vientos en la EUP.....	46
Figura 4-21 Caseta de toma de muestras de aerosoles.....	51
Figura 5-1 Situación del gas radón en la tabla periódica.....	52
Figura 5-2 Descendientes del Uranio.....	54
Figura 5-3 Entrada y salida de los trabajadores en una central nuclear [35].	56
Figura 5-4 Zonas por las que penetra el Radón.....	57
Figura 5-5 Suelo poroso (izq.). Suelo con pocas grietas (dcha.).....	58
Figura 6-1 Mapa de potencial de radón de España [43].....	65

Figura 6-2 Mapa de las zonas de actuación prioritarias por municipios [43].....	67
Figura 6-3 Categorización del potencial de radón en A Coruña[44].	68
Figura 6-4 Categorización del potencial de radón en Lugo [44].	69
Figura 6-5 Potencial de radón en Ourense (izq.) y Pontevedra (dcha.)[44].	69
Figura 6-6 Zonas de alto riesgo en la comarca de Ferrol y alrededores [41].....	70
Figura 7-1 Equipo Alphaguard para medición continua de gas radón.	72
Figura 7-2 Equipo Sun Nuclear para medición continua de gas radón.....	72
Figura 7-3 Detector de trazas de radón (3 meses).....	74
Figura 7-4 Detector de carbón activo para medición de radón.	74
Figura 7-5 Efectos del radón en el pulmón.....	75
Figura 7-6 Exposición de los individuos a la radiación ionizante.	77
Figura 8-1 Fachada principal de la EUP.	78
Figura 8-2 2ª planta de la EUP. Ubicación de la sala de mitigación del radón [46].....	78
Figura 8-3 Sala de mediciones del LRA-UDC [49].	84
Figura 8-4 Esquema sala de medición con los sistemas de mitigación [49].	87
Figura 8-5 Esquema sala de medición tras instalar un ventilador [49].....	88
Figura 8-6 Esquema sala de medición tras instalar el segundo ventilador [49].	89
Figura 8-7 Sala de medición con todos los sistemas incorporados.	91
Figura 8-8 Evolución en el tiempo de la concentración de radón [49].	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Fuentes naturales de radiación [4].	16
Tabla 3-2 Clasificación de las series radiactivas [1].	19
Tabla 4-1 Resultados intercomparación CSN año 2013 [13].	30
Tabla 4-2 parámetros descriptivos para alfa, beta y ^7Be .	34
Tabla 4-3 Correlaciones de Pearson.	47
Tabla 4-4 Modelo para actividad alfa.	49
Tabla 4-5 Modelo para actividad beta.	49
Tabla 4-6 Modelo para concentración ^7Be .	50
Tabla 6-1 zonas con potencial de Radón (P90) > 300 Bq/m ³ .	66
Tabla 6-2 categorización del potencial de radón [44].	68
Tabla 7-1 Modo más generalizado de aplicación de los detectores de radón.	75
Tabla 8-1 Tabla de características AlphaGUARD PQ 2000PRO.	80
Tabla 8-2 Concentración antes de implementar los sistemas de mitigación de radón.	88
Tabla 8-3 Concentración de radón tras instalar los ventiladores.	89
Tabla 8-4 Concentración radón tras implementar el sistema de aire acondicionado.	90
Tabla 8-5 Porcentaje de reducción tras la implementación de la solución mitigadora.	90
Tabla 9-1 Concentración de radón con los distintos equipos de mitigación.	93

TÍTULO: **ESTUDIO DE DISTINTOS PARÁMETROS RADIATIVOS Y
MEDIDAS DE MITIGACIÓN ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES**

MEMORIA

PETICIONARIO: **ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA**
AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N
15405 - FERROL

FECHA: **JUNIO DE 2018**

AUTOR: **EL ALUMNO**

Fdo.: **GORETTI ARIAS FERREIRO**

MEMORIA

1	OBJETIVO.....	11
2	ALCANCE	12
3	RADIOACTIVIDAD	13
3.1	Descubrimiento de la radiactividad.....	13
1.1	radiactividad natural.....	15
3.1.1	Alfa	16
3.1.2	Beta	17
3.1.3	Gamma	18
3.2	Series de desintegración radiactiva.....	19
4	PARÁMETROS RADIATIVOS EN LA EUP	22
4.1	Determinación de los índices de actividad alfa y beta totales	24
4.2	Validación del procedimiento de medida.....	28
4.3	Determinación de la concentración de ⁷ Be.....	32
4.4	Parámetros estadístico descriptivos.....	34
4.5	Evolución de los parámetros radiactivos entre 2006-2016.....	38
4.6	Variación estacional de los parámetros radiactivos en la EUP.....	40
4.7	Análisis de parámetros radiactivos, meteorológicos y contaminantes...	44
4.8	Modelizado de parámetros radiactivos en Ferrol.....	49
5	RADÓN.....	52
5.1	Historia y antecedentes al radón.....	54
5.2	Entrada del radón en edificios.....	57
5.2.1	Suelos	57
5.2.2	Materiales de construcción.....	59
5.2.3	Aire exterior	59
5.2.4	Agua de consumo	59
5.2.5	Gas natural de uso doméstico.....	60
5.3	El radón en los puestos de trabajo	61
5.4	Influencia del clima en la concentración de radón.....	62

5.5	Legislación vigente	63
6	CARTOGRAFÍA DEL POTENCIAL DE RADÓN EN ESPAÑA	64
6.1	Zonas de actuación prioritaria.....	67
7	MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RADÓN.....	71
7.1	Efectos del radón sobre la salud.....	75
7.1.1	Mecanismos de absorción.....	76
8	ESTUDIO Y MITIGACIÓN DEL RADÓN EN EL LRA-UDC	78
8.1	Equipo de medición.....	79
8.2	Metodología	82
8.3	Caso de estudio.....	83
8.4	Solución de mitigación de radón.....	85
8.4.1	Ventilación positiva.....	86
8.5	Instalación de las medidas mitigadoras	87
9	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA MEDIDA DE MITIGACIÓN .	93
10	CONCLUSIONES	95
11	BIBLIOGRAFÍA	97

1 OBJETIVO

El objetivo del presente estudio es la caracterización de distintos parámetros radiactivos y estudio de la influencia de dichos parámetros en la contaminación ambiental, así como posibles causas.

Al mismo tiempo, se realiza una evaluación y valoración energética de la actuación de mitigación de radón llevada a cabo en la el laboratorio de radiactividad ambiental situado en la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidade da Coruña.

2 ALCANCE

El proyecto abarca los siguientes puntos:

- Definición y comportamiento de diversos parámetros radiactivos
- Influencia meteorológica y de los contaminantes atmosféricos en parámetros radiactivos.
- Modelización de parámetros radiactivos.
- Mitigación de radón.
- Estudio de las medidas de mitigación llevadas a cabo en la escuela universitaria politécnica de Serantes.

3 RADIOACTIVIDAD

La radiactividad es una propiedad por la que algunos materiales que contienen átomos inestables se desintegran con el paso del tiempo, dando lugar a átomos nuevos, así como partículas y radiaciones de diversa naturaleza [1]. Los núcleos de los átomos de algunos elementos químicos no son estables, porque tienen un número de neutrones muy superior al de protones. Para conseguir la estabilidad, estos núcleos emiten partículas y radiaciones de forma espontánea. Cuando emiten partículas se transforman en núcleos de átomos de otros elementos. Este fenómeno recibe el nombre de radiactividad y fue descubierto en 1896 por H. Becquerel [2].

3.1 DESCUBRIMIENTO DE LA RADIOACTIVIDAD

La radiactividad fue descubierta de manera fortuita por el físico francés Henri Becquerel (Figura 3-1 [3]) en 1896, al estudiar fenómenos de fosforescencia y fluorescencia en sales de uranio. Becquerel situaba un cristal de mineral de uranio, como la Pechblenda, sobre una lámina fotográfica. Después envolvía todo el conjunto en papel negro y lo exponía a la luz del sol. Tras un periodo de tiempo, retiraba la lámina fotográfica, encontrando que dicha placa estaba velada. Becquerel atribuía este hecho a la fosforescencia de la sal de uranio. En días

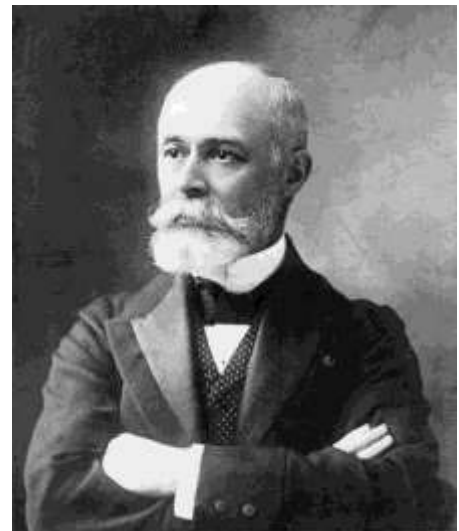


Figura 3-1 A. Henri Becquerel (1852-1908)

posteriores a este primer experimento no hubo sol, por lo que no se repitió el experimento, quedando el conjunto formado por el papel negro, la placa fotográfica y la sal de uranio dentro de un cajón. Al retirar la placa fotográfica del cajón, observó que estaba velada, fenómeno que no podía atribuirse a la fosforescencia, ya que la placa no había estado expuesta a la radiación solar. La sal de uranio emitía una radiación con carácter espontáneo. Este fenómeno sería conocido más tarde como radiactividad [4].

Marie Curie y a su esposo Pierre Curie (Figura 3-2 [3]) se dedicaron al estudio de múltiples minerales, descubriendo que otra sustancia, el torio, presentaba un comportamiento similar al del uranio. Los Curie demostraron que la radiactividad

era una propiedad elemental, característica de los átomos. A lo largo del año 1898 los Curie descubrieron el polonio y el radio, sustancias radiactivas con mayor actividad que el uranio. Marie se encargaba del estudio de la obtención, con la mayor pureza posible, de los minerales de las sustancias radiactivas. Pierre se encargaba del estudio de la radiación y sus propiedades. Él comprobó en su propio cuerpo los efectos del radio, poniendo en contacto dicho elemento sobre su propia piel, y obteniendo como resultado una quemadura y una herida. Algunos años después el radio se emplearía en el tratamiento de tumores. El matrimonio Curie, junto con Becquerel, obtuvieron el premio Nobel de física gracias al descubrimiento de la radiactividad natural[4].

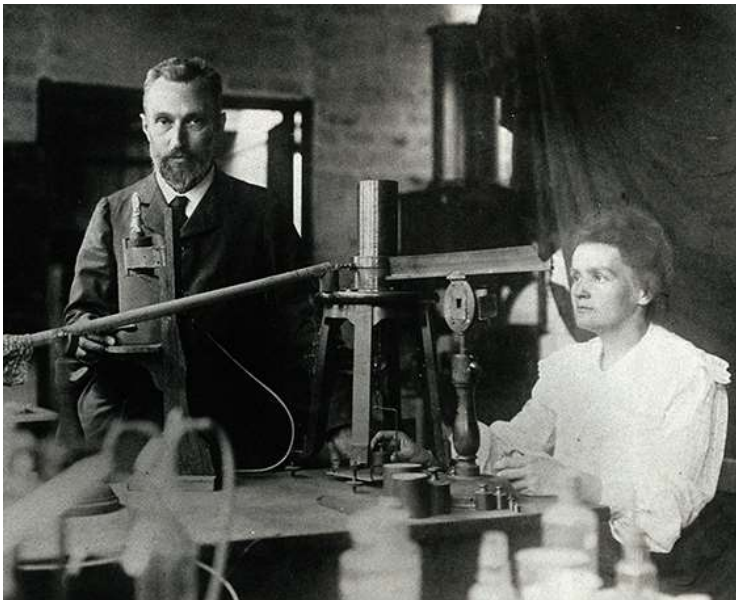


Figura 3-2 Pierre y Marie Curie en el laboratorio (1904)

Al morir Pierre, Marie Curie continuó con la investigación de la radiactividad, apoyándose en esta ocasión en el físico y químico neozelandés Ernest Rutherford, descubridor de los tres tipos principales de radiación emitidas por las sustancias radiactivas: alfa, beta y gamma [4].

Marie Curie dedicó su vida al estudio de la radiactividad, centrándose en las aplicaciones médicas de las sustancias radiactivas y los rayos X. Su hija Irene continuó con los estudios de su madre, llegando a descubrir la radiactividad artificial[4].

1.1 RADIATIVIDAD NATURAL

En la Tierra se encuentra radiación natural, procedente de varias fuentes y que produce la mayoría de la radiactividad que nos rodea. Los principales radionucleidos, que son aquellos que se encuentran en la Tierra desde su formación ($4,6 \cdot 10^9$ años), desarrollan una función primordial a la hora de sustentar, a lo largo de la historia, las condiciones geológicas del planeta. El decaimiento de los isótopos ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U da comienzo a la radiactividad. Gracias a este proceso existen radioisótopos de plomo, astato polonio, radón, bismuto, radio, francio y protactinio en la Tierra. Estos isótopos tienen unos de vida media corta en relación con la edad de la Tierra.

El decaimiento de estos radionucleidos provoca una significativa porción de las dosis de radiación de radiactividad natural recibida por los humanos. Otra porción de la dosis recibida se debe a la radiación cósmica, con lo que se completan las maneras de producir radiactividad natural en la litosfera y la atmósfera [1], [5].

A continuación, en la Tabla 3-1 se muestran las principales fuente de radiación natural, así como sus características, causas y dosis anual promedio por habitante [4]. En la Tabla 3-1 se emplea como unidad de medida el mSv, una milésima parte de sievert, la unidad de medida de la dosis efectiva.

Tabla 3-1 Fuentes naturales de radiación [4].

FUENTES	CARACTERÍSTICAS	CAUSA	EXPOSICIÓN HUMANA
Rayos Cósmicos	Altamente ionizante y energética	Actividad de las estrellas y del sol	0.3 mSv
Materiales de la Corteza Terrestre	Menos ionizante y energética que los rayos catódicos	Elementos de origen natural que forman la corteza terrestre: U, Th, Ra	Lugares en donde existen manantiales con gran cantidad de radio. Un ejemplo es Ramsar en Irán.
Radiación Interna	Su origen radica en las sustancias radiactivas como son el tritio, Carbono-14 o el potasio-40, así como elementos químicos producto de la desintegración de las series radiactivas U-238 y Th-232	Los alimentos que ingerimos o incluso el aire (al respirar)	Alta en el Círculo Polar, lugar en donde se come carne de animales como el reno y el caribú durante el invierno, los cuales contienen altas concentraciones de Po-210
Radón	Principal fuente de radiación natural. Se trata de un gas que se concentra en el aire de los edificios. El aislamiento térmico dificulta la salida del gas	Inhalación de los radionúclidos en lugares cerrados, también puede contener este gas el agua o gas natural	Un estudio finlandés mostró que la cantidad de gas que en los cuartos de baño triplica la cantidad existente en otras habitaciones de la casa.

3.1.1 ALFA

Las partículas alfa (α) son partículas muy similares a los núcleos de helio. Están constituidas por dos protones y dos neutrones ligados. Consisten, por tanto, en partículas pesadas doblemente cargadas positivamente. Al emitirse un partícula alfa por el núcleo, su número atómico, Z, disminuye dos unidades y su número másico, A, disminuye cuatro unidades. El proceso puede simbolizarse del siguiente modo [6]:



Por ejemplo:

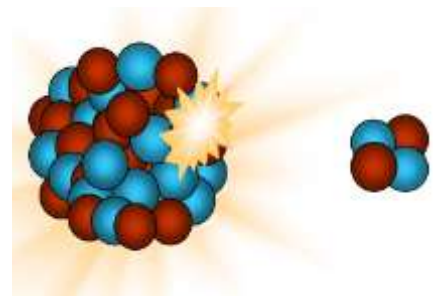


Figura 3-3 Desintegración alfa

Los núcleos pesados, con número másico mayor a 140, suelen emitir partículas alfa a causa de la repulsión eléctrica existente por los protones que conforman el núcleo atómico. Cada partícula emite una energía determinada conocida como espectro energético, y resulta de las características del propio radionúclido[6].

Las partículas alfa aunque son muy pesadas apenas son penetrantes. Este tipo de radiación es incapaz de atravesar una hoja de papel, y del mismo modo, la piel humana. [7]. Sin embargo, puede ser peligrosa en el interior del cuerpo humano si se introduce por la respiración de polvo que contiene alguna sustancia radiactiva emisora de partículas alfa. En el interior del cuerpo humano puede producir, durante un corto periodo, ionizaciones locales y alteraciones químicas [8].

3.1.2 BETA

La desintegración beta se puede agrupar en tres procesos distintos: la desintegración β^- (emisión de un electrón), la desintegración β^+ (emisión de un positrón) y la captura electrónica (CE) o captura de un electrón por el núcleo atómico. Los núcleos al producirse este tipo de desintegraciones cambian el número atómico pero no el número másico, de tal manera que los núcleos resultantes se consideran isóbaros del original [6].

La desintegración β^- consiste en la desintegración de un neutrón que forma parte del núcleo y que pasa a ser un protón, dando lugar, durante ese cambio, a la emisión de un electrón y un antineutrino. Este proceso suele producirse en aquellos núcleos que tienen un exceso de neutrones [6].

La desintegración β^+ es el resultado de la emisión de positrones (antipartícula del electrón) por parte de los núcleos atómicos. EL positrón tiene una masa igual a la del electrón pero su carga eléctrica es positiva. Durante la desintegración β^+ se transforma un protón del núcleo en un neutrón, emitiendo a su vez un positrón y un neutrino [6].

En la captura electrónica (CE) el núcleo captura un electrón y lo transforma un protón del núcleo en neutrón y un neutrino [6].

Este tipo de radiaciones son más ligeras que las radiaciones α , no obstante, son más penetrantes. Las partículas beta tienen la capacidad de poder atravesar

una hoja de papel y entre uno y dos centímetros de tejido vivo, sin embargo, no pueden atravesar una lámina de aluminio [7].

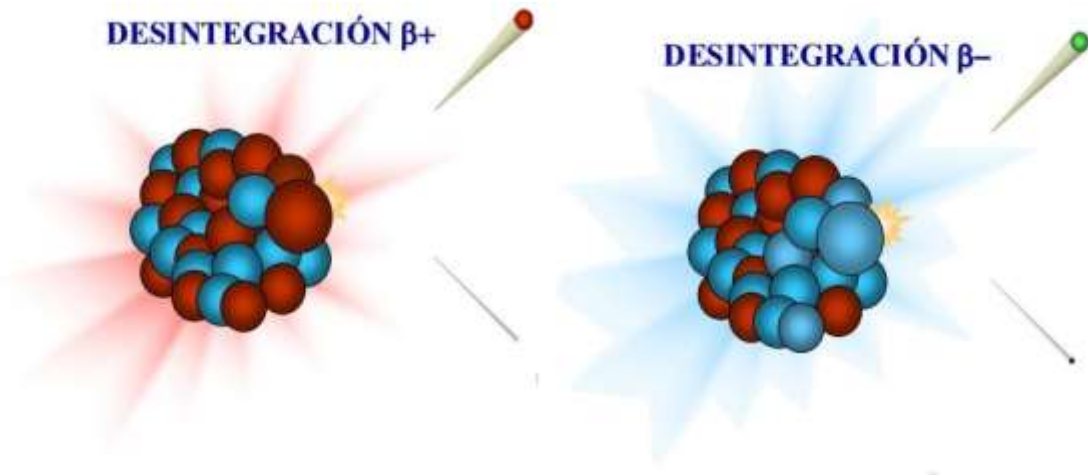


Figura 3-4 Desintegración beta [7].

3.1.3 GAMMA

La emisión de rayos gamma (γ) es para el núcleo la manera de desprenderse de su energía de excitación. Un núcleo que acaba de experimentar una desintegración alfa o beta puede quedar excitado; se desexcitará a partir de la emisión un fotón γ [7]. Este cambio se representa mediante la expresión [3.3]:



*indica el núcleo que se encuentra en estado excitado.

Se considera que los positrones pueden ser entendidos como emisores de radiación gamma ya que al tratarse de partículas inestables se unen a electrones produciendo la desaparición de ambas partículas y convirtiéndose la masa en energía que aparece en forma de dos fotones de radiación gamma. Además, las desintegraciones β y α suelen ir acompañadas de emisión γ , al quedar el núcleo residual en estado excitado o de mayor energía [6].

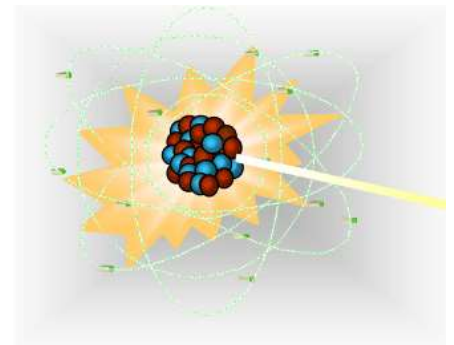


Figura 3-5 Desintegración gamma.

Se trata de un tipo de radiación muy penetrante que es capaz de atravesar hojas de papel y láminas de aluminio. Para poder frenarla es necesario una lámina de plomo de un grosor considerable [7].

A continuación, en la Figura 3-6, se muestra la capacidad de penetración de los distintos tipos de radiaciones.

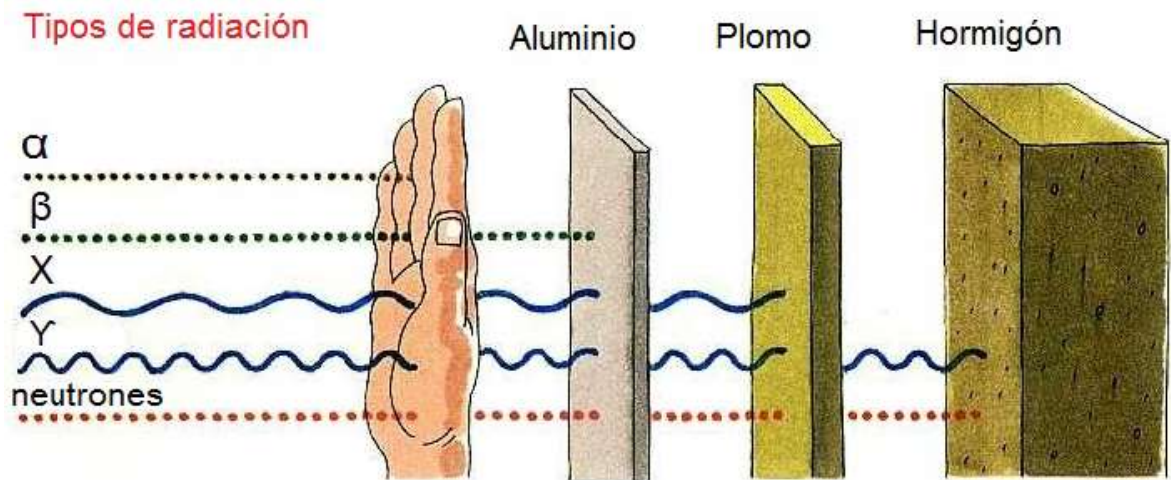


Figura 3-6 Capacidad de penetración de las distintas radiaciones [1].

3.2 SERIES DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

La mayor parte de la radiactividad natural existente en la tierra, y la cantidad de la misma, tienen su origen en las series de decaimiento de los radionucleidos primordiales. En la Tabla 3-2 se muestran las cuatro series naturales de decaimiento radiactivo existentes en la tierra.

Tabla 3-2 Clasificación de las series radiactivas [1].

SERIES DE DECAIMIENTO RADIATIVO				
Nº másico	Cadena	Padre	Vida media (años)	Isótopo final
4n	Torio	^{232}Th	$1,41 \cdot 10^{10}$	^{208}Pb
4n+1	Neptunio	^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$	^{209}Pb
4n+2	Uranio-Radio	^{238}U	$4,51 \cdot 10^9$	^{206}Pb
4n+3	Uranio-Actinio	^{235}U	$7,18 \cdot 10^8$	^{208}Pb

Al desintegrarse un núcleo, este emite una cierta radiación dando lugar a otro núcleo diferente, pero también radiactivo, que a su vez emite nuevas radiaciones. El proceso continua hasta que aparezca un núcleo estable, no radiactivo [4].

En todas las series los núcleos están relacionados. El número másico (A) de todas las series se caracteriza por medio de la expresión [3.4]:

$$A \rightarrow 4n + m \quad [3.4]$$

En donde n es el mayor número entero divisible en el número másico y m es el resto. Por ejemplo, en la serie $4n$, los radioisótopos presentarían una masa divisible por 4, con un resto igual a cero [1][4].

