Influencia de la meteorología en el nivel de radón en un laboratorio de medidas de radioactividad ambiental

The influence of meteorology on radon level in an environmental radioactivity measurements laboratory

Javier García Tobar [1] **y Luis Pujol** [*1]

Palabras clave

radón;
meteorología;
espectrometría gamma;
centelleo;

Sumario

En este artículo se estudia la influencia de la meteorología en el nivel de radón de un laboratorio de medidas de radiactividad ambiental. La concentración de radón y las condiciones meteorológicas se han medido durante un año en el laboratorio del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) de Madrid. El clima de Madrid es un clima mediterráneo con estaciones meteorológicas marcadas. Es conocido que la concentración de radón fluctúa por la variación de la meteorología. Primero se ha estudiado la influencia del nivel del radón en el fondo de los equipos de medida de radiactividad ambiental. Los resultados muestran que las medidas realizadas por espectrometría gamma se ven afectadas por el nivel del radón, pero parece que no ocurre lo mismo con las medidas realizadas con los equipos de centelleo líquido. No obstante, en el caso de la espectrometría gamma, las medidas de rutina que realiza el laboratorio no se ven afectadas y sólo podría darse algún efecto en la medida de radón en muestras de agua con actividades próximas a la actividad mínima detectable, en el rango de 1 – 10 Bq/l, y en la medida de cesio-137 en muestras de agua continental de gran volumen. A continuación, se ha utilizado un modelo de regresión lineal múltiple para explicar la variabilidad del radón en función de parámetros meteorológicos (presión, temperatura, humedad y tendencia barométrica). Se ha observado que el nivel medio de la concentración de radón es más alto en verano y otoño que en primavera e invierno. Finalmente, las series temporales de datos se han analizado usando el método de Lomb-Scargle para investigar las periodicidades en los datos de radón.

Keywords

radon;
meteorology;
gamma spectrometry;
scintillation;

Abstract

This paper studies the influence of meteorology on radon level of an environmental radioactivity measurement laboratory. Radon concentration and meteorological conditions are measured for a year in the laboratory of the Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) in Madrid. This location has a Mediterranean climate with marked seasons. It is well-known that radon concentration varies due to the variation of meteorology. Firstly, the influence of radon level on the background of the detectors has been analysed. The results show that gamma spectrometry measurements are affected by indoor radon level, but it doesn´t seem to occur the same with liquid scintillation measurements. However, the measurements performed routinely in the laboratory by gamma spectrometry are unaffected. Only in the determination of radon in water samples near the minimum detectable activity in the range of 1 - 10 Bq/l, and as cesium-137 in high volume water samples, there could be some effect. Then, a linear multiple regression model is used to explain variability in radon based on meteorogical parameters (pressure, temperature, humidity and barometric trend). There are seasonal variations because average radon levels are higher in summer and autumn than in spring and winter. Finally, time-series data are analyzed using the Lomb-Scargle Method to investigate their periodic behaviour.

1. INTRODUCCIÓN

El radón (^{222}Rn) es un gas radiactivo de origen natural que se forma a partir del ^{226}Ra dentro de la cadena de desintegración del ^{238}U (ver figura 1). Se trata de un gas noble, es decir, químicamente inerte, y con un periodo de semidesintegración de 3,8 días.

El radón se exhala del terreno y de los materiales de construcción, acumulándose en los sótanos de los edificios con escasa ventilación. La tasa de exhalación del radón depende de la geología local, permeabilidad del suelo, tipo de edificación y de las condiciones meteorológicas (Kolarž *et al.*, 2009).

Hay dos problemas asociados al radón, que se describen a continuación:

1. El radón en espacios interiores (viviendas, lugar de trabajo, etc.) constituye la fuente natural más importante de exposición a la radiación ionizante. Este aspecto está regulado en España en el Título VII del Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (BOE 26/07/2001)[1]. Además, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2009) considera que la inhalación de radón y sus descendientes es la segunda causa de cáncer de pulmón.
2. La presencia de gas radón debe ser controlada en un laboratorio de radiactividad ambiental, ya que este gas contribuye al fondo radiactivo de los detectores y

[*] Corresponding author: luis.pujol@cedex.es

[1] Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX, Madrid, España.