De las series radiactivas naturales anteriormente citadas, tres de ellas producen la mayor parte de la radiactividad natural existente en la tierra. La serie cuyo padre es el ^{238}U se denomina como la serie del uranio. Las series encabezadas por el ^{232}Th y ^{235}U , se conocen como series del torio y del actinio. La serie restante, la del ^{297}Np , debería haberse extinguido, pero las pruebas nucleares realizadas hasta el momento, se ha determinado que en accidentes como los de Chernobyl (1986) o Fukushima (2011) se han liberado estos núcleos, de manera que sigue existiendo esta cadena radiactiva [1]. A continuación se enumeran algunas características comunes a todas las series [1]:

- Se generan a partir de radionucleidos primordiales con un una vida media alta.
- Poseen un radioisótopo del radón.
- Acaban en un isótopo de plomo estable.
- El decaimiento se debe a una serie de transformaciones α y β .

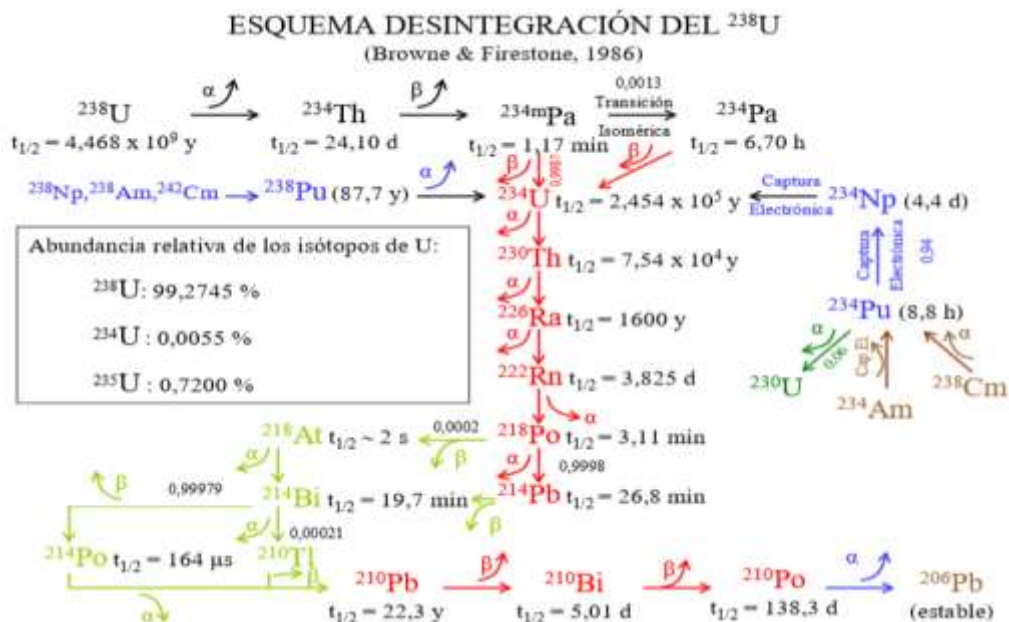


Figura 3-7 Desintegración de la serie ^{238}U [1].

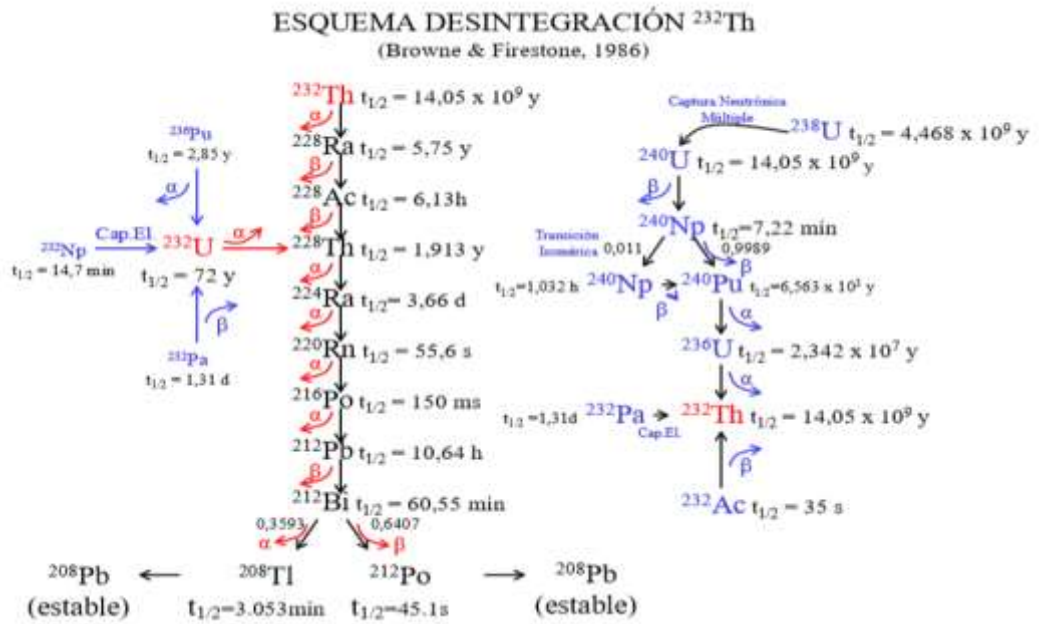


Figura 3-8 Desintegración de la serie del ²³²Th [1].

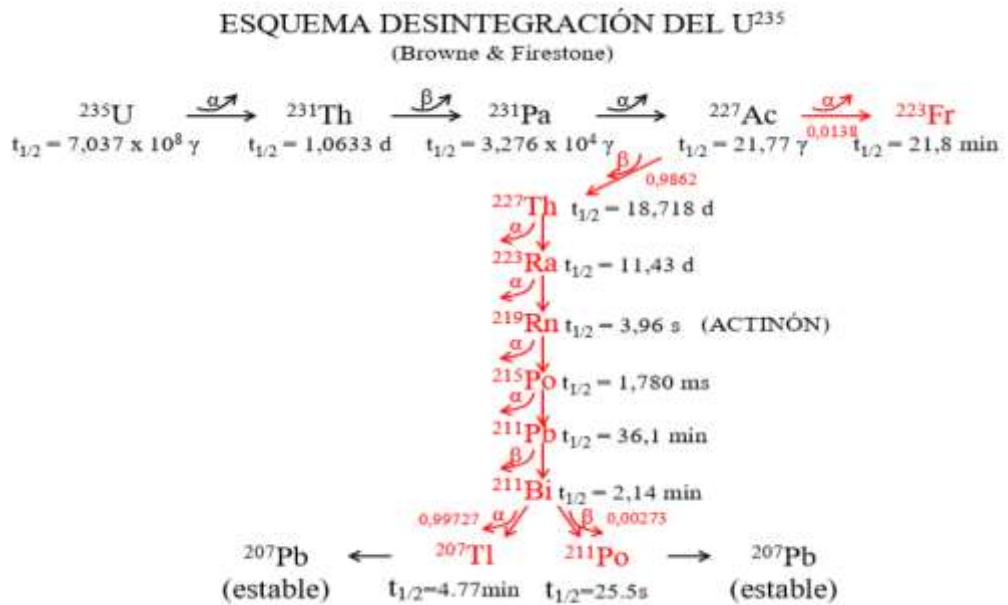


Figura 3-9 Desintegración de la serie radiactiva del ²³⁵U [1].

4 PARÁMETROS RADIATIVOS EN LA EUP

En el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidade da Coruña (LRA-UDC) se ha medido semanalmente, a partir de muestras de aire, los índices de actividad alfa y actividad beta, así como concentración de ^7Be (mensual). Se dispone de datos de actividad alfa y actividad beta y concentración de ^7Be desde el año 1996 hasta la actualidad. No obstante, en el presente trabajo, se analiza un periodo de 11 años (2006-2016).

A partir de los datos disponibles en el LRA, es posible analizar el comportamiento de estos parámetros radiactivos con el objetivo de poder modelizarlo. Se tratará de esclarecer una relación entre los parámetros de actividad alfa y actividad beta, y la influencia meteorológica. A su vez, se relaciona dicha actividad con algunos gases contaminantes presentes en la atmósfera.

La medida de los índices de actividad alfa y beta en el aire, son un método que se emplea comúnmente para recoger información acerca del comportamiento de los radionúclidos. Además, se considera un método viable para analizar la existencia de episodios radiactivos en el ambiente. Esta técnica consiste en registrar y evaluar los valores de alfa y beta a lo largo de un largo periodo de tiempo para así obtener su patrón de comportamiento normal en el lugar de estudio (dichos valores se mantienen constantes en el tiempo) [9]. Cuando se presentan en la toma de medida variaciones significativas en dichos parámetros, puede indicar episodios radiactivos como pruebas nucleares, accidentes en centrales nucleares, etc...

La desintegración de las cadenas radiactivas del ^{222}Rn origina actividad alfa y actividad beta.

El ^7Be es un radionucleido cosmogénico producido por el continuo bombardeo de la atmósfera terrestre por radiación. Se produce a partir de una reacción endotérmica cuando las partículas de rayos cósmicos desintegran el núcleo atómico del nitrógeno atmosférico y el oxígeno, en un proceso conocido como espalación. El principal sitio de producción de este radionúclido se encuentra en la estratosfera inferior a una altura de alrededor de 20 km [10]. Dependiendo del origen, varía la composición de la radiación cósmica. La radiación cósmica antes de entrar en la atmósfera interactúa con los gases y partículas produciendo gran

cantidad de radioisótopos cosmogénicos diferentes. Los radioisótopos cosmogénicos pueden alcanzar la tierra también a partir de los meteoritos y polvo extraterrestre que se introduce en la atmósfera. La radiactividad en el polvo cósmico tiene su origen en los isótopos ligeros, como es el caso del ^7Be [1].

Los isótopos de ^7Be , presentan un período de semidesintegración de 53 días. La presencia del ^7Be en la atmósfera terrestre permite la monitorización de los ciclos de manchas solares y de la actividad solar, fenómenos que afectan al campo magnético que protege la Tierra de los rayos cósmicos.

La velocidad con la que el ^7Be se transfiere desde el aire hasta el suelo varía en función de las condiciones meteorológicas [11]. La desintegración del ^7Be en el sol es uno de las fuentes de los neutrinos solares, y fue la primera fuente identificada empleando el experimento Homestake[12]. Por otra parte, la presencia de ^7Be en los sedimentos puede ser empleada para medir la antigüedad de los mismos.

A continuación, en la Figura 4-1, se muestran los resultados de concentración de actividad ^7Be obtenidos en el LRA-UDC en el periodo 2006-2011. En la Figura 4-1 se muestra en color azul los valores registrados de concentración de ^7Be , mientras que en color amarillo se representan los límites de detección de dicho parámetro.

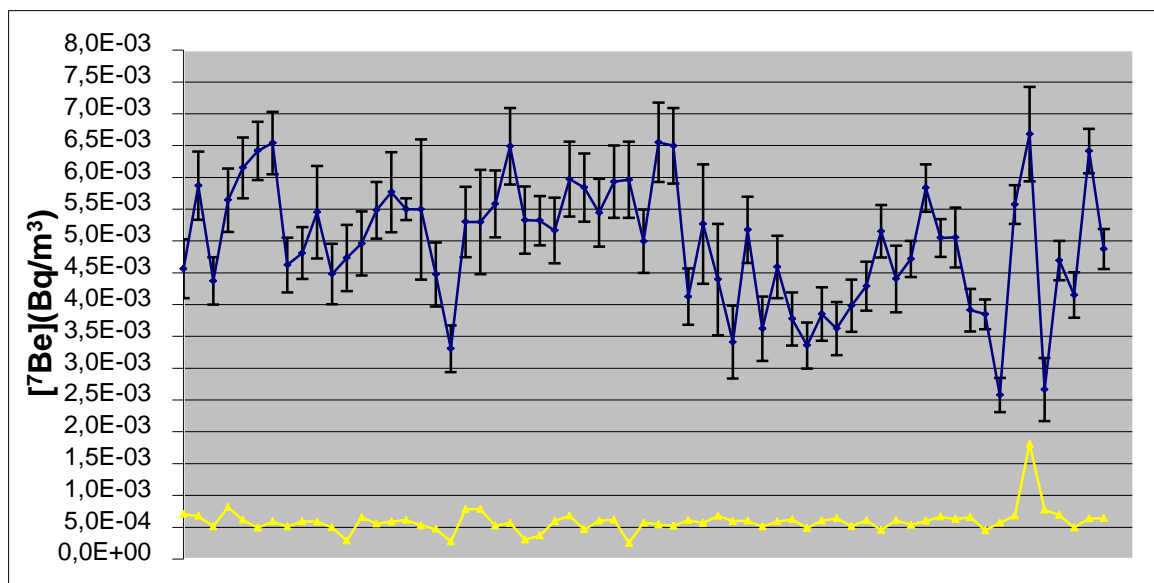


Figura 4-1 Evolución de la concentración de actividad ^7Be entre 2006-2011.

4.1 DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE ACTIVIDAD ALFA Y BETA TOTALES

A continuación se muestra el método utilizado por el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidade da Coruña (LRA-UDC) para la determinación de los índices de actividad alfa y beta totales en muestras ambientales mediante medida en contador proporcional de flujo continuo de gas.

Los índices de actividad alfa y beta totales obtenidos en el laboratorio son unos parámetros puramente orientativos, que permiten conocer únicamente el orden de magnitud de la contaminación radiactiva, refiriéndola a ^{241}Am y ^{90}Sr en equilibrio con ^{90}Y , respectivamente, isótopos de gran importancia desde el punto de vista de la protección radiológica; además, el ^{241}Am emite a una energía aproximadamente intermedia (5.48 MeV) dentro del intervalo de energías de las partículas α (de 4 a 6 MeV).

Las actividades alfa total y beta total obtenidas con este método no incluyen el radón libre existente, de manera que se normaliza un intervalo de tiempo de 2 días desde la recogida de la muestra hasta la realización de su medida, con el fin de minimizar la aportación de los descendientes sólidos del gas radón.

Será necesario también considerar que los radionucleidos volátiles (o presentes en compuestos volátiles, como el ^3H), dependiendo del método de preparación utilizado, no contribuirán en general a los índices de actividad total.

Las muestras de partículas en suspensión en aire obtenidas mediante la retención en un filtro de membrana de 47 mm de diámetro Millipore modelo AAWP04700 (véase Figura 4-2), que posee un tamaño de poro de $0,8\mu\text{m}$ y porosidad del 82%, y está constituido por una mezcla de ésteres de celulosa, tal como el de Radēco modelo HD-2061 tipo 0750-02, con fibras de borosilicato en su composición y una eficiencia mínima de retención para partículas de $0,3\mu\text{m}$ del 95%, o, también de Radēco, el modelo LB-5211 tipo 0750-36, compuesto de papel y vidrio laminado, y cuya eficiencia de retención para partículas de $0,3\mu\text{m}$ es del 99%) no requieren preparación específica alguna para medir los índices de actividad alfa y beta totales, basta colocar el filtro con la muestra acumulada durante el período establecido (generalmente una semana) sobre una plancheta de acero inoxidable, 49 mm de diámetro y 7 estrías, y el conjunto introducirlo en uno de los pocillos del contador para su medida directa.

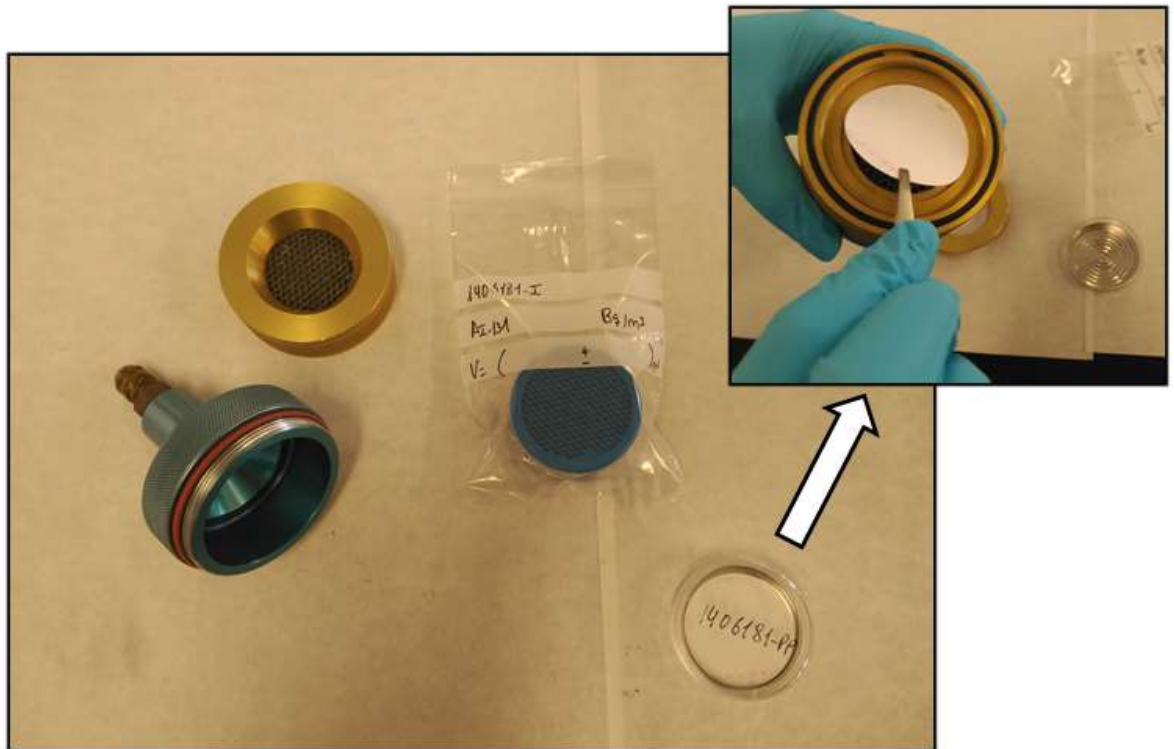


Figura 4-2 Conjunto de filtros empleados en la toma de muestra de aerosoles.

Para guardar la plancheta con el filtro de muestra cuando no se están midiendo, se utiliza una placa petri formada de polietileno con fondo plano, que cuenta con un diámetro externo de 54,1mm y un diámetro interno de 54,0mm. Las muestras deben mantenerse desde su recogida hasta su medida en un desecador (Figura 4-3) para eliminar la posible humedad que contengan, que falsearía su espesor másico y conduciría a resultados erróneos.



Figura 4-3 Desecador empleado en el LRA-UDC.

Es necesario tener en cuenta el efecto de autoabsorción alfa y beta, por lo que se requiere disponer de unas buenas curvas de autoabsorción. En la medida del índice de actividad alfa total es aconsejable no sobrepasar un espesor másico de 5 mg/cm^2 (aunque la curva de autoabsorción valorada alcanza hasta los 10 mg/cm^2), y, si es posible, no superar los 2 mg/cm^2 , ya que entonces el factor de

autoabsorción que emplearemos no dependerá de la naturaleza del depósito de la plancheta. Por su parte, en la medida del índice de actividad beta total es aconsejable no sobrepasar un espesor másico de 25 mg/cm^2 . Para calcular el espesor másico se determina la masa de la muestra por diferencia y se divide por la superficie que ocupa la misma en la plancheta que constituye el soporte para la medida; en este caso la superficie es de 12.57 cm^2 .

La determinación de los índices de actividad alfa y beta total se lleva a cabo mediante un contador proporcional de flujo continuo de gas de bajo fondo, con 10 canales, LB770 de Berthold (Figura 4-4), que permite un recuento simultáneo y separado de muestras, con una geometría de medida 2π , y un espesor de ventana de 0.5 mg/cm^2 . El equipo incluye un blindaje de plomo de 10 cm de espesor.



Figura 4-4 Contador proporcional para determinación de índices alfa y beta.

El fondo alfa para planchetas de 60 mm de diámetro es inferior a 0.1 cpm (cuentas por minuto), y el fondo beta para planchetas de igual tamaño es inferior a 1 cpm. La eficiencia para filtros de 50 mm de diámetro en planchetas de 60 mm es de alrededor del 35% para beta (^{90}Sr) y del 25% para alfa (^{241}Am); la eficiencia de detección se incrementa trabajando con planchetas de 49 mm y acero inoxidable apoyadas en soportes (hasta 27% para alfa y 40% para beta).

A continuación se muestra, de manera muy resumida, el funcionamiento del equipo:

- El gas (PR-10, mezcla de un 90% de Ar y un 10% de CH₄) se introduce en el Bloque del Detector, que consta de 10 detectores para muestras y un detector de guarda (que elimina la radiación cósmica), conectados a una unidad de preamplificadores/discriminadores con anticoincidencias, y a una fuente de alta tensión.
- El Bloque del Detector se conecta a un PC mediante un interfaz adecuado (LB-530-PC), obteniendo información por monitor e impresora. Esta información puede tratarse a través de un programa específico (UMS), que permite la medida de la actividad de las muestras, del fondo, calibración, elaboración de curvas de meseta (plateaus), etc.

El mantenimiento de este aparato consiste en una limpieza del receptáculo de muestras con alcohol metílico o isopropílico; se realiza siempre que el fondo de algún detector rebase los límites de trabajo antes establecidos. Se establece un período de limpieza de dichos receptáculos de carácter trimestral.

Para que el aparato esté en condiciones de medir es necesario purgar el bloque de detección durante 1.5-2 horas con un caudal de gas P10 próximo a 100 mL/min. Seguidamente se estabiliza el caudal entre 60 y 80 mL/min (que será el caudal de medida), se enciende el aparato y se espera al menos 30 minutos.

Antes de la medida de una muestra es necesario calibrar el equipo, obteniendo el rendimiento de detección y el fondo o el blanco (número de cuentas por unidad de tiempo de una muestra preparada a partir de agua desionizada utilizando el método descrito) de muestra. También es conveniente, para conseguir el mayor rendimiento de detección y el menor spillover posibles, construir la curva de meseta o plateau, midiendo el patrón correspondiente a diferentes voltajes, eligiendo el voltaje óptimo de trabajo; éste se establece en unos 1650 voltios.

Para eliminar la contaminación presente en la sala de mediciones a causa del radón se emplean dos ventiladores situados en la única ventada de la habitación. Uno se encuentra a 1,2 m y el otro a 3 m del suelo. Su objetivo es

impulsar aire del exterior del edificio hacia el interior de la sala para diluir el radón presente y alcanzar la sobrepresión necesaria para impedir su entrada.

A continuación se muestra, en la Figura 4-5, dos filtros de membrana, uno al inicio del muestreo (izq.) y el otro tras una semana de captación (dcha.).

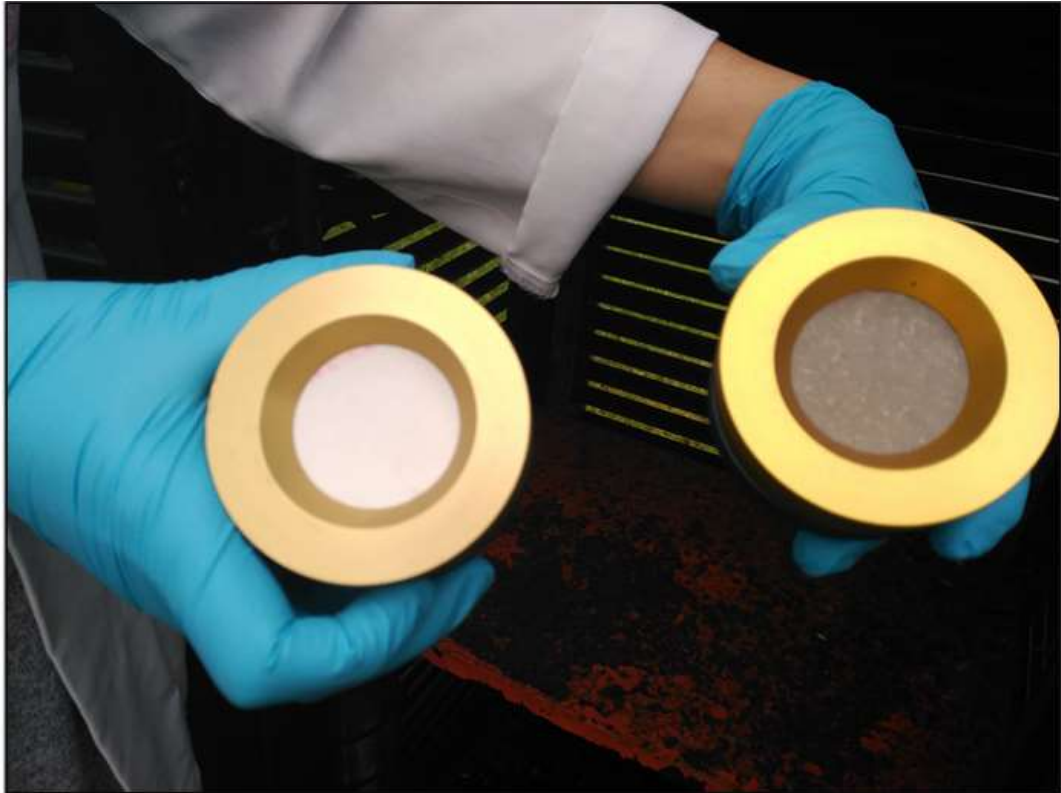


Figura 4-5 filtros de aerosoles al inicio (izq.) y al final (dcha.) del muestreo.

4.2 VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

El en laboratorio de radiación ambiental (LRA-UDC) ha participado desde el año 2000 en diversos ejercicios de intercomparación aplicados al análisis de radiactividad en muestras ambientales. Estas intercomparaciones han sido organizadas tanto por el consejo de seguridad nuclear (CSN), como por la *International Atomic Energy Agency* (IAEA).

En todas las intercomparaciones en las que ha participado el LRA-UDC, los resultados obtenidos para los parámetros radiactivos han sido satisfactorios.

A modo ilustrativo, se muestra a continuación, en la Tabla 4-1, el ejercicio de intercomparación llevado a cabo en el año 2013, organizado por el CSN sobre una matriz de aire.

Los criterios de evaluación para este ejercicio han sido:

Z-score individual

La clasificación z se realiza por comparación de la desviación de cada laboratorio (diferencia entre el valor informado por el laboratorio y el valor de referencia) con la desviación estándar para la evaluación de la ejecución del laboratorio “adecuada al fin” (valor establecido como objetivo de calidad para cada análisis/radionucleido). El valor de z se obtiene mediante la siguiente expresión[13]:

$$z = \frac{(x - X)}{\sigma_p} \quad [4.1]$$

En donde:

x: Resultado de las determinaciones de los laboratorios.

X: Valor de referencia de la actividad del radionucleido en cuestión (la mejor estimación del mensurando), obtenido como mediana de los resultados de los laboratorios.

σ_p : Desviación estándar para evaluación de la ejecución de los laboratorios “adecuada al fin”; representa la precisión analítica aceptable para la concentración de estudio.

El valor de z obtenido se evalúa siguiente el siguiente criterio:

- $|z| \leq 2$ satisfactorio
- $2 < |z| < 3$ aceptable
- $|z| \geq 3$ no satisfactorio

z(ML) robusta

La z(ML) se calcula substrayendo del valor de cada laboratorio la mediana de los laboratorios participantes y dividiendo por la desviación estándar robusta, DER:

$$z(ML) = \frac{(x - ML)}{DER} \quad [4.2]$$

La evaluación de los valores de $z(\text{ML})$ obtenidos (puntuación individual por análisis/radionucleido) es la misma que para el z -score [13].

A continuación, en la Tabla 4-1, se muestran los valores de la intercomparación del año 2013 para el LRA-UDC:

Tabla 4-1 Resultados intercomparación CSN año 2013 [13]

	Actividad LRA-UDC (Bq/filtro)	Incertidumbre LRA-UDC (Bq/filtro)	Valor de referencia (Bq/filtro)	Incertidumbre de referencia (Bq/filtro)	z	$Z(\text{ML})$
Actividad α	0,046	0,005	0,056	0,021	-0,96	-0,47
Actividad β	1,41	0,04	1,27	0,11	0,63	1,25

En el ejercicio de intercomparación del año 2013 han participado 26 laboratorios. El LRA-UDC se corresponde con el laboratorio 23.

A continuación en la Figura 4-6 y Figura 4-7 se muestran la representación gráfica de los resultados de los distintos laboratorios participantes en el ejercicio de intercomparación del CSN [13].

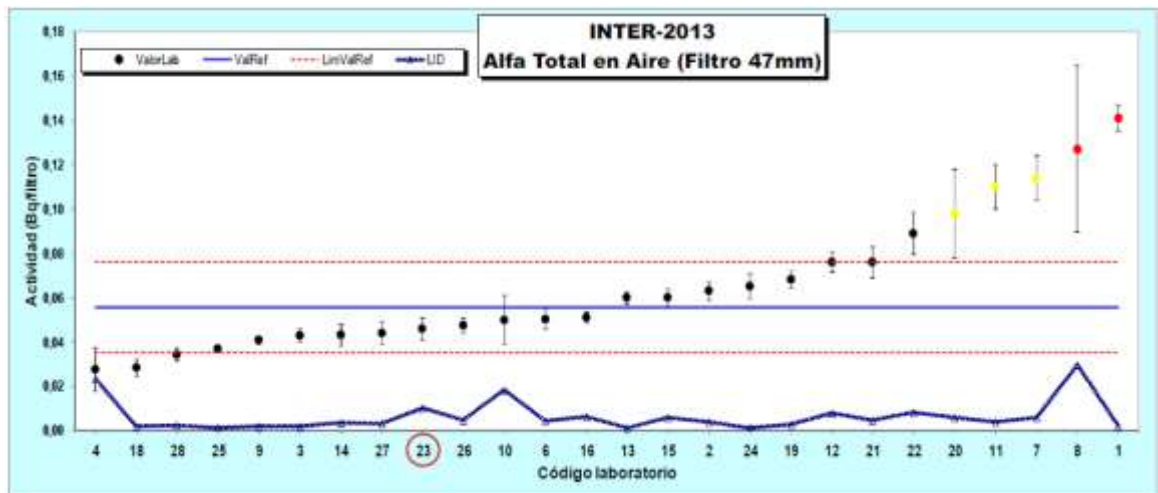


Figura 4-6 Resultados intercomparación actividad alfa 2013 (CSN) [13].

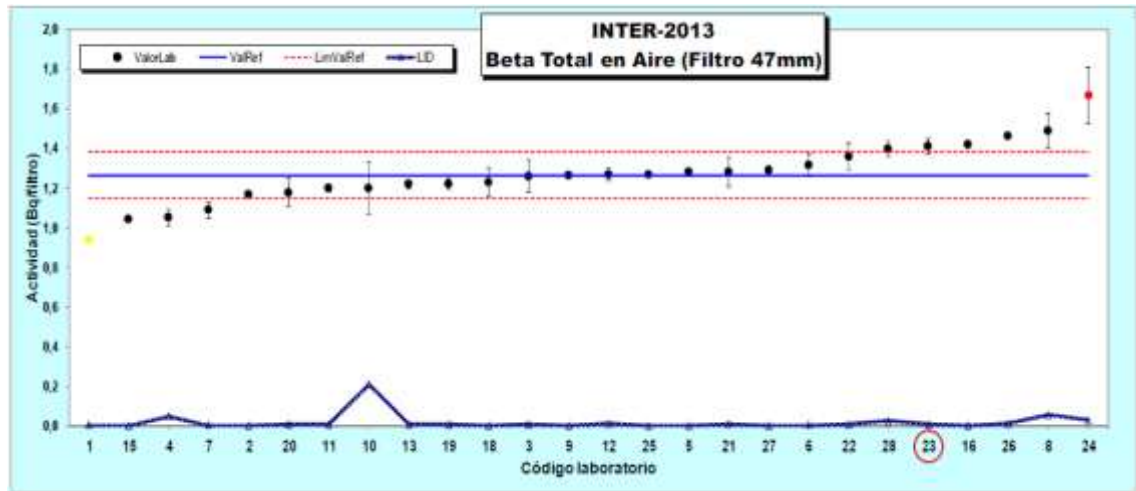


Figura 4-7 Resultados intercomparación actividad alfa 2013 (CSN) [13].

4.3 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ^7Be

Para determinar la concentración de ^7Be se emplea espectrometría gamma.

Semanalmente se recoge una muestra (mediante un filtro de fibra de vidrio de 4,7 cm de diámetro) que se almacena en un desecador hasta tener todos los filtros correspondientes a un periodo mensual (4 o 5 filtros cada mes).

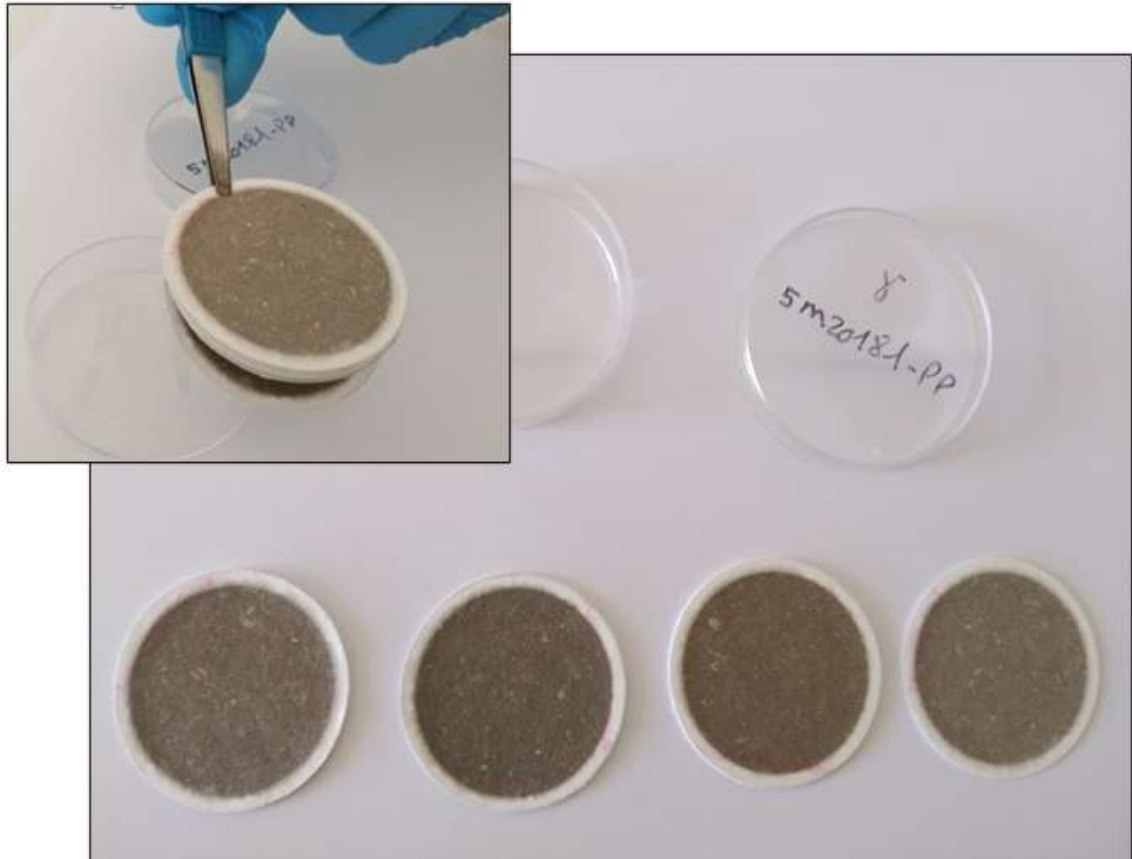


Figura 4-8 Filtros para la determinación mensual de ^7Be .

Una vez reunidos los filtros del mes (Figura 4-8), se colocan en una placa petri con un diámetro de 55 mm que se dispone a una distancia de 3,6 cm del detector gamma. La concentración de ^7Be se determina a partir de la línea γ 477,7 keV, usando un detector de HPGe 60% modelo GX6020 (Canberra, EE. UU.) Con un preamplificador (modelo CSL Canberra 2002) y modelo DSA 1000 de ADC (Canberra, EE. UU.). La resolución en energías es de 2,0 KeV para la energía de 1,33 MeV del ^{60}Co y de 1,0 para el de 122 KeV del ^{57}Co , la eficiencia relativa es del 60% y la relación fotopico / Compton es de 67: 1 [14].

El equipo para la determinación de la concentración de ^7Be se calibra midiendo patrones estándar preparados con la misma geometría que las muestras a analizar.

Para crear la curva de calibración, se emplea un patrón líquido estándar gamma que contiene ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , y ^{88}Y . La fuente es suministrada por el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). El tiempo de medida para las muestras y los blancos es de 165600 segundos, similar al procedimiento seguido en otros laboratorios españoles [15].

La calidad de los resultados está asegurada, debido a que el laboratorio participa en ejercicios de intercomparación organizados por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), con buenos resultados.



Figura 4-9 Detector gamma empleado para determinación de ^7Be .

4.4 PARÁMETROS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVOS

Las muestras de actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be se han analizado para determinar los parámetros analíticos descriptivos que mejor representan su presencia en la atmósfera, y a su vez, obtener una distribución característica de los mismos.

En la Tabla 4-2 se muestra el número de casos probados (N), los valores máximos y mínimos de cada uno de los parámetros analizados, así como su media aritmética (A.M), mediana, asimetría y curtosis.

Los valores para mínimo, máximo, media aritmética y mediana se dan en unidades Bqm^{-3} .

Tabla 4-2 parámetros descriptivos para alfa, beta y ^7Be .

	Actividad alfa	Actividad beta	^7Be
N	567	567	132
Mínimo	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-4}$
Máximo	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$3,74 \cdot 10^{-3}$	$7,52 \cdot 10^{-3}$
Media aritmética	$3,94 \cdot 10^{-5}$	$5,86 \cdot 10^{-4}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$
Mediana	$3,52 \cdot 10^{-5}$	$4,88 \cdot 10^{-4}$	$4,48 \cdot 10^{-3}$
asimetría	1,93791	2,30851	0,00093
Curtosis	5,74099	10,75928	-0,14754

Los datos conocidos en actividades alfa y beta y concentración de ^7Be se han representado para apreciar la forma de su distribución mediante histogramas (Figura 4-10 y Figura 4-11).

En el histograma de beta no se representa el valor máximo por tratarse de un valor extremo muy alejado de los demás. Ambas distribuciones son unimodales asimétricas positivas y leptocúrticas, tal como reflejan los valores de asimetría y curtosis de la Tabla 4-2, por ello sus histogramas presentan una larga cola a la derecha y una gran densidad de valores agrupados en torno a los valores inferiores.

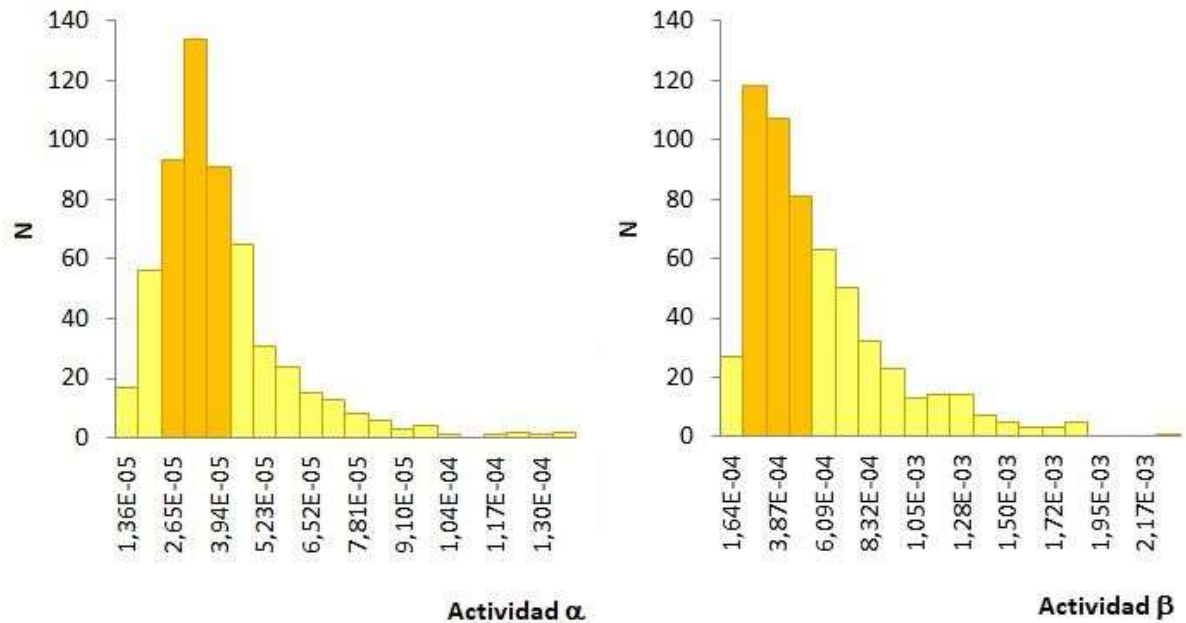


Figura 4-10 Histogramas de frecuencia para actividad alfa y actividad beta.

En ambos casos ni la media, ni la mediana son representativas de lugares de máxima concentración de valores. En particular para alfa el 50% de los valores más agrupados se encuentra en el intervalo $[2.37, 4.00] \cdot (10^{-5})$, lo que supone sólo un 13% del rango de valores totales que toma alfa.

Por su parte el 50% de los valores más agrupados de beta corresponde al intervalo $[2.45, 5.37] \cdot (10^{-4})$, que representa un 8% del rango de valores totales que toma beta. La posición de estos intervalos, tanto en el caso de actividad beta como de actividad alfa, se señala en el histograma con color más oscuro.

La distribución de alfa presenta un total de 35 datos atípicos superiores, y la de beta un total de 30, estos datos se han considerado válidos y no debidos a medidas erróneas.

En la Figura 4-11 se presenta el histograma de la concentración de ^7Be . Se puede apreciar que se trata de una distribución bimodal en la que ambas modas se marcan en color más oscuro.

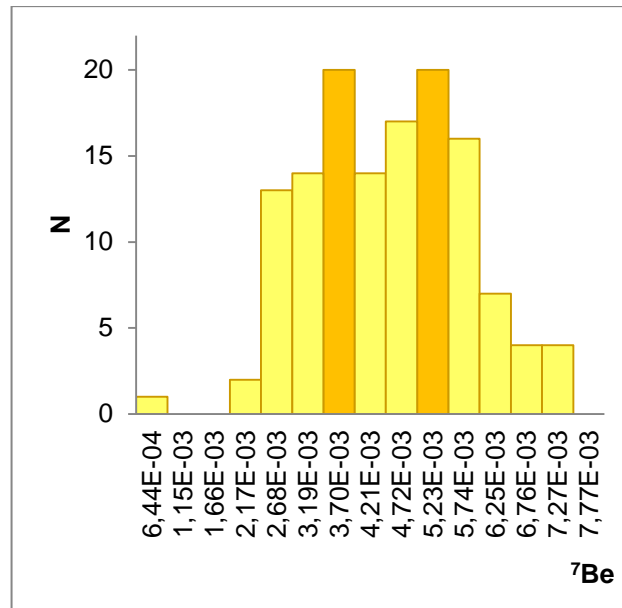


Figura 4-11 Histograma de la concentración ^7Be .

Los datos de la Tabla 4-2 indican que la distribución de la concentración de ^7Be presenta una alta simetría, y que es ligeramente platicúrtica.

La bimodalidad puede explicarse a partir de la serie temporal de datos representada en la Figura 4-12, en la que puede apreciarse que hasta enero de 2012 hay un predominio de los valores por encima de la línea de $4,00 \cdot 10^{-3} \text{ Bqm}^{-3}$, y a partir de ese momento los valores más frecuentes se encuentran por debajo de la misma. Un comportamiento de la concentración de ^7Be similar al estudiado a partir de los datos obtenidos en el LRA-UDC se ha encontrado en otras partes del mundo como Reino Unido [16], en donde también ha bajado el rango en el que se encuentran las concentraciones medidas de ^7Be .

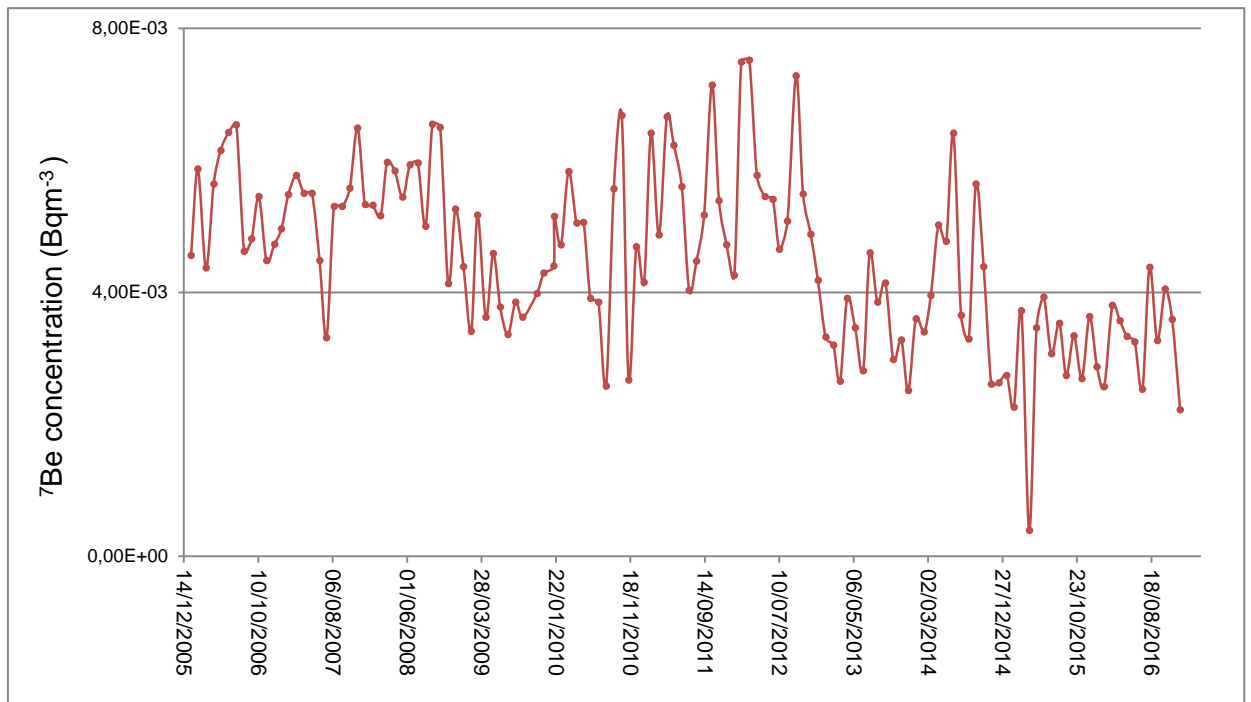


Figura 4-12 Evolución de la concentración de ^7Be .

4.5 EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS RADIATIVOS ENTRE 2006-2016

A partir de todas las medidas de actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be en el periodo 2006-2016 se ha realizado la media aritmética anual de cada parámetro, para así poder observar si existe algún tipo de cambio en su comportamiento durante los 11 años estudiados.

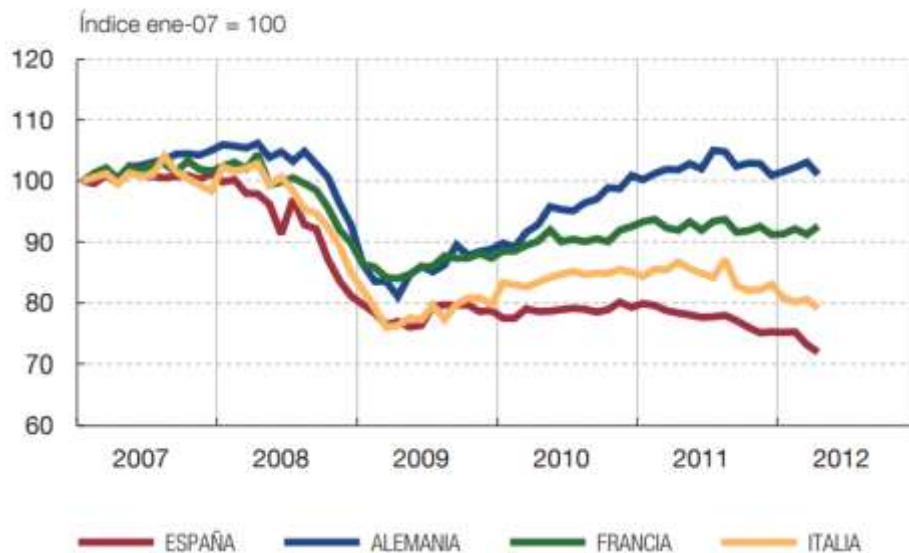


Figura 4-13 Índice de producción industrial. Fuente: Eurostat.

En la Figura 4-14 se puede observar que en los años 2007-2008 se ha producido una disminución de las muestras que pueden estar asociadas al inicio de la crisis económica en España. Con el inicio de la crisis económicas la actividad industrial en España cayó cerca de un 30% (al igual que en otros países como Francia, Italia o Alemania)[17](Figura 4-13). Dicha caída en la actividad industrial repercute en el comportamiento de alfa y beta, ya que al producirse menos, la contaminación emitida a la industria es inferior y por tanto produce una disminución de actividad alfa y actividad beta. Al observar la Figura 4-13 y Figura 4-14 se puede comprobar que existe una semejanza real entre el comportamiento de los parámetros de estudio y el decaimiento de la actividad industrial a causa de la crisis.