[1] Modificado por el BOE 18/11/2010 y desarrollado en la instrucción IS-33 del CSN (BOE 26/1/2012) sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.

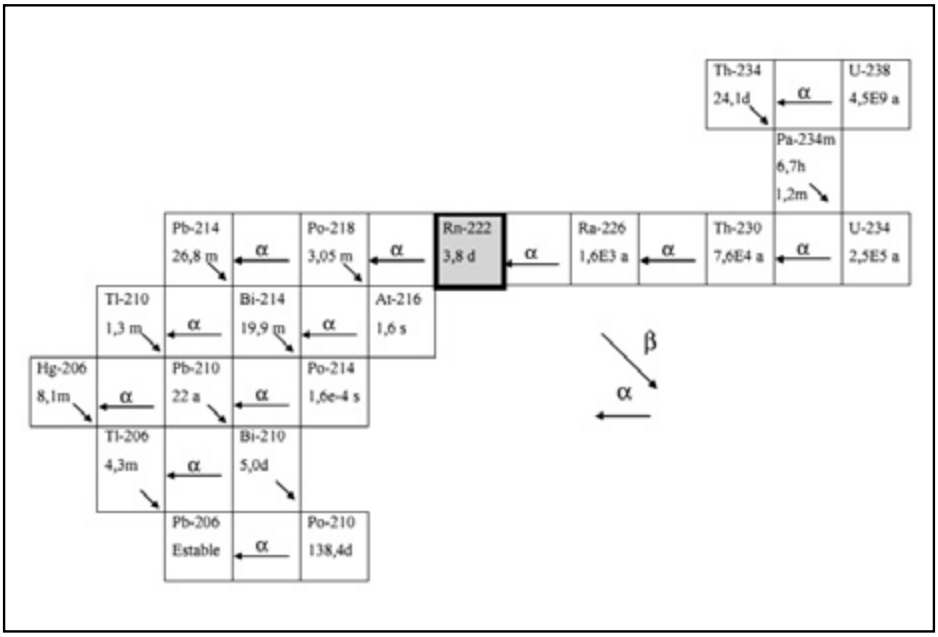

Figura 1. Serie natural del uranio-238 (el radón está destacado en negrita).

puede afectar a las medidas del laboratorio (Bossew, 2005; Udovičić *et al.,* 2009).

Este artículo ha sido suscitado por la segunda problemática, porque el laboratorio de radiactividad ambiental del CEDEX tiene equipos de medida de radiactividad ambiental (detectores de espectrometría gamma y detectores de centelleo líquido).

Un primer objetivo ha sido la determinación de la influencia del nivel del radón en el fondo de los detectores de medida del laboratorio.

Un segundo objetivo ha sido la utilización de un modelo de regresión múltiple para relacionar el radón con un conjunto de variables meteorológicas con la finalidad de conocer el comportamiento del radón para unas condiciones meteorológicas dadas y, por ende, poder predecir su concentración. Finalmente, se han calculado las componentes periódicas del radón utilizando el análisis espectral y se han comparado con los datos encontrados en la bibliografía.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La concentración de radón en el aire del laboratorio del CEDEX se midió durante un año, desde junio de 2012 hasta mayo de 2013. De forma simultánea, se obtuvo la información meteorológica de una estación de observación gestionada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) y que está próxima al laboratorio.

2.1. Descripción del laboratorio

El laboratorio de medida de radiactividad ambiental está situado en el último sótano del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX, aproximadamente a diez metros de profundidad. Este laboratorio dispone de detectores de espectrometría gamma y detectores de centelleo líquido (ver figura 2).