Por otra parte, se puede observar en la Figura 4-14 que aproximadamente en el año 2011 hay una subida drástica de los parámetros de estudio. Este aumento puede estar originado a causa del accidente nuclear de Fukushima. Los radionúclidos de yodo y cesio producidos por los reactores nucleares en el accidente de Fukushima se transportador hasta Europa a través del océano

Pacífico, cruzando Norte América y finalmente el océano Atlántico. A causa de la distancia entre el lugar del accidente y Europa, la nube radiactiva llegó a España muy diluida y con una actividad relativamente baja [18]. Los valores de actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be tras el accidente nuclear anteriormente mencionado (alrededor de 3 semanas) aumentaron en torno a un 50% su valor de medida. No obstante, dichos valores no han llegado a elevarse lo suficiente como para suponer riesgo alguno para la salud [18].

En 2014 se produjo un débil recuperación de la economía española, lo que debería repercutir en la Figura 4-14 con un aumento de los parámetros de estudio. No obstante, en esta misma época ha comenzado la aplicación, por parte de la industria, del Programa de Acción sobre el Medio Ambiente de la UE 2020, lo que contribuye a una disminución de emisiones por parte de las empresas, y como consiguiente una disminución de actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be . Al transcurrir simultáneamente ambos efectos, se observa que se traduce en la Figura 4-14 como una estabilidad en los valores registrados en el LRA-UDC para la actividad de alfa, beta y ^7Be .

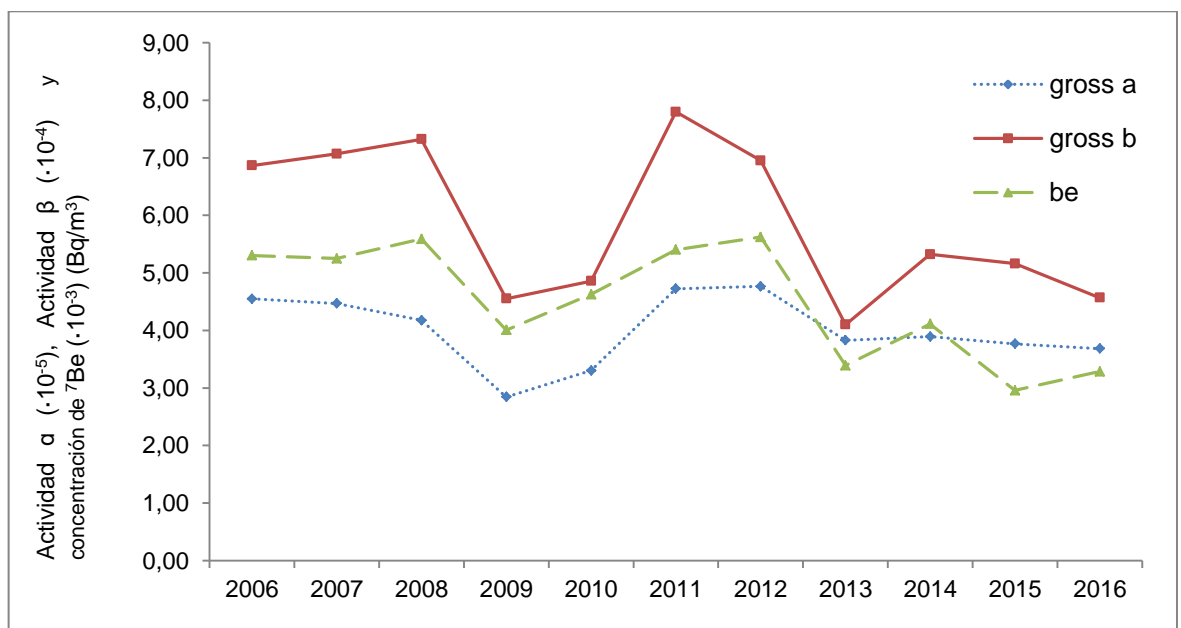


Figura 4-14 Evolución de los parámetros radiactivos (2006-2016).

4.6 VARIACIÓN ESTACIONAL DE LOS PARÁMETROS RADIATIVOS EN LA EUP

Al estudiar el registro de medidas realizadas para la actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be se ha observado que existe una variación estacional en el rango de medida de dichos parámetros.

En la Figura 4-15 se muestra a modo de ejemplo la variación del comportamiento de la actividad alfa y actividad beta durante el año 2012. Se puede observar que al inicio del año los valores registrados son más altos, pero con la llegada del buen tiempo (abril-mayo) estos valores decaen notablemente, volviéndose a elevar con la llegada del otoño (finales de septiembre-octubre).

Para comprobar la veracidad del comportamiento estacional anteriormente descrito se han realizado la representación del diagrama de caja para cada uno de los parámetros de estudio (Figura 4-16 y Figura 4-17). Para realizar dichos diagramas se ha realizado la media aritmética mensual para todos los meses comprendidos entre 2006-2016. A continuación, se han agrupado los meses en estaciones de acuerdo al siguiente criterio:

- Invierno: enero, febrero y marzo
- Primavera: abril, mayo y junio
- Verano: julio, agosto y septiembre
- Otoño: octubre, noviembre y diciembre

Una vez se han agrupado los datos en 4 periodos diferentes, mediante el empleo del programa estadístico SPSS se ha realizado la representación de los diagramas de cajas y bigotes pertinentes para cada uno de los parámetros analizados (actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be).

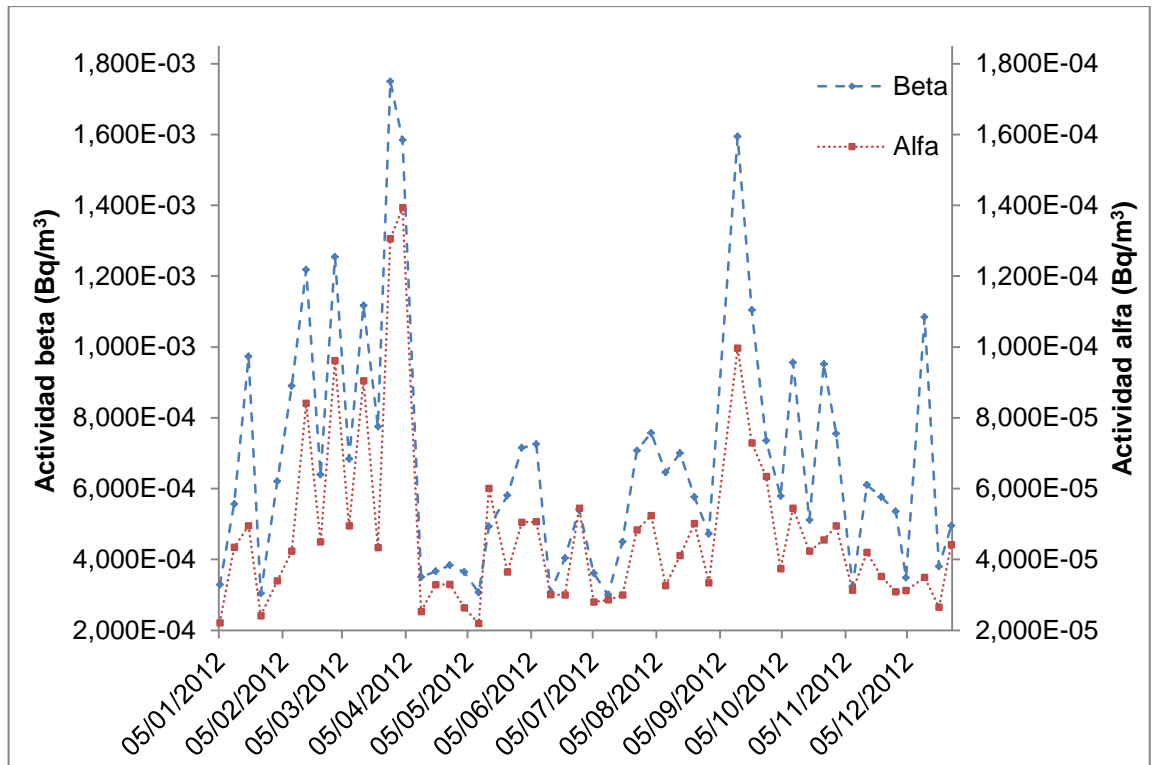


Figura 4-15 Variación de la actividad alfa y actividad beta durante el año 2012.

En la Figura 4-16 y Figura 4-17 se puede observar que los valores máximos de actividad se registran en los meses de invierno tanto para actividad alfa como para actividad beta, comportamiento lógico, dado que existe una relación de regresión entre ambas actividades de en torno a $R^2=0,8$. En el caso del año 2012, la recta de regresión para la actividad alfa/beta a partir de la media aritmética mensual es $R^2=0,88$ (ver Figura 4-18). En los meses de verano se registran los mínimos valores para la actividad alfa y actividad beta. Los resultados obtenidos a partir de los datos facilitados por el LRA-UDC concuerdan con los descritos por otros autores en ciudades como Milán [19], Nueva York [20] o China [21]. Sin embargo, otros estudios realizados en zonas próximas al mediterráneo [11][22][23][24][25][26] el comportamiento observado ha sido el opuesto al estudiado en Galicia, obteniéndose los valores máximos de actividad en los meses de verano.

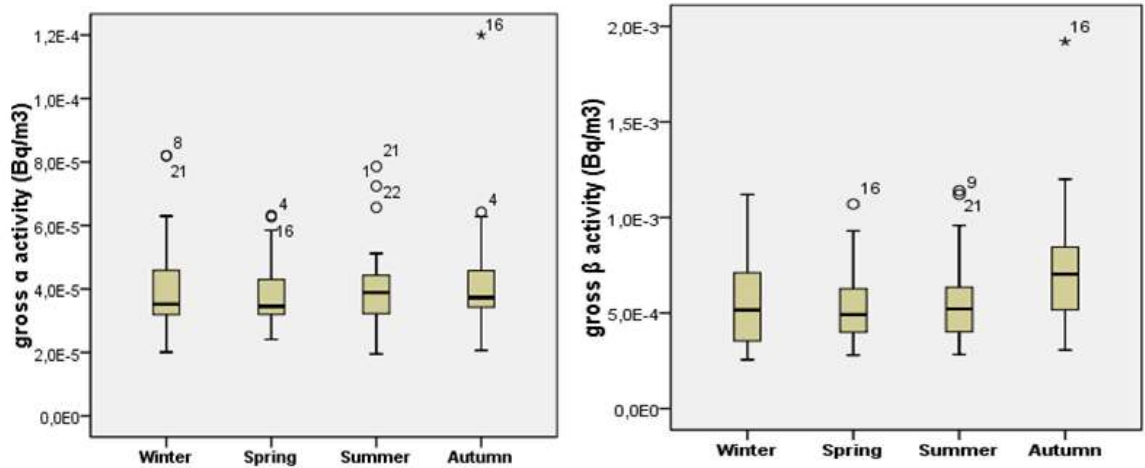


Figura 4-16 Diagrama de caja actividad alfa (izq.) y actividad beta (dcha.)

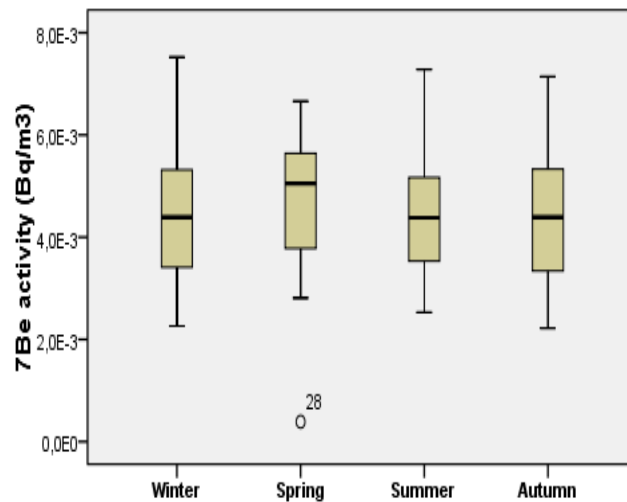


Figura 4-17 Diagrama de caja y bigotes para la concentración de ^7Be .

En el estudio de la variación la concentración de ^7Be no se muestra una distribución estacional tan clara como en el caso de la actividad alfa o actividad beta (Figura 4-17). Los valores mínimos se registran durante los meses de verano, al contrario que la actividad alfa y actividad beta, y los máximos durante la primavera. En otro estudio realizado en la ciudad de Málaga [27], se ha encontrado un comportamiento del ^7Be similar al analizado en Galicia, con valores máximos en los meses primaverales.

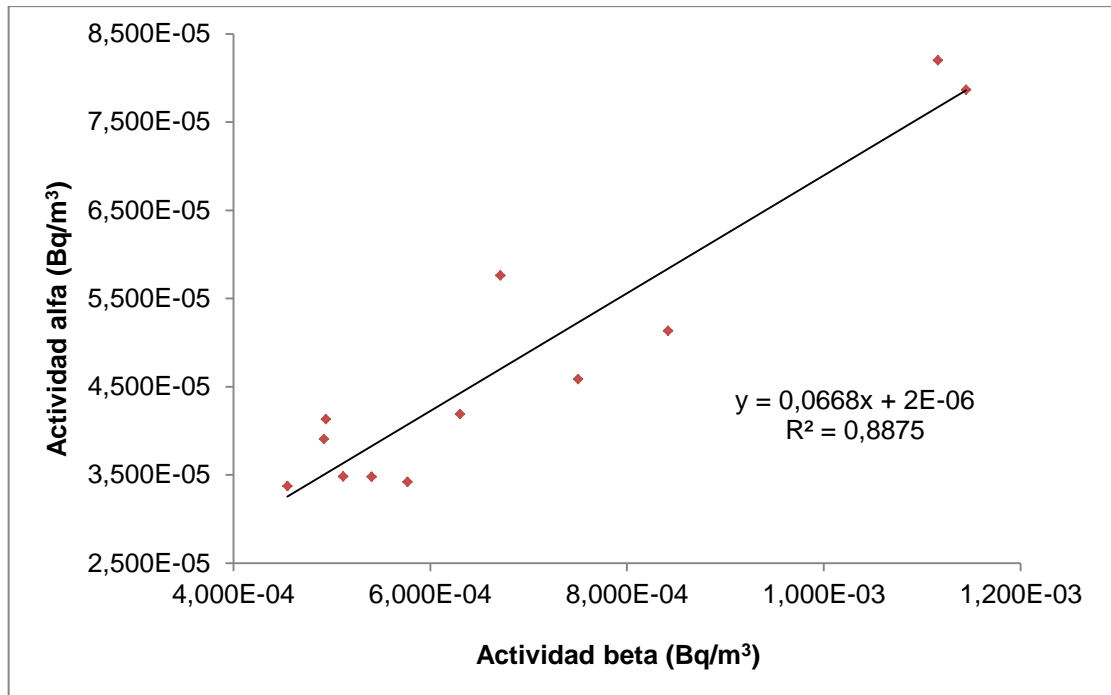


Figura 4-18 Recta de regresión actividad alfa/beta para el año 2012.

4.7 ANÁLISIS DE PARÁMETROS RADIATIVOS, METEOROLÓGICOS Y CONTAMINANTES

En el estudio del comportamiento de los parámetros alfa, beta y ^7Be se ha observado, en números estudios, que los factores meteorológicos tienen un papel fundamental en la distribución de las partículas provenientes de aerosoles [17] [24].

Al mismo tiempo, en el presente estudio, se ha realizado un análisis de la influencia de algunos contaminantes ambientales, encontrándose una relación directa entre ambos, lo que permite abrir una nueva puerta de investigación a la hora de tratar de predecir el comportamiento de la partículas alfa, partículas beta y ^7Be .

Los factores meteorológicos y factores contaminantes atmosféricos, como NO_2 o SO_2 , se han estudiado con el objetivo de elaborar modelos empíricos capaces de predecir períodos de posible contaminación radiactiva.

Con el fin de identificar la relación existente entre los factores meteorológicos y contaminantes y la actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be , se han correlacionado con los diferentes parámetros de contaminación atmosférica y parámetros meteorológicos.

Los datos empleados para realizar la correlación anteriormente citada han sido facilitados por Meteogalicia (Estación CIS). Dicha estación se encuentra ubicada en A Cabana, a una distancia de aproximadamente 750 m del lugar de muestreo (Escuela Politécnica Universitaria da Universidade da Coruña) (ver Figura 4-19).

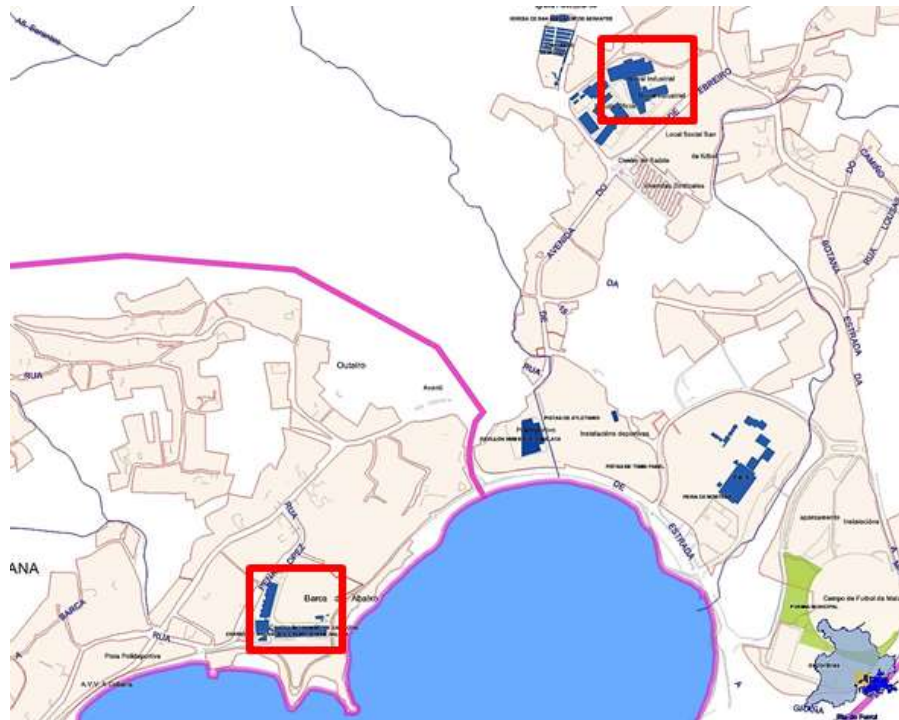


Figura 4-19 Distancia entre la EUP y la estación meteorológica CIS.

El viento es uno de los factores meteorológicos que mayor influencia tienen en las partículas alfa y beta, ya que, en cierto modo, es su medio de transporte. Tanto la dirección del viento como su velocidad son dos factores que influyen en la cantidad de actividad detectada en el LRA-UDC. No obstante, en el estudio del comportamiento de alfa, beta y ^7Be no se ha empleado el parámetro dirección de viento. Sin embargo, este parámetro ha sido analizado a lo largo de los 11 años de toma de muestras en el LRA-UDC. Tras ello, se puede esclarecer que el viento predominante en el área de estudio es noreste (NE), sin embargo, existe viento suroeste (SW) puntualmente (véase Figura 4-20).

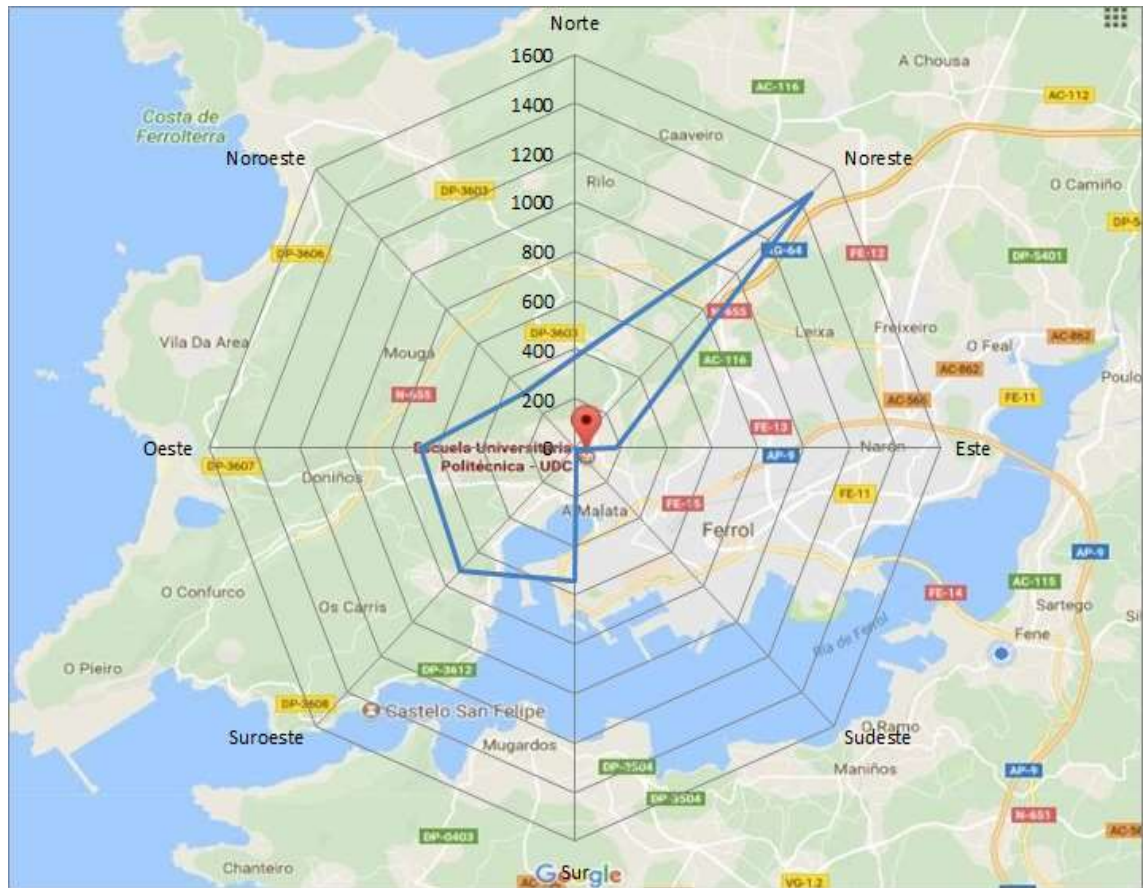


Figura 4-20 Frecuencia de vientos en la EUP.

Inicialmente, se ha analizado la regresión simple existente entre la actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be en relación a los factores meteorológicos y contaminantes mediante el empleo del programa estadístico SPSS (Tabla 4-3).

Una vez conocida la relación uno a uno de los distintos parámetros, es posible realizar una regresión múltiple para determinar qué parámetros tienen mayor influencia en las partículas de estudio [11] [9]. A continuación, a partir de los datos de regresión de los distintos parámetros, ha sido posible elaborar un modelo de comportamiento para la actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be .

Para elaborar el modelo se ha empleado el promedio semanal de los diferentes parámetros meteorológicos y de contaminación. A continuación, se enumeran los parámetros utilizados en este estudio para la realización del modelizado.

- Temperatura máxima (°C)(T)
- Promedio de humedad relativa semanal a 1.5m (%) (H)
- Promedio de presión semanal (hPa)(P)
- Promedio de precipitación semanal (L/m²) (LL)
- Velocidad promedio semanal del viento a 10 m (km/h) (W)
- Concentración promedio semanal de NO₂ (µg/m³)(NO₂)
- Concentración promedio de SO₂ (µg/m³) (SO₂).

A continuación se muestran, en la Tabla 4-3, las correlaciones de Pearson para la actividad alfa, actividad beta y concentración de ⁷Be y factores atmosféricos y contaminantes previamente descritos. Los valores de correlación entre los contaminantes y los parámetros meteorológicos nos permiten identificar en qué medida el parámetro influye en la actividad alfa, beta y ⁷Be, respectivamente.

Existe una fuerte correlación global entre la actividad alfa y la actividad beta ($r = 0.79$), lo cual indica que el origen de ambas partículas está directamente relacionadas. En otros estudios similares se hallaron valores de r en torno a 0,72-0,88 [28][29][9], de manera que el comportamiento de alfa y beta es similar al encontrado en Ferrol.

Tabla 4-3 Correlaciones de Pearson.

	T	H	P	LL	W	NO ₂	SO ₂
Actividad α	0,267	-0,142	0,051	-0,246	-0,168	0,263	0,218
Actividad β	0,238	-0,147	0,044	-0,327	-0,354	0,334	0,465
[⁷Be]	0,296	-0,319	-0,250	-0,283	-0,034	0,006	0,426

En base a la Tabla 4-3 se puede observar que se ha encontrado una correlación positiva entre la temperatura máxima y la actividad alfa y actividad beta. Un comportamiento similar se ha hallado en otros estudios similares realizados en ciudades como Valencia [9] o Málaga [11].

Por otra parte, la humedad relativa y la velocidad del viento representan una relación inversamente proporcional a los parámetros de análisis (actividad alfa, actividad beta y concentración ⁷Be). Esta correlación con la humedad relativa se

debe a la alta humedad presente en Galicia. Un comportamiento similar se ha observado en otros estudios en donde la actividad alfa, actividad beta y concentración de ^7Be decrece con la precipitación ya que al llover el aire se limpia y precipitan las partículas en suspensión en el mismo [29] [9].

Al mismo tiempo, existe una correlación directamente proporcional de los factores estudiados y contaminantes ambientales como son el SO_2 o NO_2 . Esta relación indica que el aumento de la contaminación ambiental aumenta la presencia de partículas tales como alfa, beta o ^7Be .

4.8 MODELIZADO DE PARÁMETROS RADIACTIVOS EN FERROL

Con el fin de encontrar qué factores contaminantes y meteorológicos tienen la mayor influencia en las partículas alfa, partículas beta y concentración de ^7Be , se ha desarrollado un análisis de regresión múltiple en el programa SPSS.

Las variables se han seleccionado en orden de mayor a menor importancia en función de su coeficiente de regresión lineal [11]. En todos los modelos descritos a continuación, Tabla 4-4, Tabla 4-5 y Tabla 4-6, se emplea un intervalo de confianza del 95%. Los datos para la realización del ajuste del modelo se tomaron entre los años 2009-2016.

Tabla 4-4 Modelo para actividad alfa.

ECUACIONES DE REGRESIÓN	R
$A_{\alpha} \cdot (10^{-5}) = (2,993 \pm 0,177) + (0,100 \pm 0,018) \cdot \text{NO}_2$	0,265
$A_{\alpha} \cdot (10^{-5}) = (2,224 \pm 0,337) + (0,081 \pm 0,019) \cdot \text{NO}_2 + (0,232 \pm 0,086) \cdot \text{SO}_2$	0,293
$A_{\alpha} \cdot (10^{-5}) = (2,797 \pm 0,352) + (0,076 \pm 0,019) \cdot \text{NO}_2 - (0,188 \pm 0,085) \cdot \text{SO}_2$ $- (0,015 \pm 0,003) \cdot \text{LL}$	0,362
$A_{\alpha} \cdot (10^{-5}) = -(0,921 \pm 0,555) + (0,088 \pm 0,019) \cdot \text{NO}_2 + (0,151 \pm 0,084) \cdot \text{SO}_2$ $- (0,008 \pm 0,004) \cdot \text{LL} + (0,095 \pm 0,022) \cdot$	0,411

Tabla 4-5 Modelo para actividad beta.

ECUACIONES DE REGRESIÓN	R
$A_{\beta} \cdot (10^{-4}) = (2,657 \pm 0,300) + (0,325 \pm 0,030) \cdot \text{NO}_2$	0,465
$A_{\beta} \cdot (10^{-4}) = (0,723 \pm 0,565) + (0,276 \pm 0,032) \cdot \text{NO}_2 + (0,582 \pm 0,145) \cdot \text{SO}_2$	0,496
$A_{\beta} \cdot (10^{-4}) = (2,049 \pm 0,576) + (0,266 \pm 0,031) \cdot \text{NO}_2 - (0,481 \pm 0,139) \cdot \text{SO}_2$ $- (0,034 \pm 0,005) \cdot \text{LL}$	0,562
$A_{\beta} \cdot (10^{-4}) = -(0,427 \pm 0,917) + (0,282 \pm 0,031) \cdot \text{NO}_2 + (0,432 \pm 0,138) \cdot \text{SO}_2$ $- (0,025 \pm 0,006) \cdot \text{LL} + (0,125 \pm 0,036) \cdot \text{T}$	0,579

Tabla 4-6 Modelo para concentración ${}^7\text{Be}$.

ECUACIONES DE REGRESIÓN	R
${}^7\text{Be} \cdot (10^{-3}) = (0,492 \pm 0,716) + (0,922 \pm 0,176) \cdot \text{SO}_2$	0,474
${}^7\text{Be} \cdot (10^{-3}) = (7,327 \pm 2,488) + (0,818 \pm 0,174) \cdot \text{SO}_2 - (0,079 \pm 0,028) \cdot H$	0,536
${}^7\text{Be} \cdot (10^{-3}) = (6,132 \pm 2,645) + (0,801 \pm 0,174) \cdot \text{SO}_2 - (0,061 \pm 0,031) \cdot H$ $- (0,002 \pm 0,002) \cdot LL$	0,548
${}^7\text{Be} \cdot (10^{-3}) = (41,304 \pm 28,328) + (0,789 \pm 0,173) \cdot \text{SO}_2 - (0,041 \pm 0,031) \cdot H$ $- (0,003 \pm 0,002) \cdot LL - (0,036 \pm 0,029) \cdot P$	0,559

La determinación del coeficiente calculado en el ajuste del modelo (R^2) es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson (véase Tabla 4-4, Tabla 4-5 y Tabla 4-6), e indica la proporción de variación del parámetro de análisis respecto a la variación de las variables ambientales y contaminantes.

En otros estudios realizado de han encontrado valores de R^2 similares o incluso inferiores, como en Málaga [11] con un $R=0,25$ en el caso de actividad beta , por ejemplo. Sim embargo, en otras estudios realizados en el sur de España [9] [26] se han encontrado mejores correlaciones, con un $R=0,62$ y $R=0,59$, para la actividad beta, respectivamente.

No obstante, hay que tener en cuenta que el resto de estudios mencionados, en ningún caso de emplean la factores contaminantes (SO_2 y NO_2), sino que se basa únicamente en la influencia meteorológica.

El resultado del modelizado llevado a cabo en el presente estudio representa el comportamiento de la actividad alfa, actividad beta y concentración de ${}^7\text{Be}$ en el área norte de España. La baja correlación obtenida para el parámetro alfa, con respecto a beta y concentración de ${}^7\text{Be}$, se debe a que en el lugar donde se toma la muestra (Figura 4-21), con frecuencia, la partícula alfa no muestra actividad, lo que implica que se toma el valor límite de detección como el valor para la realización de los cálculos numéricos.



Figura 4-21 Caseta de toma de muestras de aerosoles.

El clima oceánico en el área donde se realizó el estudio, con lluvias estables durante todo el año, provoca la disminución de la correlación entre los parámetros ambientales y los parámetros de estudio. Un comportamiento similar se ha encontrado en Valencia [9] durante el verano, cuando las medidas se toman en condiciones estacionarias.

5 RADÓN

El radón es un gas noble de origen natural que no presenta color, olor ni sabor. Su origen radica en la descomposición radiactiva natural del uranio, el cual es un elemento químico muy activo, capaz de asociarse y desplazarse en combinación con otros [30]. El gas radón está presente de manera natural en casi todas las rocas del planeta en pequeñas proporciones (partes por millón, ppm), pero varía según el tipo de suelo [31]. Es posible que el radón esté presente también en el agua [32] [33].

El radón se filtra con facilidad del suelo y se introduce en el aire, donde se produce su desintegración dando lugar a productos de duración corta (descendientes del radón) [33]. Estos, al descomponerse emiten partículas alfa radiactivas que se adhieren a aerosoles, polvo y otros elementos suspendidos en el aire [33]. Cuando se respira e inhalan las partículas anteriormente mencionadas, las partículas se depositan en las células que recubren las vías respiratorias, pudiendo provocar cáncer de pulmón al dañar el ADN [32].

Periodo	Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1	H																		He
2	1	Li	Be											B	C	N	O	F		Ne
3	1	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar
4	1	K	Ca	Sc	Ti									V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
5	1	Rb	Sr	Y	Zr									Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag
6	1	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Xe
7	1	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uuq	Uuq	Uuh	Uuh	Uuo	Uuo	Uuo
				Actínidos																
				Actínidos																

Figura 5-1 Situación del gas radón en la tabla periódica.

Según la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA), tras el tabaco, el gas radón se encuentra en el segundo causante de cáncer de pulmón, provocando la muerte de 21.000 personas cada año en Estados Unidos [34].

El radón se diluye de manera rápida cuando se encuentra al aire libre. Normalmente presenta concentraciones bajas que no suponen problema alguno para el ser humano. El promedio de concentración de radón en el aire libre varía entre 5 Bq/m^3 y 15 Bq/m^3 [32]. Sin embargo, las concentraciones de gas radón en lugares cerrados son más elevadas, especialmente en sitios como son las minas, cuevas y plantas de tratamiento de aguas[32].

En edificios (como viviendas, escuelas y oficinas), la concentración de gas radón varía de $<10 \text{ Bq/m}^3$ hasta más de $10\ 000 \text{ Bq/m}^3$ [32]. En este tipo de instalaciones al no haber movimiento de aire el radón no se diluye rápidamente, y por lo tanto es necesario conocer su valor para poder efectuar medidas de mitigación, en el caso de ser necesarias.

5.1 HISTORIA Y ANTECEDENTES AL RADÓN

Antes de descubrirse la radiactividad y sus efectos sobre nuestro organismo, algunos científicos de la época ya habían vaticinado sobre los elementos radiactivos. En el año 1556, un científico conocido como Agrícola, realizó el primer estudio acerca de la explotación de minas y la metalurgia. En el exponía que existía una alta incidencia entre los trabajadores de una mina de peblendas situada en Checoslovaquia, de enfermedades pulmonares mortales, de manera que en la mina se encontraba la radiactividad y el radón, pero Agrícola no estaba en condiciones de poder reconocer estos términos en la época [35].



Figura 5-2 Descendientes del Uranio

Se conocen desde el siglo XVI datos de la existencia de una mayor mortalidad en determinados trabajadores de minas subterráneas en Europa a causa de una enfermedad respiratoria. Sin embargo, en aquella época no estaban en condiciones de terminar que aquella enfermedad era lo que hoy se conoce como cáncer pulmonar [36].

Se empezó a creer que el radón podía influir en estas enfermedades respiratorias de los mineros en el siglo XX, siendo en 1950 cuando se confirma que existe una relación causal entre el cáncer pulmonar y el radón [36].

Los primeros efectos nocivos de las radiaciones fueron observados las minas de uranio, más concretamente en sus trabajadores. [35].

A partir de la Segunda Guerra Mundial fue necesario emplear uranio como principal combustible de las centrales nucleares, y por tanto que aumentó el número de trabajadores expuestos al radón en las mina. Fue por tanto, el desarrollo de la industria nuclear sobre el que subyace el problema del radón y en donde aparece la opinión pública acerca del mismo [35].

Se ha mostrado en numerosos estudios realizados a trabajadores de minas subterráneas (expuestos al radón) que existe un aumento del riesgo de padecer un cáncer pulmonar en fumadores y no fumadores. Con fundamento en estas investigaciones el radón fue clasificado como carcinógeno humano, en 1988, por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer [36].

Desde la década de 1980 hasta la actualidad, se han desarrollado numerosas investigaciones para determinar una relación directa entre el radón en interiores y el cáncer de pulmón en la población.

De manera individual, los estudios son demasiado pequeños para demostrar una clara influencia del radón descartar el riesgo. Por ese motivo, los investigadores de los estudios más importantes realizados en Europa, Norteamérica y China juntaron todos sus datos y se volvió a realizar el estudio pero esta vez de manera conjunta ([37], [38] y [39]).

El estudio conjunto demostró que existe una clara evidencia entre el riesgo directo de padecer cáncer pulmonar y la exposición al radón (incluso a nivel doméstico). Al mismo tiempo se ha expuesto que pese a las bajas concentraciones no es posible descartar el riesgo de cáncer de pulmón, incluso para concentraciones inferiores a los 200 Bq/m³ (concentración límite de referencia en muchos países [36]).

En 1985, en Pensylvania, Stanley Watras iba a la central nuclear en la que trabajaba. En la central tenían como normal que a la entrada y a la salida los empleados atravesaran unos detectores de radiactividad para así controlar que ninguna sustancia radiactiva abandonara el recinto de la central sin el correspondiente permiso (Figura 5-3). Un día al entrar Stanley Watras la alarma se dispara y los trabajadores no dan crédito ya que el viene de su casa y no está saliendo con ninguna sustancia radiactiva. Lo que estaba ocurriendo es que el hombre venía contaminado de radón de su hogar, una contaminación del orden de cientos de veces superior al existente en las minas de uranio, y al atravesar los arcos de seguridad la alarma es capaz de detectar esta alta cantidad de radón y salta.

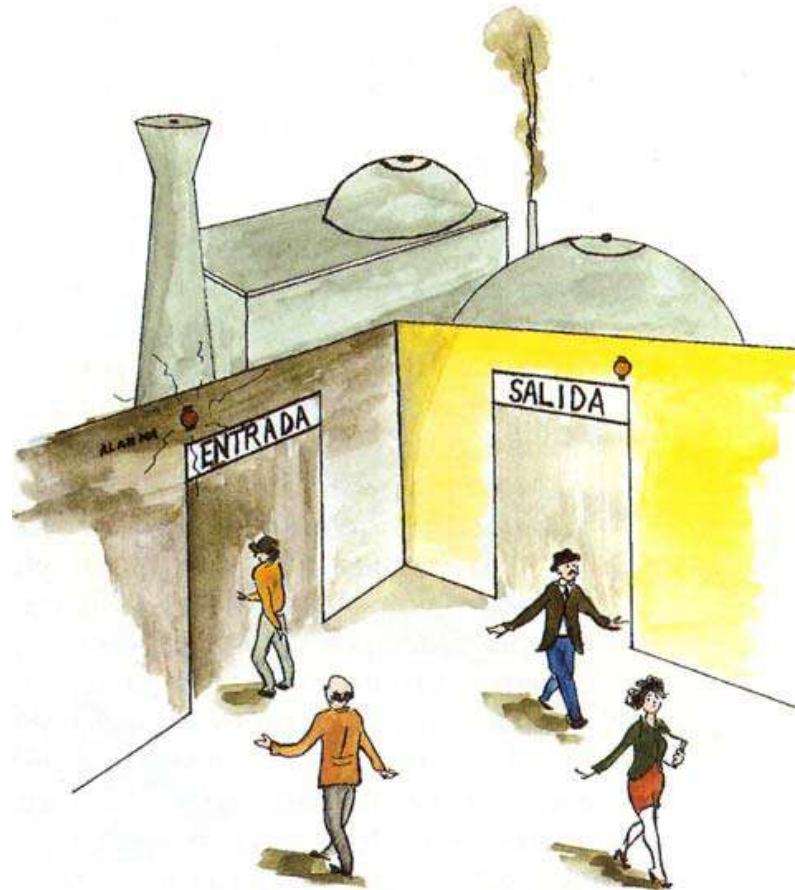


Figura 5-3 Entrada y salida de los trabajadores en una central nuclear [35].

5.2 ENTRADA DEL RADÓN EN EDIFICIOS

El radón normalmente se filtra desde el suelo al aire y se introduce en las viviendas a través de las grietas y otros agujeros existentes en los cimientos. El radón cuando se encuentra en espacios cerrados, en el interior del hogar, puede llegar a alcanzar valores muy elevados y por tanto peligrosos para el ser humano. Independientemente del hogar, ya sea una casa/edificio viejo o nuevo, con o sin sótano, esté correctamente sellada o no, es posible tener problemas de radón en su interior [34].

En ocasiones el radón se infiltra en las viviendas u edificios a partir del agua proveniente del pozo. Pese a que los materiales de construcción no causan problemas de radón por sí mismos, éstos pueden emitir radón en algunas viviendas[34]. A continuación se detallan una serie de lugares por los cuales puede introducirse el radón en edificios:

- Grietas en pisos sólidos.
- Juntas de la construcción.
- Grietas en las paredes.
- Espacios en los suelos suspendidos.
- Espacios alrededor de las cañerías de servicios.
- Cavidades en el interior de las paredes.
- Suministros de agua.



Figura 5-4 Zonas por las que penetra el Radón.

5.2.1 SUELOS

El terreno constituye la principal fuente de radón en construcciones, tanto en edificaciones aislada como en plantas bajas de edificios sin sótano.

La concentración de radón en el suelo se encuentra entre 10 y 50 Bq/kg (valor medio 40 Bq/kg), pudiendo alcanzar valores muy superiores. La concentración de

radón en suelos varían entre 10000 y 50000 Bq/ m³. En ocasiones, puede aumentar la cantidad de radón a causa de la existencia de una zona de desecho de materiales procedentes de minas como pueden ser de uranio o fosfatos [40].

La cantidad de Radón-226 en el subsuelo, así como la permeabilidad del mismo son los principales factores de los que depende la cantidad de radón que se introduzca a partir del suelo en el interior de la vivienda [40]. En la Figura 5-5 se puede observar como rocas fracturadas y suelos porosos permiten una mayor movilidad Radón facilitando su salida al exterior (izq.), mientras que un terreno compacto y con pocas grietas y poros impide la salida del radón al exterior (dcha.).

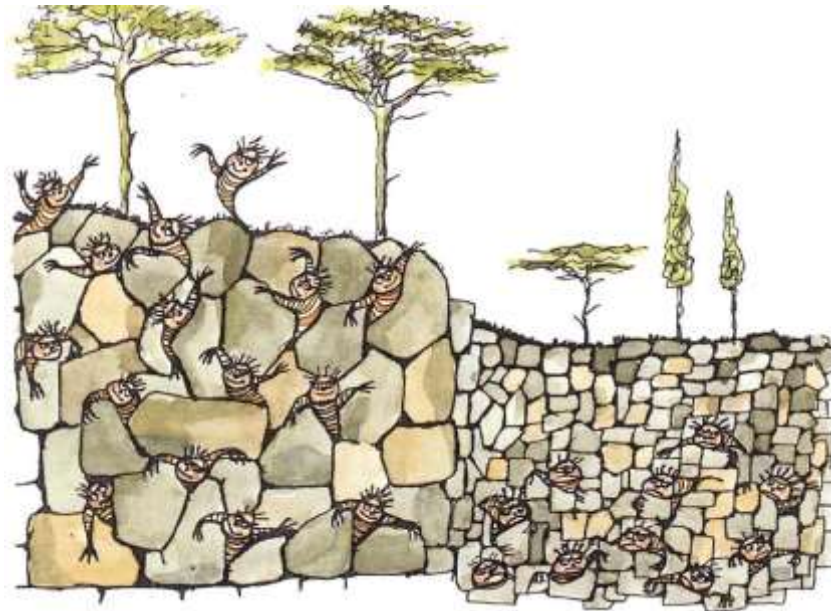


Figura 5-5 Suelo poroso (izq.). Suelo con pocas grietas (dcha.).

A través de difusión molecular se introduce el radón que proviene de los materiales y del terreno en el aire interior de edificios/viviendas. Inicialmente se produce la desintegración del radio, formándose una pequeña cantidad de radón que emana del medio sólido y pasa a ocupar los poros existentes, pudiendo así desplazarse hasta llegar a la superficie del suelo y pasar al aire. La longitud de difusión (distancia que recorre el radón previo a desintegrarse) será un factor clave en la cantidad de radón en el aire. Del mismo modo, la emanación del radón puede verse acelerada por la diferencia de presión producida entre el gas del

suelo y el interior de la vivienda [40]. La longitud de difusión para un suelo normal es aproximadamente 1m.

En muchas ocasiones el empleo de mecanismos extractores de aire como ventiladores o intercambiadores de aire para calefacción hacen que se generen corrientes de aire así como caídas de presión que facilitan el paso del radón desde el suelo o desde los poros o fisuras de la propia estructura [40].

5.2.2 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los materiales de construcción constituyen, generalmente, la segunda fuente de mayor importancia para la existencia de radón en espacios cerrados.

El radón que emite un material depende de la construcción del mismo, así como de la concentración de radio que presente, ya que este se va a descomponer produciendo una fracción de radón en función de la porosidad del propio material, la superficie y el tipo de paredes existentes.

Un contenido de radio y torio de hasta 50 Bq/kg es una cantidad frecuentemente hallada en los materiales de construcción. Incluso pueden presentar valores de concentración de gas radón superiores si contienen yeso o hormigón con alumbre bituminoso. A su vez, si los materiales han sido extraídos de una zona en la que existe una elevada radiación natural es posible que se den altas concentraciones del gas, como por ejemplo puede ocurrir con los ladrillo o el hormigón. [40].

5.2.3 AIRE EXTERIOR

Por norma general, el aire procedente del exterior actúa como factor de dilución, debido a su baja concentración de radón. No obstante, en ocasiones, en algunas viviendas cuyos materiales de construcción cuentan con una cierta cantidad de radio en su composición, puede llegar a actuar como fuente de gas radón [40].

La presión atmosférica, está relacionada directamente con la cantidad de radón en el aire exterior [40].

5.2.4 AGUA DE CONSUMO

El empleo en las viviendas de aguas subterráneas que contienen cierta cantidad de radón pueden tener como consecuencias una liberación del mismo y

por tanto que se incremente su concentración en el aire, sobre todo en los cuartos de baño ya que la liberación del gas se ve favorecida por el agua caliente y en movimiento[40].

La concentración de gas radón en el agua que se consume es de unos 10 kBq/m³. Sin embargo existen regiones en las que se emplea agua que proviene de pozos perforados en zonas rocosas que contienen gran cantidad del gas, e incluso se han llegado a encontrar niveles de radón que pueden llegar a 100 kBq/m³ y 100 MBq/m³ [40].

5.2.5 GAS NATURAL DE USO DOMÉSTICO

En muchas viviendas se emplea gas natural para cocinar o para la calefacción. Al quemarlo se pueden liberar grandes concentraciones de radón. La cantidad del mismo depende de su zona de procedencia. Normalmente este fuentes no es significativa ya que el lugar de procedencia del suministro de combustible es muy variable [40].

5.3 EL RADÓN EN LOS PUESTOS DE TRABAJO

Cualquier actividad desarrollada en un recinto cerrado puede estar expuesta a radón en función de los niveles de la zona donde se ubique. Existen una serie de actividades donde la legislación establece que se deben realizar controles de la exposición de los trabajadores.

Actualmente, el nivel establecido para los lugares de trabajo con alta permanencia de miembros del público es de 300 Bq/m³. Dentro de este grupo se incluyen centros como hospitales, centros penitenciarios, escuelas, etc. En general, cualquier lugar donde pueda haber público, es decir, personas que no estén desarrollando allí su actividad profesional propiamente dicha y que puedan estar en el recinto cerrado un número de horas superior al de permanencia de los trabajadores [41].

Existen lugares de trabajo con una especial predisposición a la exposición al radón, como son parkings subterráneos, cuevas y galerías subterráneas, spas y balnearios, lugares donde se traten o almacenen aguas subterráneas, y una serie de industrias como la producción de cemento, gas o petróleo, producción de estaño, cobre, hierro, y la minería. Por ese motivo, en este tipo de lugares el control deberá ser mayor [41].

5.4 INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN

Las variaciones en el clima tienen una gran influencia en los niveles de radón. Se considera que los cambios estacionales son el factor con mayor repercusión en la concentración del gas de estudio.

Se produce mucho más radón en los periodos de otoño e invierno y mucho menos en primavera y verano, donde los niveles de radón pueden llegar a ser mínimos, al igual que ocurría con la concentración de actividad alfa y actividad beta. Tanto es así que en estas épocas del año no es aconsejable realizar mediciones, ya que el valor obtenido no será representativo [41].

La presión atmosférica también influye significativamente; las bajas presiones favorecen la emanación de radón, mientras que las altas la dificultan[41].

De igual manera, la humedad del terreno puede hacer disminuir o aumentar la permeabilidad del mismo y dificultar o favorecer la salida del radón a la atmósfera [41].

La temperatura es otra variable que influye en la cantidad de radón que puede salir en un momento dado, al igual que ocurre con la cantidad de actividad alfa y actividad beta. En un día de temperaturas bajo cero, el terreno se suele compactar y habrá menor emanación de radón pero, curiosamente, mayor en la zona donde esté situada la edificación, al ser el único punto con facilidad para salir y aumentado por el efecto chimenea que produce la casa sobre el terreno. Este tipo de circunstancias medioambientales se deben tener en cuenta a la hora de evaluar los niveles de radón en una vivienda [40] [41].

5.5 LEGISLACIÓN VIGENTE

En España se ha publicado el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (BOE, 2001) en el año 2001, en el cual se recomienda realizar estudios en todos aquellos lugares de trabajo cuyo personal pueda estar expuesto a concentraciones elevadas de radón, torón y sus descendientes [33].

A finales de 2010 se publica el RD 1439/2010 (BOE, 2011), en que se modifica el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes del año 2001, introduciendo la obligatoriedad de medir la concentración de radón en lugares de trabajo que puedan provocar un incremento significativo de la exposición de los trabajadores, y en enero de 2012 el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) publica la Instrucción IS-33 [42], con el objetivo de establecer los criterios radiológicos para la protección frente a la radiactividad natural para las autoridades competentes y para los titulares de las actividades laborales afectadas [33].