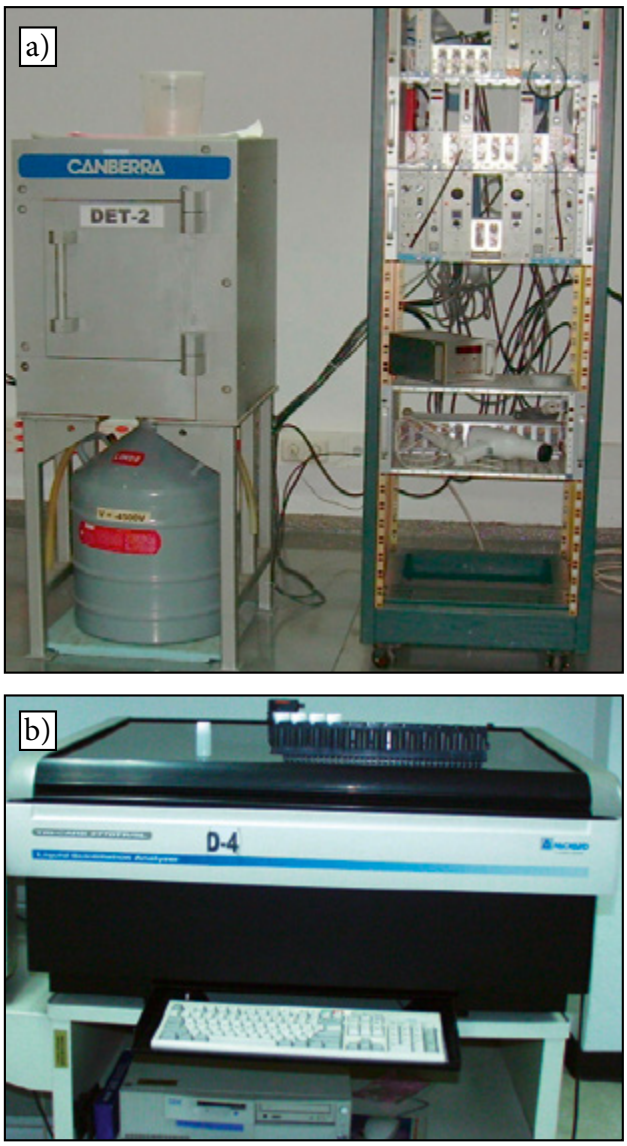

Figura 2. Equipos de medida de radiactividad ambiental del laboratorio: a) espectrometría gamma y b) centelleo líquido.

El laboratorio está climatizado para que la temperatura se mantenga estable en torno a 21 ºC. Este sistema de climatización introduce aire del exterior que reduce el nivel de radón del laboratorio.

2.2. El equipo de medida de radón

Las medidas de radón se han obtenido con una cámara de ionización portátil modelo "AlphaGUARD" (ver figura 3). Con este detector se ha medido la concentración de actividad de radón en el laboratorio, obteniéndose una medida integrada cada hora. El equipo también dispone de sensores para medir las condiciones ambientales de presión, temperatura y humedad.

Figura 3. Detector para medir gas radón en continuo modelo "AlphaGUARD".

En la tabla 1 se resumen las especificaciones técnicas destacables del equipo (Genitron Instruments, 2013).

El detector se situó a 1 m sobre el nivel del suelo y a 50 cm de la pared más cercana, cumpliendo con la recomendación dada por el Consejo de Seguridad Nuclear (2010) para la colocación de detectores de radón. Durante las medidas se procuró que las entradas del personal al interior del laboratorio fuesen mínimas para evitar cualquier tipo de influencia en el nivel de radón. Asimismo, no se modificó la climatización del laboratorio.

2.3. Descripción de los datos

En este artículo se han utilizado los siguientes datos: 1) medidas de rutina de los equipos de medida de radiactividad (detectores de espectrometría gamma y detectores de centelleo líquido), 2) parámetros ambientales del interior del laboratorio y 3) parámetros meteorológicos.

1. Para estudiar una posible influencia del radón en las medidas de rutina que realiza el laboratorio por las técnicas de espectrometría gamma y centelleo líquido, se han seleccionado medidas rutinarias de muestras por espectrometría gamma y medidas rutinarias de fondo por centelleo líquido, respectivamente. En el caso de espectrometría gamma, se han seleccionado cinco muestras para cada estación del año medidas durante aproximadamente tres días. El intervalo de muestras comprende desde verano de

Tabla 1. Especificaciones técnicas del detector AlphaGUARD

Fabricante	Genitron Instruments (Alemania)
Tipo de detector	Cámara de ionización, modelo "AlphaGUARD"
Volumen activo del detector	0,56 litros
Modo de operación	Modo difusión (radón en aire): cada 10 min durante un ciclo de 60 min
Rango de operación	Nivel de radón: desde 2 Bq/m^3 hasta 2·10^6 Bq/m^3

Tabla 2. Número de elementos y de huecos (entre paréntesis) de las series temporales de datos

Mes y Estación	Datos laboratorio	Datos de la estación meteorológica			
	(radón, P, T, H)	Presión	Temperatura	Humedad	Velocidad viento
Junio	712(8)	720	474(246)		-
Julio	744	744	688(56)		-
Agosto	628(116)	744	672(72)		-
Verano 2012	2084(124)	2208	1834(374)		-
Septiembre	-	744	744		-
Octubre	730(14)	744	666(78)		-
Noviembre	562(158)	720	215(505)		-
Otoño 2012	1292(172)	1464	881(583)		-
Diciembre			741 (3)		
Enero			688(56)		
Febrero			672		
Invierno 2013			2101(59)		
Marzo			744		
Abril			720		
Mayo	744		729(15)		
Primavera 2013	2208		2193(15)		

2012 hasta primavera de 2013. En concreto, se ha determinado la tasa de cuentas del fotopico gamma de 351,92 keV del ^{214}Pb, que es un descendiente del radón (ver figura 1). En el caso del centelleo líquido, se ha utilizado el histórico de fondos de dos detectores desde el año 2001 hasta el año 2013. Este histórico de 12 años ha permitido realizar un análisis mensual.

2. Parámetros ambientales en el interior del laboratorio: concentración de radón (Bq/m^3), presión atmosférica (hPa), temperatura (ºC) y humedad relativa (%). Estos valores se han obtenido cada hora con el detector "AlphaGUARD".
3. Parámetros meteorológicos: presión atmosférica y su tendencia[2] (hPa), temperatura (ºC), humedad relativa (%) y la velocidad del viento (m/s).

La información meteorológica se obtuvo cada hora de la estación de AEMet situada en la parte más alta del "Parque del Retiro" a escasos 700 metros del laboratorio del CEDEX. Esta estación se identifica con el nº 3195 dentro de la red de estaciones automáticas de superficie de AEMet.

En la tabla 2 se indica el número de elementos que componen cada serie de datos según el mes y la estación del año. El número de huecos o elementos no disponibles en las series de datos se expresan con un número entre paréntesis. Debido a que todos los datos del laboratorio se han obtenido con el mismo equipo, coincide el número de elementos y huecos para las series de datos de radón, presión (P), temperatura (T) y humedad (H). También coincide el número de elementos y huecos de diciembre 2012 a abril 2013 en los datos del laboratorio y de la estación meteorológica. Sólo se tienen datos meteorológicos sobre la velocidad del viento a partir del mes de diciembre de 2012.

3. MÉTODOS MATEMÁTICOS

Para estudiar el comportamiento del gas radón ante variaciones de la meteorología se ha utilizado un modelo de regresión lineal múltiple y un método de análisis espectral. Con el método de regresión se desea predecir el nivel de radón en función de los parámetros meteorológicos, mientras que con el método de análisis espectral se determinan sus componentes periódicas.

3.1. Modelo de regresión lineal múltiple

Con este método se relaciona la concentración de radón en el interior del laboratorio, que es la variable dependiente, con parámetros ambientales del interior del laboratorio y meteorológicos que son las variables explicativas o independientes. Para resolver este problema se utiliza un modelo de regresión lineal múltiple (en adelante, MRLM), en donde se incluyen n variables explicativas para determinar el valor estimado de la variable dependiente y. El valor estimado se obtiene como una combinación lineal de las variables explicativas, como se muestra a continuación.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \ldots + \beta_n \cdot x_n \qquad (1)$$

donde β_0 es la constante de regresión y $\beta_1 \ldots \beta_n$ son los coeficientes de regresión.