En base a lo expuesto, la legislación establece que la concentración media de radón en un lugar de trabajo en España ha de ser menor de 600 Bq/m^3 (300 Bq/m^3 para permanencias prolongadas). Por encima de este valor ($> 600 \text{ Bq/m}^3$), debe implementarse un sistema de mitigación, con controles periódicos que aseguren que los niveles de concentración de radón se mantienen por debajo [42] [33].

A nivel europeo existe la Directiva 2013/59/EURATOM de 5 de diciembre de 2013, que establece en el artículo 54 los 300 Bq/m^3 como nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire (Europea, 2014).

6 CARTOGRAFÍA DEL POTENCIAL DE RADÓN EN ESPAÑA

Para elaborar el mapa de potencial de radón, han sido empleadas más de 12.000 mediciones de radón en viviendas, agrupadas por unidad litoestratigráfica (en base al mapa a escala 1:200.000 del Instituto Geológico y Minero de España, IGME,) y rango de exposición a la radiación gamma, obtenido a partir del mapa MARNA de radiación gamma natural. Las áreas establecidas según esos criterios primarios de agrupación se dividieron o combinaron posteriormente para obtener (en la medida que la escala permite) unidades con niveles de radón espacialmente homogéneos y con un tamaño de muestra adecuado. Para estas unidades se estimó el percentil 90 (P90) de la distribución de concentraciones de radón como una cota superior al 90% de confianza. Los valores así obtenidos se representan agrupados por rangos en el mapa de potencial de radón [43].

El percentil 90 de la distribución de niveles de radón de los edificios de esa zona significaría que en, por ejemplo, 300 Bq/m³ [43] :

- 90% de los edificios tienen concentraciones inferiores a 300 Bq/m³.
- 10% supera este nivel.

El potencial de radón depende, principalmente, de la capacidad del terreno para generar y transportar el radón y de las características constructivas del parque residencial [43].

A continuación, en la Figura 6-1 se muestra el potencial de radón en España.

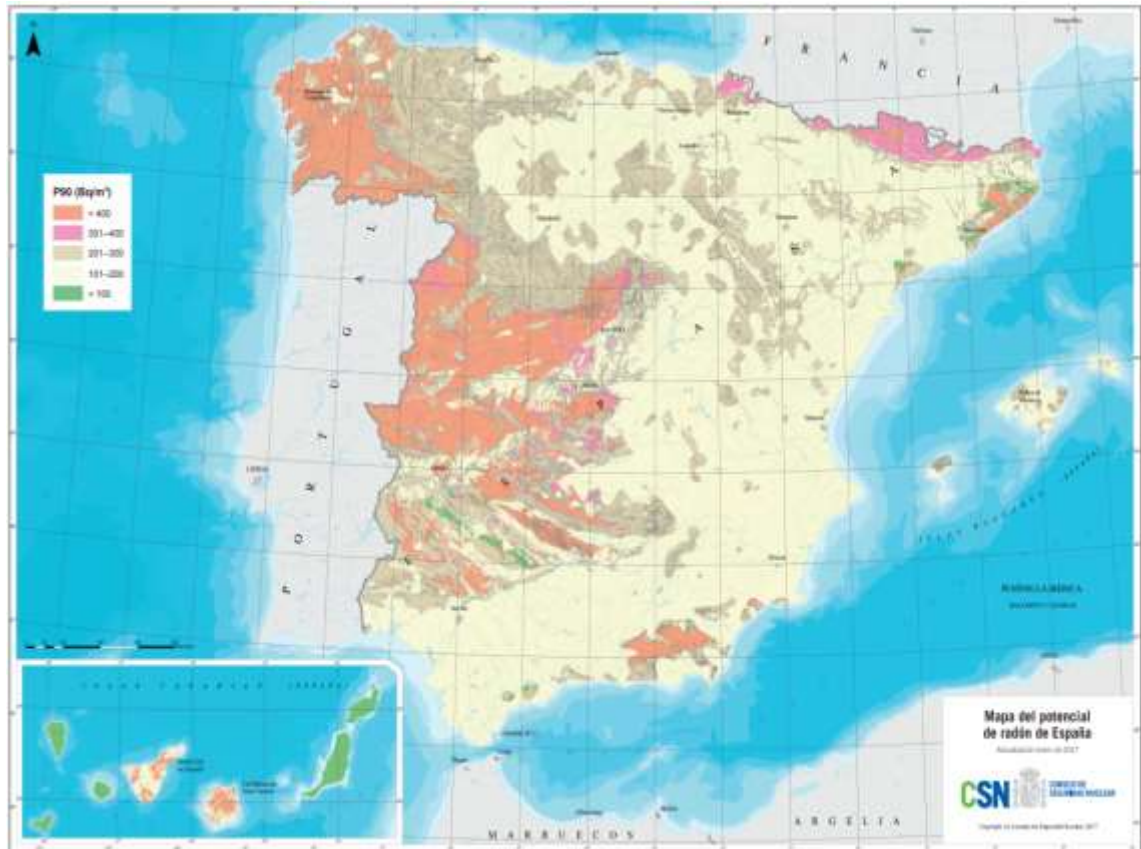


Figura 6-1 Mapa de potencial de radón de España [43].

La cartografía del potencial de radón de España categoriza las zonas del territorio estatal en función de sus niveles de radón y, en particular, identifica aquellas en las que un porcentaje significativo de los edificios residenciales presenta concentraciones superiores a 300 Bq/m³[43].

Los mapas se basan en medidas de radón tomadas en la planta baja o, cuando esta no está habitada, en el primer piso. Por tanto, no representan directamente la exposición de la población [43].

En general, el riesgo asociado a las plantas subterráneas es mayor que el que refleja los mapas, mientras que es inferior, disminuye a razón de un 20% menos por planta, en los pisos altos[43].

La finalidad de esta cartografía es facilitar el desarrollo del Plan Nacional de Actuación contra el Radón que requiere la directiva europea 2013/59/Euratom, así como orientar a las comunidades autónomas y a los municipios más expuestos en la puesta en marcha de sus estrategias o políticas de intervención [43].

Las zonas con potencial de Radón (P90) > 300 Bq/m³ representan el 17% del territorio nacional. Por Comunidad Autónoma, los porcentajes de superficie afectada son (Tabla 6-1) [43]:

Tabla 6-1 zonas con potencial de Radón (P90) > 300 Bq/m³.

Galicia, 70%	Cataluña, 16%	Navarra, 6%
Extremadura; 47%	Asturias, 12%	Aragón 2%
Madrid; 36%	Ceuta, 11%	Aragón 2%
Castilla y León, 19%	Castilla-La Mancha, 10%	Murcia, 1%
Canarias, 19%	Andalucía, 8%	

6.1 ZONAS DE ACTUACIÓN PRIORITARIA

A partir del mapa del potencial de radón (Figura 6-1) se ha obtenido el mapa de zonas de actuación prioritaria (potencial de radón superior a 300 Bq/m^3) (ver Figura 6-2). Para facilitar los trámites administrativos, se han definido las zonas de actuación prioritaria a nivel municipal [43].

En la Figura 6-2 se representan, en color granate, los municipios en los que hay población que reside en zonas de actuación prioritaria, y además, esta población representa más del 75% de la total del municipio[43].



Figura 6-2 Mapa de las zonas de actuación prioritarias por municipios [43].

Para analizar la situación en Galicia, es posible emplea como criterio la Tabla 6-2:

A continuación, en la Figura 6-3, Figura 6-4 y Figura 6-5 se muestra el potencial de radón en las distintas provincias gallegas.

Tabla 6-2 categorización del potencial de radón [44].

Categoría	Exposición potencial	Concentración media ^{222}Rn (Bq/m^3)
0	Baja	<150
1	Media	150-200
2	Alta	>200

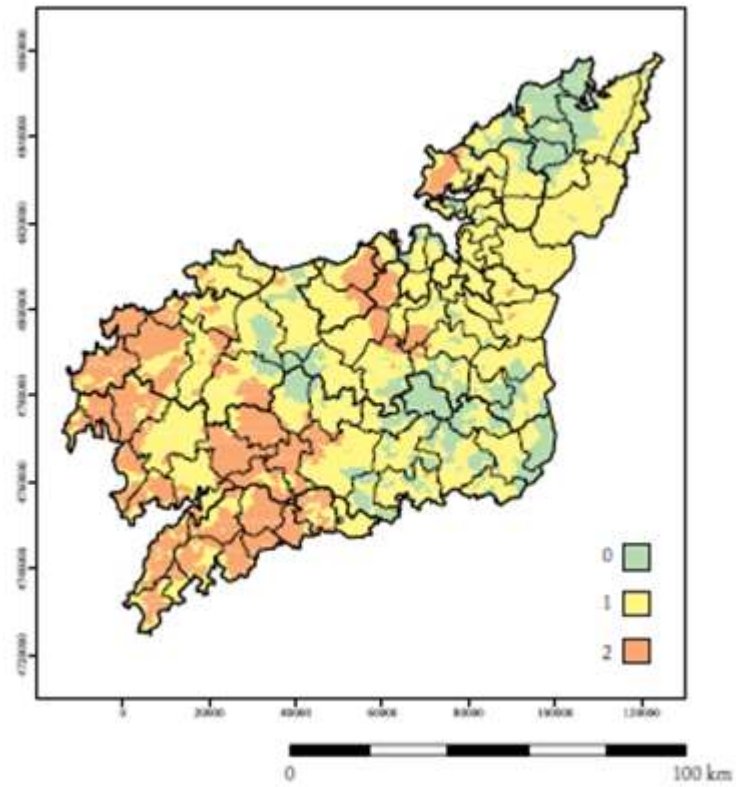


Figura 6-3 Categorización del potencial de radón en A Coruña[44].

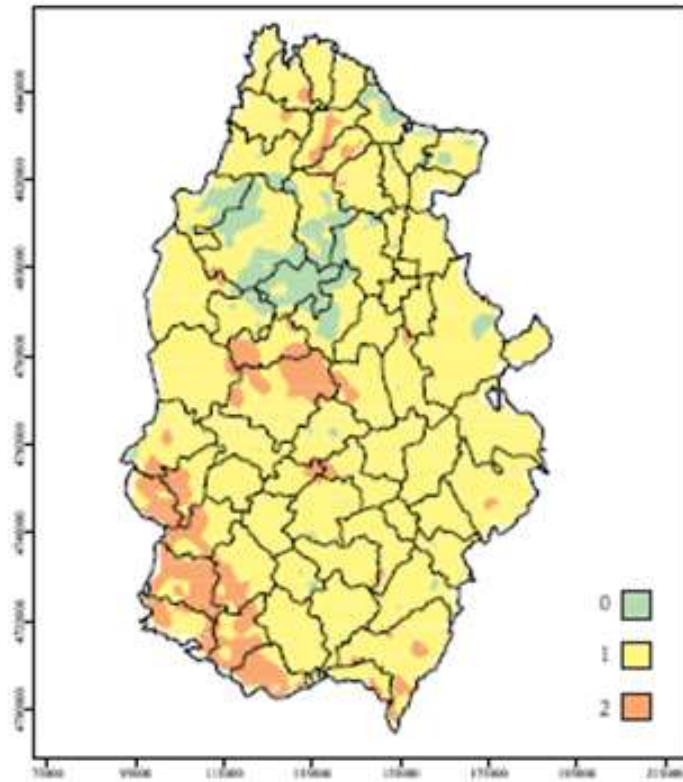


Figura 6-4 Categorización del potencial de radón en Lugo [44].

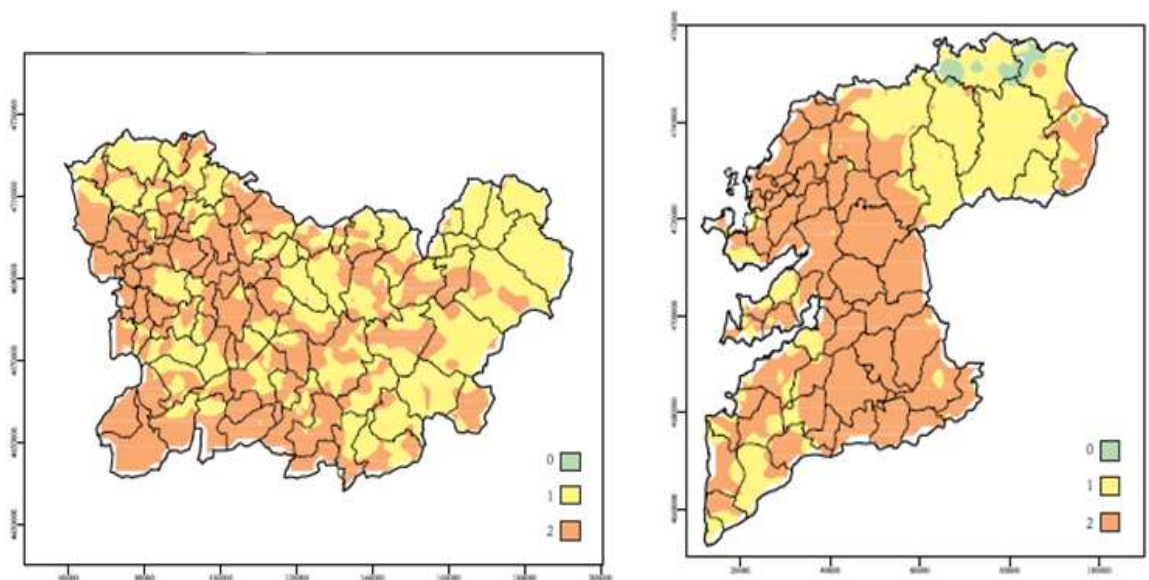


Figura 6-5 Potencial de radón en Ourense (izq.) y Pontevedra (dcha.) [44].

A continuación, en la Figura 6-6, se muestra la situación de exposición existente en la comarca de Ferrolterra y alrededores, lugar en el que se lleva a cabo el estudio de la eficiencia energética en la mitigación del gas radón en la Escuela Politécnica de Serantes.



Figura 6-6 Zonas de alto riesgo en la comarca de Ferrol y alrededores [41].

7 MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL RADÓN

Se pueden emplear varios métodos para determinar cuál es la concentración de radón y de sus descendientes en aire. En función del equipo disponible, el coste de las medidas y la duración de las mismas, se seleccionará unos u otros métodos [40].

La medida de la concentración de radón existente en un ambiente cerrado se determina en base a las partículas que este gas emite, así como sus descendientes de vida corta. Es importante distinguir si el método que se emplea en la toma de medidas determina únicamente la concentración de radón o mide también otras características de los descendientes del mismo. Dependiendo de si se emplea aire forzado para captar la muestra, las técnicas pueden clasificarse en activas o pasivas. Al mismo tiempo, dependiendo del tiempo de muestreo, es posible distinguir entre las tres metodologías siguientes [40]:

Métodos instantáneos: La determinación de la concentración de radón se hace a partir de muestras de aire que se recogen durante cortos períodos de tiempo, normalmente entre 1 segundo y 20 minutos [45]. De esta forma es posible obtener resultados rápidos empleando equipos sencillos y de bajo coste [40].

Es importante ser cuidadoso al elegir las condiciones de operación para que las medidas puedan considerarse representativas de la situación general del lugar de estudio, y no una característica meramente puntual. Este tipo de técnicas suelen emplearse para realizar barridos generales, así como identificar posibles rutas de entrada del radón a través del suelo. También es común emplear este método para comprobar la eficiencia de las medidas correctoras efectuadas para mitigar el radón[40].

Métodos de lectura continua: Consiste en hacer pasar a través de un detector (adecuado para la medida), durante largos periodos de tiempo, una corriente constante de aire, para evaluar la concentración del gas de forma continua. Este tipo de métodos proporcionan una gran cantidad de información, no obstante, son caros y están limitados a tareas de investigación [40].

A continuación, en la Figura 7-1 y Figura 7-2, se muestra los equipos disponibles en el LRA-UDC. La diferencia entre ellos es que el equipo Alphaguard muestrea cada 10 min mientras que el equipo Sun Nuclear cada 30 min.



Figura 7-1 Equipo Alphaguard para medición continua de gas radón.



Figura 7-2 Equipo Sun Nuclear para medición continua de gas radón.

Métodos integrados: Se emplean equipos capaces de registrar información acerca de la concentración media de radón durante distintos periodos de tiempo, ya sean días, varias semanas, o incluso, meses. Este tipo de métodos son los que más se utilizan para la inspección y reconocimiento de posibles zonas en las que es necesario aplicar medidas mitigadoras.

Se realizan medidas de al menos tres meses. En general este tipo de equipos tienen un coste moderado, y suelen emplear sistemas de tipo pasivo [45] [40].

Entre los equipos y dispositivos empleados más comúnmente para la realización de las mediciones de radón y de sus descendientes se encuentran:

- **Células de centelleo:** Son cilindros metálicos, que pueden ser de diferentes tamaños, y que tienen un extremo transparente. El interior se encuentra recubierto uniformemente de una capa de sulfuro de cinc activado con plata que capta las partículas alfa. Al introducirse aire dentro del cilindro, una vez alcanzado el equilibrio, se mide el número de destellos de luz con un tubo fotomultiplicador para determinar la concentración de radón en el aire [45].
- **Detectores sólidos de trazas:** Se trata de dispositivos pasivos que emplean láminas de materiales como son el nitrato de celulosa o el policarbonato. En estas laminas las trazas radiactivas de alfa emitidas por el radón y sus descendientes se quedan impresas después de un tiempo de exposición. Mediante el empleo de equipos de microscopia es posible identificar y contar las trazas halladas, siendo este un número proporcional a la concentración de radón existente durante el periodo de exposición [45].



Figura 7-3 Detector de trazas de radón (3 meses).

- **Detectores de carbón activo:** Se trata de un sistema pasivo cuyo principio de funcionamiento es muy simple. Su operacionalidad se basa en la capacidad que presenta el carbón activo para retener radón. El tiempo de toma de muestras en este tipo de detectores varía entre dos y siete días. Para determinar el nivel de radón se mide la radiación gamma emitida por el carbón activo mediante el empleo de un detector adecuado, como es por ejemplo el de yoduro sódico [45].

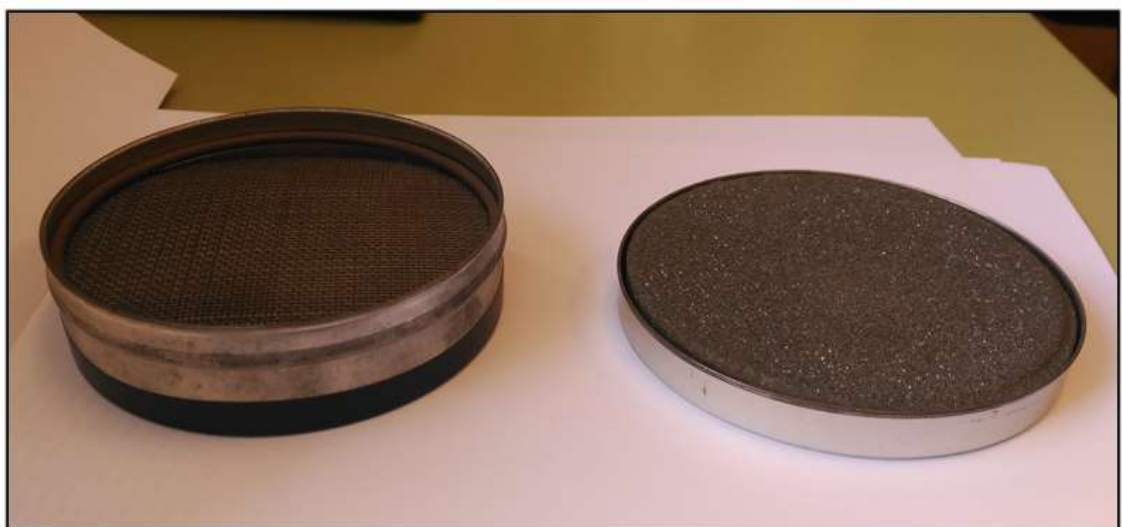


Figura 7-4 Detector de carbón activo para medición de radón.

A continuación, en la Tabla 7-1 se muestra una representación esquemática general de la aplicación de estos tres tipos de detectores de radón [45].

Tabla 7-1 Modo más generalizado de aplicación de los detectores de radón.

DETECTOR	MÉTODO INSTANTÁNEO	MÉTODO CONTINUO	MÉTODO INTEGRADO	MÉTODO ACTIVO	MÉTODO PASIVO
<i>Célula de centelleo</i>	sí	sí	-	sí	sí
<i>Detector de trazas</i>	-	-	sí	-	sí
<i>Detector de carbón activo</i>	-	-	sí	-	sí

7.1 EFECTOS DEL RADÓN SOBRE LA SALUD

El principal efecto de la exposición al radón es el cáncer de pulmón. Según la Organización Mundial de la Salud, el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco. Se sabe que en fumadores el riesgo de contraer cáncer de pulmón por exposición al radón es diez veces superior que en un no fumador. Del mismo modo, existe una clara evidencia científica al respecto y con grandes estudios realizados en todo el mundo. Se sabe que por cada 100 Bq/m³ de aumento en la exposición a radón, se incrementa en un 16% el riesgo de contraer cáncer de pulmón. Por otra parte, se desconoce el umbral por debajo del cual la exposición no suponga un riesgo, y por otro lado está demostrado que la mayoría de los casos de cáncer de pulmón están provocados por concentraciones bajas o moderadas, y no por concentraciones elevadas. Algunos estudios desvelan que entre el 3% y el 14% de todos los cánceres de pulmón se deben al radón. En base a estos datos, entre 1500 y 2000 personas

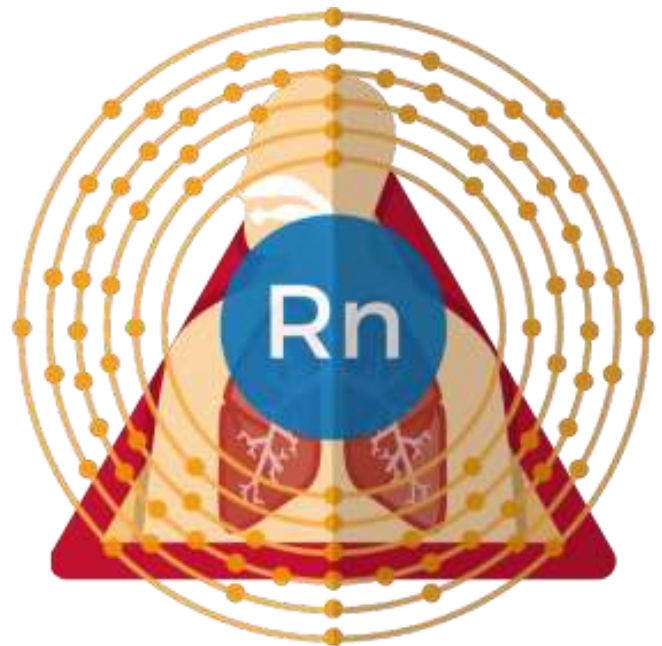


Figura 7-5 Efectos del radón en el pulmón

mueren al año en España por cáncer de pulmón provocado por exposición al radón [41].

Existen otros riesgos, aunque no están suficientemente establecidos. Por ejemplo, si una persona bebe agua que contiene radón, al disolverse en el estómago se verá expuesta, pero además el gas se distribuirá por la sangre a todos los órganos. Se han realizado más de 20 estudios en diferentes países que han encontrado asociación entre la exposición al radón y la leucemia, incluida la linfocítica crónica. No obstante es pronto para establecer que el radón sea la causa directa de la enfermedad. Otros estudios realizados en Noruega han mostrado una asociación entre la esclerosis múltiple y la exposición al radón[41].

7.1.1 MECANISMOS DE ABSORCIÓN

Se considera que existen dos formas de absorción de radón: la ingestión y la inhalación [41].

Ingestión: se produce por el consumo de agua con altos contenidos de gas radón disuelto. Cuando el radón es ingerido se considera que todo el organismo está expuesto, ya que al ser un gas inerte pasa desde el estómago, que sería el órgano más perjudicado, al torrente sanguíneo y este lo distribuye a todos los tejidos [41].

Inhalación: tras numerosos estudios, se ha determinado que el mayor riesgo del radón es la inhalación. Cuando se inhala radón, este no se mezcla ni se deposita en nuestros tejidos. Los que realmente provocan el daño son los descendientes de vida corta que se producen en la desintegración del radón: el polonio-218, el polonio-214, el plomo-214 y el bismuto-214. Estos elementos se fijan en los tejidos y se desintegran, emitiendo partículas alfa o beta que dañan el ADN de las células. Estos descendientes además se depositan en el polvo y los aerosoles que respiramos [41].

A continuación en la Figura 7-6 se muestra, de manera gráfica, las distintas radiaciones a las que se encuentra expuesto el ser humano. Se puede observar que la inhalación de radón representa prácticamente la mitad de la radiactividad absorbida por el cuerpo humano.