Los coeficientes de regresión representan el incremento de la respuesta media cuando la variable explicativa aumenta en una unidad y el resto de variables no cambian. Estos coeficientes se han calculado por el método de mínimos cuadrados. El MRLM y las técnicas de análisis complementarias se han realizado con el programa informático Minitab. Para la interpretación de los resultados se recomienda consultar UOC (2014). Se ha realizado un MRLM para cada estación del año. En la tabla 3 se indican los intervalos de medidas que se han seleccionado para aplicar el MRLM a cada estación del año.

Tabla 3. Intervalos de medidas seleccionados en cada estación del año

Estación del año	Intervalo de medidas	Número de datos
Verano 2012	1 al 18 de julio	432
Otoño 2012	1 al 26 de octubre	599
Invierno 2012 / 2013	1 al 16 de enero	384
Primavera 2013	17 de marzo al 4 abril	376

3.2. Análisis espectral

El análisis espectral se ha realizado mediante el método de Lomb-Scargle que transforma series temporales formadas por datos, ya sean distribuidos uniformemente o no en el tiempo, en un espectro de potencia cuya representación gráfica se denomina periodograma. Este método fue propuesto inicialmente por Lomb (1976) y mejorado por Scargle (1982).

El método de Lomb-Scargle es una variación de la Transformada Discreta de Fourier para una serie de datos dada $X(t_i)$ para $i = 1,2,\ldots, N_0$. Consiste básicamente en descomponer la serie temporal de datos en funciones de senos y cosenos. La frecuencia angular se expresa como ω y es igual a $2\pi f$. El periodograma clásico fue modificado por Lomb y Scargle obteniendo la siguiente expresión:

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^{N_0} X_j \cdot \cos\left(\omega \cdot (t_j - \tau)\right) \right)^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2\left(\omega \cdot (t_j - \tau)\right)} + \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_0} X_j \cdot sen\left(\omega \cdot (t_j - \tau)\right) \right)^2}{\sum_{j=1}^{N_0} sen^2\left(\omega \cdot (t_j - \tau)\right)} \right]^2 \qquad (2)$$

donde P_X se define como la densidad espectral de potencia, también conocida por las siglas PSD o "Power Spectral Density", y el término τ se define a continuación:

$$tg\ (2 \cdot \omega \cdot \tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} sen\ (2 \cdot \omega \cdot t_j)}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos\ (2 \cdot \omega \cdot t_j)} \qquad (3)$$

Los periodogramas representan la densidad espectral de potencia en el eje de ordenadas y en el eje de abscisas el periodo o la frecuencia. Un pico, o la componente periódica que

[2] Se entiende por tendencia barométrica a los cambios registrados en la presión barométrica durante las tres últimas horas.

representa, es más relevante cuanto mayor sea su amplitud o PSD. En este artículo se ha utilizado el programa informático "Peranso" (Vanmunster, 2007) en el que está implementado el método de análisis espectral de Lomb-Scargle.

Para encontrar características comunes en dos o más espectros, se utiliza el método JPS ("Joint Power Statistic") porque proporciona una medida de la correlación dada por una función formada por el producto de espectros (Javorsek *et al.*, 2010). En el caso de aplicar este método a tres variables (por ejemplo: presión, temperatura y humedad), el valor de JPS se determina así:

$$JPS_3 = \frac{2{,}916 \cdot X^2}{1{,}022 + X} \qquad (4)$$

donde X es igual a la media geométrica de la densidad espectral de potencia de cada variable, esto es:

$$X = \left(PSD_{presión} \cdot PSD_{temperatura} \cdot PSD_{humedad} \right)^{1/3} \qquad (5)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Influencia del radón en el fondo de los detectores de radiación

Detectores de espectrometría gamma (período 2012-2013)

En la figura 4 se representa para cada muestra su tasa de cuentas para el ^{214}Pb y la concentración de radón del laboratorio. La tasa de cuentas se define como el número de cuentas por unidad de tiempo, en nuestro caso, se expresa en cuentas por cada 1.000 segundos, es decir, cpks. En general, la tasa de cuentas del ^{214}Pb aumenta con el nivel de radón del laboratorio. Además, se observan dos poblaciones según que las medidas de fondo se hayan realizado en las estaciones de verano-otoño o de invierno-primavera. En consecuencia, estos datos parecen demostrar que: 1) existe una relación entre el aumento de fondo en los equipos de espectrometría gamma y la concentración media de radón en el laboratorio y 2) los niveles medios de radón en el laboratorio parecen ser mayores en las estaciones de verano-otoño.