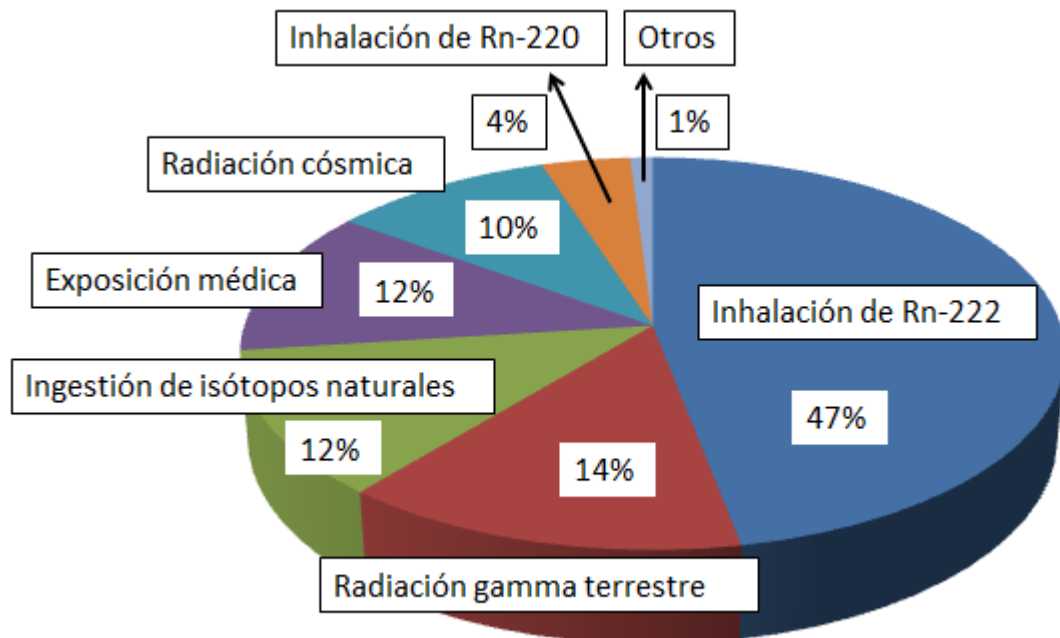


Figura 7-6 Exposición de los individuos a la radiación ionizante.

8 ESTUDIO Y MITIGACIÓN DEL RADÓN EN EL LRA-UDC

Se ha realizado el estudio de la concentración de radón en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LRA-UDC) ubicado en la segunda planta de la Escuela Universitaria Politécnica da Universidade da Coruña (Figura 8-1).



Figura 8-1 Fachada principal de la EUP.

Se han realizado mediciones de gas radón en el LRA-UDC y en base a los resultados de las mismas, se han analizado las posibles soluciones mitigadoras que se podrían llevar a cabo en el centro universitario.

A continuación, a lo largo de esta sección, se detalla el equipamiento y métodos seguidos para la mitigación del gas radón, así como la eficiencia energética de la solución desarrollada.



Figura 8-2 2ª planta de la EUP. Ubicación de la sala de mitigación del radón [46]

8.1 EQUIPO DE MEDICIÓN

En esta sección, se describe el sensor de monitorización de radiación específico empleado para la determinación de gas radón en el LRA-UDC. El sensor utilizado para medir la actividad del gas radón es el modelo AlphaGUARD PQ 2000PRO de SAPHYMO [47].

AlphaGUARD PQ 2000PRO es un dispositivo portátil utilizado para medir la concentración de radón instantánea o continua, tanto para pruebas a corto como a largo plazo en edificios y al aire libre.

Este sensor, que es insensible a las vibraciones y a la humedad, tiene una cámara de ionización de recuento de pulsos (espectroscopía alfa) y permite medir los niveles de gas radón en un amplio rango, entre 2 y 2.000.000 Bq / m³. Cuando se opera en modo de difusión, el usuario puede seleccionar ciclos de medición de 10 min a 60 min, mientras opera en modo de flujo continuo, el tiempo de ciclo varía entre 1 y 10 min. Entre sus muchas ventajas, AlphaGUARD PQ 2000PRO realiza una respuesta rápida con alta eficiencia de detección (1 cpm a 20 Bq/m³) y permite un funcionamiento sin mantenimiento con una calibración estable. El error de calibración del instrumento es del 3%, más la incertidumbre del estándar primario.

Además de la concentración de gas radón, AlphaGUARD PQ 2000PRO está equipado con diferentes sensores integrados que permiten medir y almacenar otros parámetros esenciales en la mitigación del radón, como la temperatura ambiente, la presión atmosférica y la humedad relativa. El sensor interno incluido para medir la temperatura ambiente, de -10°C a 60°C, es un circuito integrado monolítico de precisión. A mayores, el dispositivo cuenta también con un transductor de puente de silicio recortado con láser para determinar la presión de aire atmosférico, de 800mbar a 1050 mbar. El sensor integrado permite también medir la humedad relativa, desde 0% rH hasta 99% rH, es una película de polímero hidrofílico sobre híbrido.

Un software específico conocido como DataEXPERT, que se incluye junto con el Monitor de radón AlphaGUARD en la configuración básica vendida por la empresa Saphymo GmbH, se ha empleado para almacenar y analizar estos datos.

Las principales características técnicas del sensor AlphaGUARD PQ 2000PRO se proporcionan a continuación en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1 Tabla de características AlphaGUARD PQ 2000PRO.

PHYSICAL CHARACTERISTICS	
Measurement range (Rn-222)	2 (Bq/m ³)
✓ Lower limit	
✓ Upper limit	2, 000, 000 (Bq/m ³)
Foldback protection	>10,000,000 (Bq/m ³) verified
Type of radon detector	Ionization chamber (HV = 750VDC)
Operation mode	3D alpha spectroscopy and current mode
Detector volume	0.62 liter
✓ Total	
✓ Active	0.56 liter
Type of Rn-FP filter (detector entry window)	Glass fiber filter (retention coefficient > 99,9 %)
Detector filling mechanisms	Design optimized for fast passive diffusion (10/60 min cycle) Flow mode (1/10 min cycle) Rn/Tn mode (10 min cycle)
Detector signal acquisition	Fast digital signal sampling network, using three separate ADC-channels
Calibration error (Rn-222)	±3%
Detector efficiency	1 cpm at 20 (Bq/m ³)
Background signal due to detector contamination	<1 (Bq/m ³)
Measurement cycle time	10 min or 60 min (user selectable)
✓ Diffusion mode	
✓ Flow-through mode	1 min or 10 min (user selectable)
Storage capacity	3 days at 1 min measuring cycles 1 month at 10 min measuring cycles 6 months at 60 min measuring cycles
Internal sensors	Precision monolithic integrated circuit (-15°C–60°C)
✓ Ambient temperature	
✓ Atmospheric air pressure	Laser-trimmed silicon bridge transducer (800mbar–1050mbar)
✓ Relative air humidity	Hydrophilic polymer film on hybrid (0% ~99%rH)

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS	
System operating range	-10°C–50°C
✓ Operating temperature	700mbar–1150 mbar
✓ Air pressure	0% ~ 95%
✓ Relative humidity	
MECHANICAL CHARACTERISTICS AND DISPLAY	
Dimensions (excluding handle)	120 mm x 315 mm x175 mm (H x W x D)
Weight	4.5 kg
ELECTRICAL CHARACTERISTICS	
Power supply	Battery or external mains (120 V–230 V)
Battery	Rechargeable, allows > 10 days autonomous operation, >30 days using external booster
INTERFACES	
DataEXPERT software for data collection, management and professional analysis	

8.2 METODOLOGÍA

El detector AlphaGUARD PQ 2000PRO se basa en una cámara de ionización de pulso de diseño optimizado. En condiciones de operación normales, el gas de medición entra en modo de difusión a través de un filtro de fibra de vidrio de gran superficie en la cámara de ionización. Además, el filtro de fibra de vidrio protege el interior de la cámara y evita la contaminación de partículas polvorientas. Mientras que los productos de la progenie de radón no ingresan a la cámara de ionización, solo el Radon-222 gaseoso alcanza la cámara que pasa a través del filtro de fibra de vidrio.

En el estudio llevado a cabo en el LRA-UDC, el sensor AlphaGUARD opera en modo difusión midiendo la concentración de gas radón cada 10 min. Con los valores obtenidos, el equipo calcula el promedio siguiendo la ecuación [8.1] [48].

$$Promedio = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad [8.1]$$

También se calcula la incertidumbre como la desviación estándar usando la ecuación [8.2]:

$$Incertidumbre = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{(n - 1)}} \quad [8.2]$$

8.3 CASO DE ESTUDIO

El Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de A Coruña realiza diferentes trabajos relacionados con las mediciones radiactivas y el análisis de los datos obtenidos. Estas tareas se llevan a cabo en una sala específica (sala de medición), donde se encuentra todo el equipo utilizado en este estudio.

Es interesante que en la sala de medición la cantidad de gas radón existente sea la mínima posible para no repercutir en el resto de medidas llevadas a cabo por el laboratorio. Para lograr tal fin se han realizado medidas de mitigación del radón en el habitáculo.

Una de las actividades realizadas por el LRA-UDC es la realización de estudios sobre la caracterización radiológica de muestras ambientales en la costa norte de Galicia. Además, cuenta con un acuerdo con el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), en un programa de Monitorización de la Radiación Ambiental.

Las mediciones de caracterización de las muestras se realizan en una habitación pequeña, donde se detectó que existía una cierta cantidad representativa de gas de radón.

Se eligió esta sala para realizar las mediciones dentro del laboratorio porque se trata de una habitación pequeña, cerrada y con poca ventilación, un lugar apropiado donde las concentraciones de gas radón pueden ser altas. El nivel de radón se midió primero en la sala de medición del laboratorio. Debido a que el gas radón está presente en concentraciones detectables en este laboratorio específico, se eligió como el sitio para estudiar diferentes métodos de mitigación. Algunos de estos métodos se implementaron con la consiguiente reducción del nivel de radón.

La sala de medición LRA es una sala pequeña de 20 x 60 m² donde se realizan todas las mediciones radiactivas y donde se coloca el equipo usado. Esta sala está orientada hacia el oeste y sus dimensiones son, aproximadamente, 3.20 m de alto, 5.80 m de largo y 3.55 m de ancho. En la Figura 8-7 se puede observar la apariencia general de la habitación.

La estructura del edificio y el piso están hechos de hormigón armado con paredes de ladrillos recubiertos y pintados. Debido al gran peso del equipo de medición empleado en el LRA-UDC, fue necesario instalar hojas de acero en el suelo para distribuir el peso uniformemente. La habitación se encuentra conectada al laboratorio de química y la oficina, y además, cuenta con una ventana situada en la pared oeste donde se instalan los diferentes sistemas de mitigación del gas radón, tal y como se explica en la sección 0.

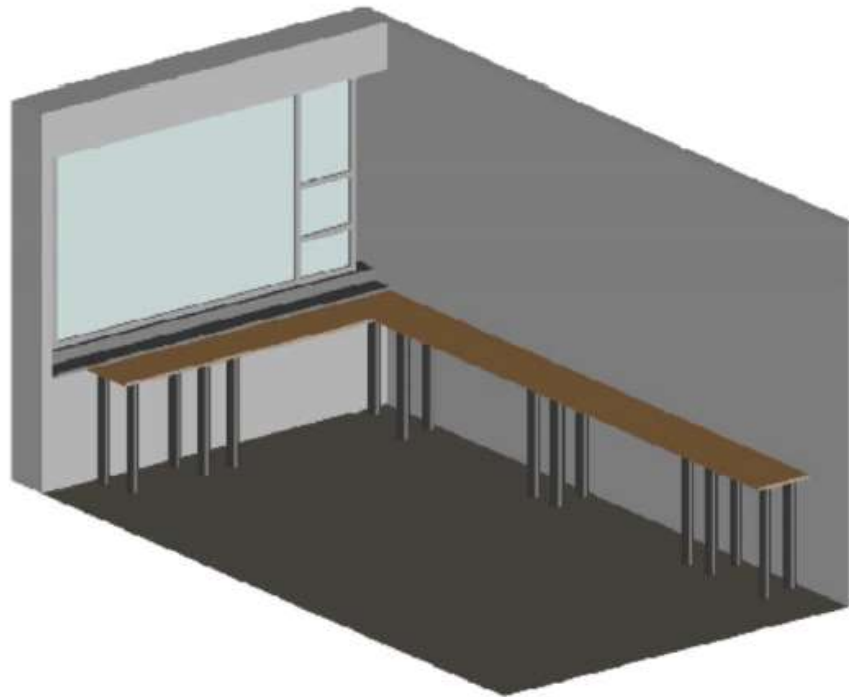


Figura 8-3 Sala de mediciones del LRA-UDC [49].

8.4 SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN DE RADÓN

Con el objetivo de reducir la concentración de gas radón y evitar perturbaciones en el equipo, se han estudiado varios métodos de mitigación cuya implantación podría realizarse. A continuación se muestran algunas de las posibles soluciones que se barajaron a la hora de realizar la implementación del gas radón.

- *Sellado*: tratar de sellar todas las grietas, huecos y agujeros obvios en pisos o paredes para evitar que el radón entre al edificio. No obstante, la implementación de esta medida no resulta suficientemente efectiva en la mayoría de los casos [50][49].

- *Ventilación positiva*: instalación de ventiladores pequeños para soplar aire fresco filtrado al edificio. El principio fundamental es aumentar la presión dentro del edificio en relación con la presión exterior, de tal forma que el gas radón no pueda fluir en el interior [50][49].

- *Sistemas de sumidero*: el propósito de esta medida mitigadora es descargar el aire desde el interior del edificio cuando la concentración alcanza un valor de ajuste [51].

Las soluciones propuestas en el presente trabajo se basan en la ventilación positiva y su principal objetivo es evitar interferencias con el equipo de medición en el laboratorio de radiactividad.

La solución que se va a implementar tiene que considerar algunas limitaciones y restricciones en su instalación. La sala de medición es independiente de la oficina, de manera que la solución aplicada no altera el entorno de trabajo del personal del LRA-UDC. Además, se encuentra en el segundo piso y, por tanto, algunos métodos de mitigación como la ventilación bajo el piso son imposibles de llevar a cabo. Además, los sistemas de sellado y sumidero no se pueden implementar debido a la edad del edificio y porque, además, existen diferentes entradas a la habitación. En base a lo anteriormente expuesto, la ventilación positiva podría considerarse como una buena solución. Además esta soluciones presenta una implantación de bajo costo y viabilidad técnica [49].

8.4.1 VENTILACIÓN POSITIVA

La ventilación positiva consiste en instalar ventiladores que inyectan aire fresco y filtrado en la sala de medición, presurizando para evitar que el radón entre y se expanda por la sala [50][49].

Para implementar la solución seleccionada, se instalaron dos ventiladores y un sistema de aire acondicionado.

Al llevarse a cabo la instalación se fueron realizando medidas paso a paso para poder corroborar la eficiencia de la solución desarrollada.

El motivo de la instalación de los ventiladores es presurizar y diluir el gas radón de manera que se proporcione suficiente ventilación en la estancia.

Por otra parte la instalación de un sistema de aire acondicionado tiene como objetivo reducir la humedad del aire, mantener la temperatura alrededor de los 20°C y a su vez climatizar la sala de medición. Del mismo modo, el aire acondicionado resulta necesario para garantizar condiciones ambientales constantes.

La instalación de los sistemas de mitigación se realizó en la única ventana existente en la habitación, de manera que las obras realizadas resultaron mínimas. En la Figura 8-4 se muestra un esquema de la sala de medición con los sistemas instalados.

Los componentes utilizados para disminuir la concentración de radón son los siguientes:

- Ventiladores: Los ventiladores implementados son el modelo HV-230 de S&P, cuyas características son:
 - Velocidad de rotación de 1250 revoluciones por segundo.
 - Extracción caudal a alta velocidad de 600 m³/h y a baja velocidad de 450 m³/h.
 - Caudal de impulsión: 330 m³/h.

La potencia consumida por los ventiladores es de 34 w cada uno y la corriente de origen es de 0,15 A.

- Aire acondicionado: el sistema de aire acondicionado es el modelo eléctrico PCA-RP50xB7KA de Mitsubishi, cuyas características son:
 - Para frío: 5 kW y 4300 kCal/h.
 - Para caliente: 5.5 kW y 4730 kCal/h.
 - Nivel de sonido, para baja velocidad, alrededor de 32/40 dB.

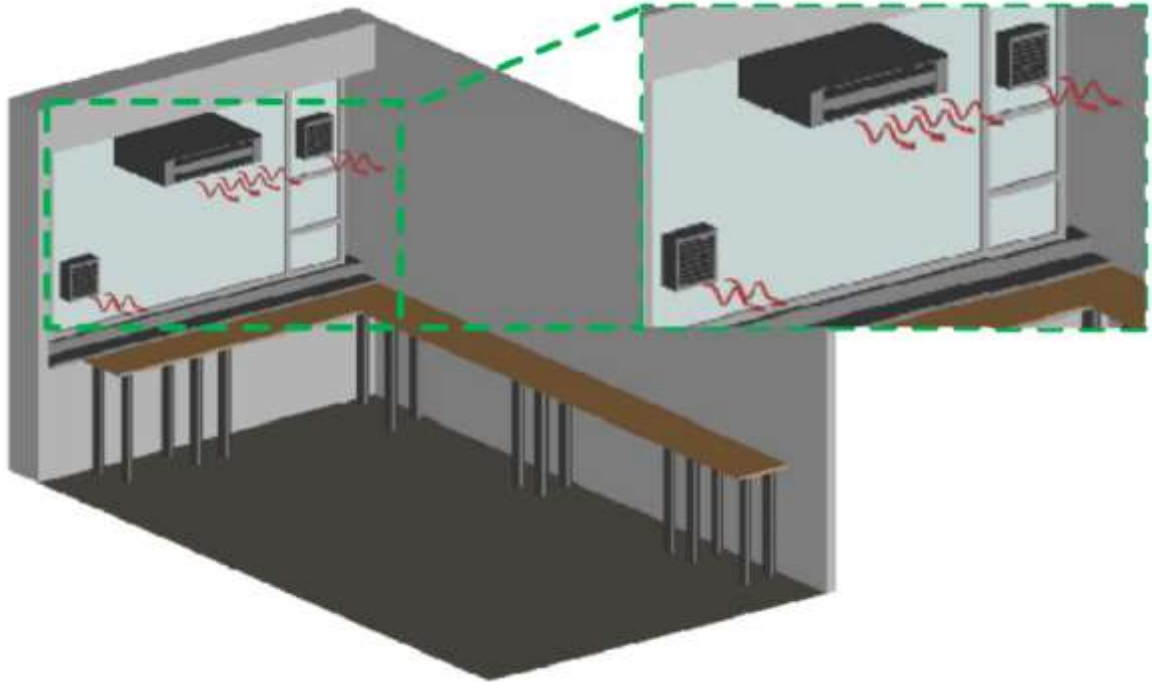


Figura 8-4 Esquema sala de medición con los sistemas de mitigación [49].

8.5 INSTALACIÓN DE LAS MEDIDAS MITIGADORAS

En esta subsección, se explican los pasos llevados en la instalación de los sistemas de mitigación del gas radón, a su vez se muestran las medidas de concentración de radón en los distintos pasos de la instalación.

En primer lugar se midió la concentración de radón en días diferentes para cuantificar su nivel antes de realizar las medidas de mejora. En la Tabla 8-2 se muestra la concentración de radón promedio sin la implantación de ninguna solución mitigadora para el período comprendido entre el 25 de abril y el 23 de noviembre de 2007.

Tabla 8-2 Concentración antes de implementar los sistemas de mitigación de radón.

ACTIVIDAD RADÓN-222	CONCENTRACIÓN (Bq/m ³)
Promedio	79
Incertidumbre	37
Concentración máxima	158
Numero de medidas	212

A continuación se instaló un ventilador para presurizar la sala de medición (ver Figura 8-5). Un tiempo después de su instalación se midió la concentración de radón (una vez alcanzado un estado estable).

La instalación de este primer ventilador y la toma de medidas de su eficiencia se realizaron entre el 30 de noviembre de 2007 y el 25 de enero de 2008.

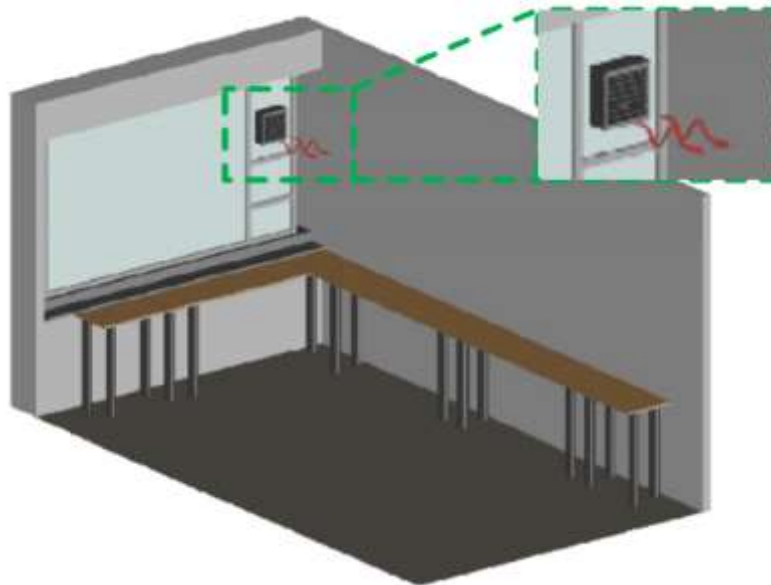


Figura 8-5 Esquema sala de medición tras instalar un ventilador [49].

Tiempo después, se instaló un segundo ventilador para aumentar la presión dentro de la sala de medición (ver Figura 8-6). Después de varias mediciones, se observó que el aire introducido era suficiente para reducir las concentraciones de radón, evitando interferencias en las mediciones.

Entre el 25 de enero y el 1 de diciembre del año 2008 se realizó la instalación del segundo ventilador y se tomaron medidas con ambos ventiladores operando.

En la Tabla 8-3 se pueden observar los valores de concentración de radón durante estos periodos, en donde la concentración del gas no deseado ha disminuido al instalar los ventiladores.

Tabla 8-3 Concentración de radón tras instalar los ventiladores.

ACTIVIDAD RN-222	UN VENTILADOR (Bq/m ³)	DOS VENTILADORES (Bq/m ³)
Promedio	29	19
Incertidumbre	18	10
Concentración máxima	64	53
Numero de medidas	56	278

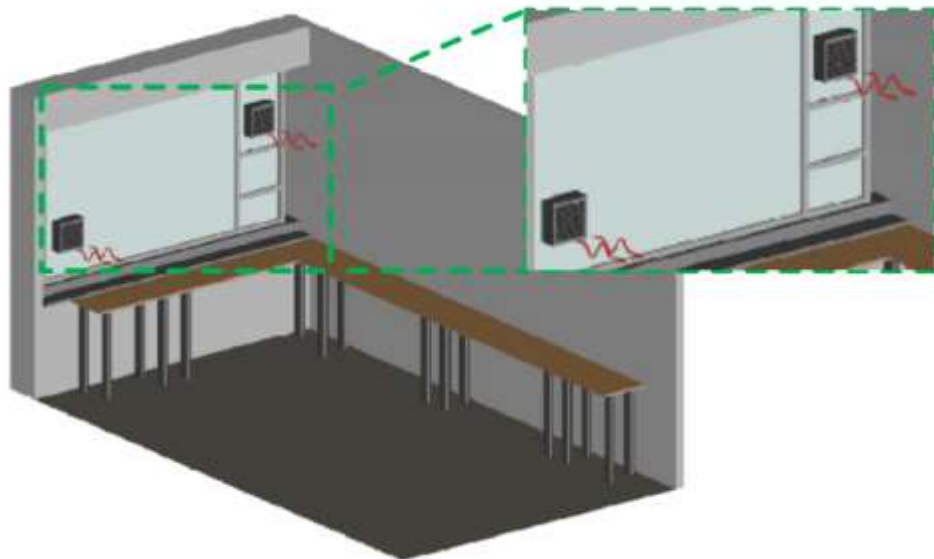


Figura 8-6 Esquema sala de medición tras instalar el segundo ventilador [49].

Una vez que se implementaron los sistemas de ventilación, se instaló el sistema de aire acondicionado (ver Figura 8-4). El sistema de aire acondicionado instalado permite climatizar la sala de medición y tener unas condiciones climatológicas constantes, lo que permite tener mediciones estables y, por lo tanto, minimizar la incertidumbre debida al control de temperatura de la habitación y la reducción de la humedad [49].

A continuación, en la Tabla 8-4 se pueden ver los resultados logrados tras implementar el último sistema mencionado.

Tabla 8-4 Concentración radón tras implementar el sistema de aire acondicionado.

ACTIVIDAD RADÓN-222	CONCENTRACIÓN (Bq/m³)
Promedio	19
Incertidumbre	9
Concentración máxima	40
Numero de medidas	1174

Desde el 1 de diciembre de 2008 hasta la actualidad ha estado encendido el sistema de mitigación compuesto por dos ventiladores y el sistema de aire acondicionado (ver Figura 8-4). Actualmente el valor de concentración de radón es muy bajo.

En la Tabla 8-5, se muestra como resumen el porcentaje de reducción de concentración del gas radón al usar los diferentes componentes de la solución de mitigación.

Tabla 8-5 Porcentaje de reducción tras la implementación de la solución mitigadora.

ACTIVIDAD RADÓN-222	SOLUCIÓN MITIGADORA	COMPARADO CON	REDUCCIÓN (%)
Promedio	Un ventilador	Ningún sistema	62,8
Incertidumbre	Un ventilador	Ningún sistema	50,3
Promedio	Dos ventiladores	Un ventilador	35,6
Incertidumbre	Dos ventiladores	Un ventilador	43,7
Promedio	Dos ventiladores	Ningún sistema	76,0
Incertidumbre	Dos ventiladores	Ningún sistema	72,0
Promedio	Dos ventiladores y aire acondicionado	Ningún sistema	76,0
Incertidumbre	Dos ventiladores y aire acondicionado	Ningún sistema	75,7

Todos los sistemas, ventiladores y aire acondicionado, trabajan de manera conjunta con el objetivo de disminuir la concentración de radón y tener condiciones repetibles para las mediciones.

En el LRA-UDC realizan diferentes análisis periódicamente para mantener el control de los niveles de radón a fin de saber cómo varían a lo largo del año. Los

ventiladores funcionan como impulsores del aire exterior y el aire acondicionado funciona manteniendo la temperatura en un valor de 20°C y controlando la humedad del aire.

Seguidamente, en la Figura 8-7, se muestra una imagen real de la sala de medición del LRA-UDC con todos los sistemas instalados (ventiladores y aire acondicionado). Por otra parte, en la Figura 8-8, se puede observar un resumen de la reducción del gas radón con los diferentes sistemas implementados.



Figura 8-7 Sala de medición con todos los sistemas incorporados.

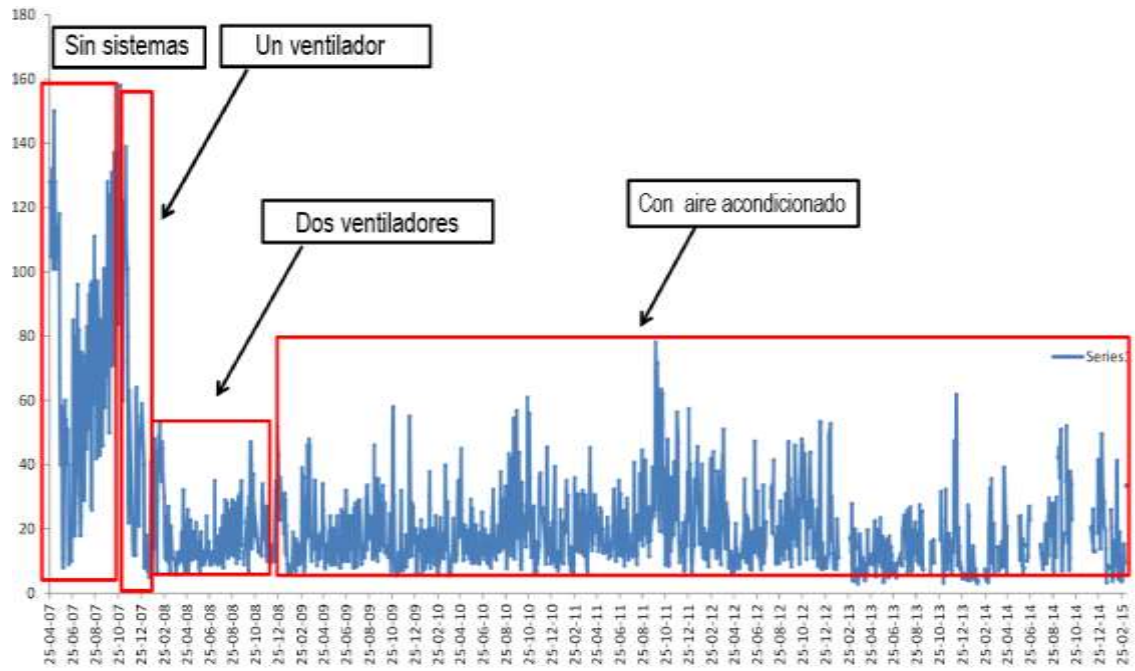


Figura 8-8 Evolución en el tiempo de la concentración de radón [49].

Tras de instalación de los diferentes sistemas de eliminación, la concentración de radón se redujo de manera significativa hasta un valor del 76%.

La ventilación positiva logró buenos resultados al presurizar la sala de medición y evitar la entrada de radón, siendo posible ahora realizar mediciones sin influencia del radón en la toma de resultados.

9 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA MEDIDA DE MITIGACIÓN

Paralelamente al estudio de la solución mitigadora de gas radón, se ha realizado una evaluación de la eficiencia energética asociada a dicha solución mitigadora.

Para ello se han evaluado paso a paso las distintas actuaciones llevadas a cabo en la sala de medición del LRA-UDC. A continuación, en la Tabla 9-1, se muestra a modo de resumen, las concentraciones de radón que se registraron con las distintas soluciones.

Tabla 9-1 Concentración de radón con los distintos equipos de mitigación.

ACTIVIDAD RN-222	UN VENTILADOR (Bq/m ³)	DOS VENTILADORES (Bq/m ³)	AIRE ACONDICIONADO (Bq/m ³)
Promedio	29	19	19
Incertidumbre	18	10	9
Concentración máxima	64	53	40
Numero de medidas	56	278	1174

Tras la primera actuación (instalación de un único ventilador) se ha logrado disminuir la concentración de radón de 79 Bq/m³ (concentración sin ninguna medida correctora) a 29 Bq/m³ con un consumo de 34 W. Esta medida supone una reducción del radón del 63%. Instalar un segundo ventilador de idénticas características supone una reducción de unos 10 Bq/m³ adicionales, teniendo un consumo de 68 W.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética el empleo de un único ventilador sería la opción más acertada, ya que supondría la mitad de consumo (únicamente 34W frente a los 68 W de los dos ventiladores) obteniendo unos valores de concentración de gas radón ya satisfactorios y que por tanto no interfieren en las medidas llevadas a cabo en el LRA-UDC.

Del mismo modo, al emplear un único ventilador se reduce el impacto sonoro de la sala. Un ventilador supone alrededor de 32/40 dB, mientras que si se emplean los dos ventiladores simultáneamente este valor se duplica.

El empleo del aire acondicionado sería indispensable ya que es necesario mantener las condiciones climatológicas de la sala de medición para evitar variaciones bruscas de temperatura y humedad. Estos cambios bruscos afectarían a la vida útil de los equipos de medida del LRA-UDC. A su vez, el aire acondicionado tendría un consumo menor al quitar un ventilador porque el caudal de aire que tiene que acondicionar (aire exterior de entrada del ventilador) sería la mitad. El sistema de aire acondicionado tendría que calentar/enfriar menos aire procedente del exterior teniendo de esta manera un consumo de electricidad significativamente menor.

Actualmente como ya está realizada la obra con la instalación de ambos ventiladores, una posible solución para aumentar la eficiencia energética sería emplear un único ventilador de manera alterna. Es decir, que funcione 15 días el ventilador A y 15 días el ventilador B. Esta medida supondría doblar la vida útil de los ventiladores al no funcionar de manera continua.

10 CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado las características de diversos parámetros radiactivos como son la actividad alfa, la actividad beta, el Berilio-7 o el gas radón. Al mismo tiempo se ha analizado el comportamiento de los mismos, así como sus efectos en el ser humano.

El análisis del registro de actividad alfa, actividad beta y Berilio-7 recopilada en el LRA-UDC durante los años 2006-2016 ha permitido el estudio y modelado de los parámetros radiactivos anteriormente mencionados, para su caracterización en el área noroccidental de España.

Durante la realización de este estudio, se ha observado una diferencia entre los resultados obtenidos y otros estudios similares ubicados en diferentes zonas de España, lo que nos permite concluir que existe una clara influencia del clima y las condiciones climáticas sobre las concentraciones de actividad alfa, actividad beta y ^7Be .

Del mismo modo, al incluir en el estudio algunos parámetros contaminantes ambientales como NO_2 y SO_2 , se observa que existe una influencia aparente en las concentraciones medidas, lo que permite esclarecer que la actividad industrial, así como la contaminación en el medio ambiente, están directamente relacionadas y tienen un gran impacto en los resultados obtenidos de actividad radiactiva.

Por otra parte, se ha realizado el estudio de las medidas de mitigación de radón llevadas a cabo en el LRA-UDC (sala de mediciones). La implementación de la ventilación positiva, medida de mitigación realizada, consiguió presurizar la sala de medición y evitar la entrada de una cantidad de radón superior a la admisible en la sala. La implantación de esta medida correctora supuso una reducción del radón del 76%. Para tal propósito se instalaron dos ventiladores para reducir la concentración de radón a un valor bajo. Además, el aire acondicionado contribuyó ligeramente a la mitigación del radón.

Pese a que la solución de mitigación de radón implementada en el LRA-UDC consiguió evitar interferencias en las mediciones de laboratorio, al analizar la eficiencia energética de la propuesta desarrollada, se ha observado que sería

más eficiente que los ventiladores trabajaran de manera intermitente en lugar de los dos simultáneamente.

De esta manera el consumo energético se reduce a la mitad, y a su vez disminuye el consumo del aire acondicionado, ya que el flujo de aire a tratar (calentar/enfriar) es menor. La mitigación del radón con esta propuesta sería de un 63%, quedando una concentración de radón en la sala suficientemente baja para no repercutir en las tomas de medida realizadas en la habitación de estudio.

11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alberto Otero Pazos, "Estudio de la radiactividad ambiental en suelos de la costa norte de A Coruña y Lugo," Universidade da Coruña, 2014.
- [2] Física y Química 3º ESO Digital, "La radiactividad," *Blinklearning*, 2018. [Online]. Available: https://www.blinklearning.com/Cursos/c392159_c15880339__La_radiactividad.php. [Accessed: 23-May-2018].
- [3] J. M. L. Sancho and E. M. Gómez, "Breve Historia de la Radiactividad (III)," *Museo Virtual de la Ciencia del CSIC. Sala de la Radiactividad.*, 2007. [Online]. Available: <http://museovirtual.csic.es/coleccion/amaniel/radiactividad/radio3.htm>. [Accessed: 25-May-2018].
- [4] SAEM Thales, "Radiactividad y Ondas Electromagnéticas," 2018. [Online]. Available: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0504-01/paginaprincipal.html>. [Accessed: 24-May-2018].
- [5] D. Lariviere, V. F. Taylor, R. D. Evans, and R. J. Cornett, "Radionuclide determination in environmental samples by inductively coupled plasma mass spectrometry," *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 61, no. 8, pp. 877–904, Aug. 2006.
- [6] CSN, "Introducción a las Radiaciones ionizantes. Naturaleza y Tipos de Radiación. Interacción de la Radiación con la Materia.," 2012. [Online]. Available: <https://www.csn.es/monografias>. [Accessed: 23-Apr-2018].
- [7] CSN, "Radiaciones Ionizantes," 2015. [Online]. Available: [https://www.csn.es/documents/10182/927453/Las radiaciones \(Monografía\)](https://www.csn.es/documents/10182/927453/Las radiaciones (Monografía)).
- [8] Felipe Moreno Romero, "Elementos básicos de física nuclear." [Online]. Available: <http://www.escriitoscientificos.es/trab1a20/carpetas/nuclear/nu03.htm>. [Accessed: 01-Jun-2018].
- [9] M. Sáez-Muñoz, M. del C. Bas, J. Ortiz, and S. Martorell, "Analysis of the evolution of gross alpha and gross beta activities in airborne samples in

- Valencia (Spain),” *J. Environ. Radioact.*, vol. 183, pp. 94–101, Mar. 2018.
- [10] C. Doering and R. Akber, “Beryllium-7 in near-surface air and deposition at Brisbane, Australia,” *J. Environ. Radioact.*, vol. 99, no. 3, pp. 461–467, Mar. 2008.
- [11] C. Dueñas, M. C. Fernández, E. Liger, and J. Carretero, “Gross alpha, gross beta activities and ^7Be concentrations in surface air: analysis of their variations and prediction model,” *Atmos. Environ.*, vol. 33, no. 22, pp. 3705–3715, Sep. 1999.
- [12] Juan Francisco Gonzalez Hernández, “EL PARADIGMA DEL NEUTRINO Y SUS OSCILACIONES,” *UAM*, 2004. [Online]. Available: https://uam.es/personal_pas/txrf/neutrino/neutrino.html. [Accessed: 06-Jun-2018].
- [13] M. L. J. A. Trinidad, C. Gascó, “Intercomparación analítica entre laboratorios de radiactividad ambiental 2013 (aire),” 2014.
- [14] Canberra Industries, *Model 1250 InSpector Spectroscopy System. Hardware Manual*. United States of America, 2003.
- [15] C. Dueñas, M. C. Fernández, J. Carretero, E. Liger, and S. Cañete, “Long-term variation of the concentrations of long-lived Rn descendants and cosmogenic ^7Be and determination of the MRT of aerosols,” *Atmos. Environ.*, vol. 38, no. 9, pp. 1291–1301, Mar. 2004.
- [16] L Mitchell, “Monitoring of radioactivity in air and rainwater in the UK,” 2009.
- [17] Miguel Tiana, “El impacto de la crisis económica sobre la industria española,” *BANCO DE ESPAÑA BOLETÍN ECONÓMICO*, pp. 59–65, 2012.
- [18] A. y N. (CPAN) Centro Nacional de Física de Partículas, “Impacto del accidente nuclear de Fukushima en España,” 2013. [Online]. Available: <https://www.i-cpan.es/es/content/impacto-del-accidente-nuclear-de-fukushima-en-españa>. [Accessed: 04-Jun-2018].
- [19] R. Vecchi, G. Marcazzan, and G. Valli, “Seasonal variation of ^{210}Pb activity concentration in outdoor air of Milan (Italy),” *J. Environ. Radioact.*, vol. 82, no. 2, pp. 251–266, Jan. 2005.

- [20] E. Kitto, Michael & M. Hartt, G & A. Gillen, "Airborne Activities of Gross Beta, ^7Be , and ^{131}I in New York," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 264, pp. 387–392, 2005.
- [21] Y.-J. Huang, Y.-L. Tao, J. Lin, and Z.-H. Shang-Guan, "Annual cycle of gross β activities in aerosol around Daya Bay area, China," *Chemosphere*, vol. 75, no. 7, pp. 929–933, May 2009.
- [22] E. Chham, F. Piñero-García, P. González-Rodelas, and M. A. Ferro-García, "Impact of air masses on the distribution of ^{210}Pb in the southeast of Iberian Peninsula air," *J. Environ. Radioact.*, vol. 177, pp. 169–183, Oct. 2017.
- [23] C. Dueñas, M. . Fernández, J. Carretero, E. Liger, and S. Cañete, "Gross- α and gross- β activities in airborne particulate samples. Analysis and prediction models," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 54, no. 4, pp. 645–654, Feb. 2001.
- [24] M. García-Talavera, B. Quintana, E. García-Díez, and F. Fernández, "Studies on radioactivity in aerosols as a function of meteorological variables in Salamanca (Spain)," *Atmos. Environ.*, vol. 35, no. 2, pp. 221–229, Jan. 2001.
- [25] M. K. Pham, M. Betti, H. Nies, and P. P. Povinec, "Temporal changes of ^7Be , ^{137}Cs and ^{210}Pb activity concentrations in surface air at Monaco and their correlation with meteorological parameters," *J. Environ. Radioact.*, vol. 102, no. 11, pp. 1045–1054, Nov. 2011.
- [26] F. Piñero-García, M. A. Ferro-García, E. Chham, M. Cobos-Díaz, and P. González-Rodelas, "A cluster analysis of back trajectories to study the behaviour of radioactive aerosols in the south-east of Spain," *J. Environ. Radioact.*, vol. 147, pp. 142–152, Sep. 2015.
- [27] C. Dueñas, M. C. Fernández, S. Cañete, and M. Pérez, " ^7Be to ^{210}Pb concentration ratio in ground level air in Málaga (36.7°N , 4.5°W)," *Atmos. Res.*, vol. 92, no. 1, pp. 49–57, Mar. 2009.
- [28] F. Hernandez, L. Karlsson, and J. Hernandez-Armas, "Impact of the tropical storm Delta on the gross alpha, gross beta, ^{90}Sr , ^{210}Pb , ^7Be , ^{40}K and ^{137}Cs activities measured in atmospheric aerosol and water samples

- collected in Tenerife (Canary Islands),” *Atmos. Environ.*, vol. 41, no. 23, pp. 4940–4948, Jul. 2007.
- [29] F. Hernández, J. Hernández-Armas, A. Catalán, J. C. Fernández-Aldecoa, and L. Karlsson, “Gross alpha, gross beta activities and gamma emitting radionuclides composition of airborne particulate samples in an oceanic island,” *Atmos. Environ.*, vol. 39, no. 22, pp. 4057–4066, Jul. 2005.
- [30] K. Kourtidis, A. K. Georgoulas, M. Vlahopoulou, N. Tsirliganis, N. Kastelis, K. Ouzounis, and N. Kazakis, “Radon and radioactivity at a town overlying Uranium ores in northern Greece,” *J. Environ. Radioact.*, vol. 150, pp. 220–227, Dec. 2015.
- [31] B. Liu, T. Peng, H. Sun, and H. Yue, “Release behavior of uranium in uranium mill tailings under environmental conditions,” *J. Environ. Radioact.*, vol. 171, pp. 160–168, May 2017.
- [32] Organización Mundial de la Salud (WHO), “El radón y sus efectos en la salud,” 2016. [Online]. Available: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>. [Accessed: 22-Feb-2018].
- [33] J. Otero Pazos, Alberto & Fernández-Ibáñez, I & J. Piñón-Pazos, A & Calvo Guirado, Jose & Giz-Novo, “Estudio, medida y mitigación de la concentración de radón en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidade da Coruña.,” *Inf. la Construcción*, vol. 69, 2017.
- [34] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Radon: Assessment of Risks from Radon in Homes.,” 2003. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/>. [Accessed: 22-Feb-2018].
- [35] L. S. Quindós Poncela, *Radón <Un gas radiactivo de origen natural en su casa>*. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear, CSN.
- [36] Organización Mundial de la Salud (WHO), *MANUAL DE LA OMS SOBRE EL RADÓN EN INTERIORES. UNA PERSPECTIVA DE SALUD PÚBLICA*. Ginebra, 2015.
- [37] R. Lubin, Jay & Yuan Wang, Zuo & Boice, John & Yi Xu, Zhao & Blot, William & De Wang, Long & Kleinerman, “Risk of lung cancer and residential

- radon in China: pooled results of two studies.," *Int. J. cancer*, vol. 109, pp. 132–137, 2004.
- [38] H. B. Krewski, Daniel; Lubin, Jay H.; Zielinski, Jan M.; Alavanja, Michael; Catalan, Vanessa S.; Field, R. William; Klotz, Judith B.; Letourneau, Ernest G.; Lynch, Charles F.; Lyon, Joseph L.; Sandler, Dale P.; Schoenberg, Janet B.; Steck, Daniel J.; Stolwijk, "A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer.," *J. Toxicol. Environ. Heal. A.*, vol. 69, pp. 533–597, 2006.
- [39] D. R. Darby S, Hill D, Deo H, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Falk R, Farchi S, Figueiras A, Hakama M, Heid I, Hunter N, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagarde F, Mäkeläinen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruosteenoja E, Schaffrath Rosa, "Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe.," *Scand J Work Env. Heal.*, vol. 32, p. Suppl1:1-83, 2006.
- [40] M. J. Berenguer Subils, *NTP 440: Radón en ambientes interiores*, CENTRO NAC. 1997.
- [41] G. para la Salud, "Vive sin radón," 2018. [Online]. Available: <https://vivesinradon.org/>. [Accessed: 03-Apr-2018].
- [42] Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), *Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural*, BOE. España, 2011.
- [43] Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), "Cartografía del Potencial de Radón de España," 2017. [Online]. Available: <https://www.csn.es/>. [Accessed: 23-Feb-2018].
- [44] Marta García-Talavera San Miguel, J. L. M. Matarranz, R. G. de Mingo, J. P. G. Cadierno, and E. S. Mahou, *El mapa predictivo de exposición al radón en España*, Consejo de. Madrid, 2013.
- [45] E. Martinez Rey, Francisco Javier; Velasco Gomez, *Calidad de ambientes*

interiores, Paraninfo. Madrid, 2007.

- [46] U. Universidade da Coruña, *Plan Director de Infraestructuras da UDC*. A Coruña, 2009.
- [47] SAPHYMO, "Alphaguard-Professional Radon Monitor." [Online]. Available: <https://www.bertin-instruments.com/industry/nuclear/>. [Accessed: 13-Jun-2018].
- [48] P. Sahu, D. P. Mishra, D. C. Panigrahi, V. Jha, and R. L. Patnaik, "Radon emanation from low-grade uranium ore," *J. Environ. Radioact.*, vol. 126, pp. 104–114, Dec. 2013.
- [49] de C. J. F. Blanco-Rodríguez P, Fernández-Serantes LA, Otero-Pazos A, Calvo-Rolle JL, "Radon Mitigation Approach in a Laboratory Measurement Room," *Sensors (Basel)*., vol. 2017;17(5), 2017.
- [50] P. Korhonen, H. Kokotti, and P. Kalliokoski, "Survey and mitigation of occupational exposure of radon in workplaces," *Build. Environ.*, vol. 35, no. 6, pp. 555–562, Aug. 2000.
- [51] B. F. Vázquez, M. O. Adán, L. S. Quindós Poncela, C. S. Fernandez, and I. F. Merino, "Experimental study of effectiveness of four radon mitigation solutions, based on underground depressurization, tested in prototype housing built in a high radon area in Spain," *J. Environ. Radioact.*, vol. 102, no. 4, pp. 378–385, Apr. 2011.

TÍTULO: **ESTUDIO DE DISTINTOS PARÁMETROS RADIATIVOS Y
MEDIDAS DE MITIGACIÓN ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES**

ANEXOS

PETICIONARIO: **ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
AVDA. 19 DE FEBRERO, S/N
15405 - FERROL**

FECHA: **JUNIO DE 2018**

AUTOR: **EL ALUMNO**

Fdo.: **GORETTI ARIAS FERREIRO**

ANEXOS

11	ANEXOS I.....	105
11.1	Asignación de trabajo fin de máster.....	105

12 ANEXOS I

12.1 ASIGNACIÓN DE TRABAJO FIN DE MÁSTER



ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA

ASIGNACIÓN DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

En virtud de la solicitud efectuada por:
 En virtud da solicitude efectuada por:

APELLIDOS, NOMBRE: Arias Ferreiro, Goretti
 APELIDOS E NOME:

DNI: ████████ Fecha de Solicitud: FEB2018
 DNI: ████████ Fecha de Solicitude:

Alumno de esta escuela en la titulación de Máster en Eficiencia y Aprovechamiento Energético, se le comunica que la Comisión de Seguimiento del MEYAE ha decidido asignarle el siguiente Trabajo Fin de Máster:

O alumno de esta escola na titulación de Máster en Eficiencia y Aprovechamiento Energético, comunícaselle que a Comisión de Seguemento do MEYAE decidiu asignarlle o seguinte Traballo Fin de Máster:

Título T.F.M.: Estudio de distintos parámetros radiactivos y medidas de mitigación energéticamente eficientes.

Número TFM: 4523M01A021

TUTOR:(Titor) Calvo Rolle, Jose Luis

COTUTOR/CODIRECTOR: Alberto Otero Pazos

La descripción y objetivos del Trabajo son los que figuran en el reverso de este documento:

A descripción e obxectivos do proxecto son os que figuran no reverso deste documento.

Ferrol a Lunes, 18 de Junio del 2018

Retirei o meu Trabajo Fin de Máster o día ____ de ____ do ano _____

Fdo: Arias Ferreiro, Goretti

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO:Objeto:

Caracterización de distintos parámetros radiactivos y estudio de la influencia de dichos parámetros en la contaminación ambiental, así como posibles causas. Evaluación y valoración energética de la actuación de mitigación de radón en el laboratorio de radiactividad ambiental situado en la escuela universitaria politécnica de la UDC.

Alcance:

- Definición y comportamiento de diversos parámetros radiactivos, influencia meteorológica y de los contaminantes atmosféricos en dichos parámetros.
- Modelización.
- Mitigación de radón.
- Estudio de las medidas de mitigación llevadas a cabo en la escuela universitaria politécnica de la UDC.