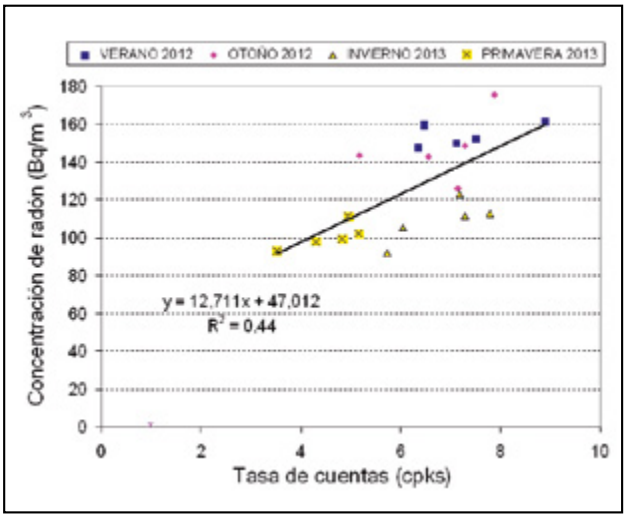

Figura 4. Tasa de cuentas del fotopico de 351,92 keV del plomo-214 y el nivel de radón del laboratorio clasificadas por la estación del año.

Detectores de centelleo líquido (período 2001-2013)

Los fondos obtenidos con los detectores de centelleo líquido se han promediado según el mes del año en el cual se realizaron las medidas (ver figura 5). Los fondos se expresan en cuentas por minuto (cpm). No se aprecian variaciones significativas en los valores mensuales de fondo, que podrían indicar una posible correspondencia con la fluctuación estacional del nivel de radón del laboratorio. Sin embargo, es recomendable realizar más estudios al respecto para confirmar que efectivamente el nivel de radón no afecta a las medidas por centelleo líquido. Las diferencias en el fondo de los detectores 3 y 4 son debidas a las características de esos equipos y no al nivel ambiental de radón.

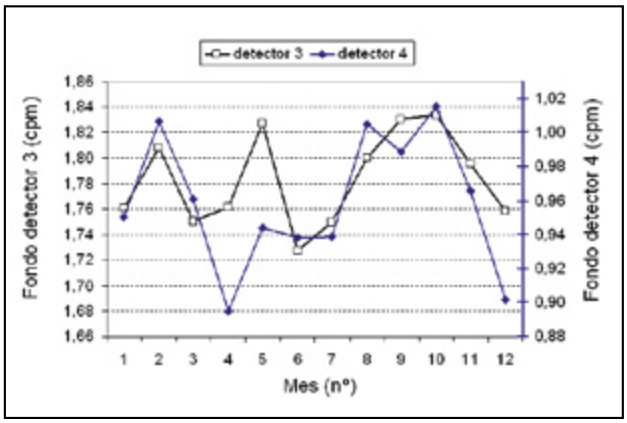

Figura 5. Fondo medio mensual entre 2001 y 2013 de los detectores de centelleo líquido denominados 3 y 4.

En conclusión, el análisis de los datos indica que no existe influencia significativa del radón en las medidas de rutina que realiza el laboratorio con los detectores de espectrometría gamma y detectores de centelleo, salvo en aquellos casos en que la determinación del fondo del radón-222 por espectrometría gamma sea necesaria en el cálculo de la actividad de algún ensayo o interfiera en la determinación de algún radionucleido. Actualmente, estas situaciones pueden darse únicamente en dos ensayos diferentes que realiza el laboratorio: 1) en la medida de radón en muestras de agua con actividades próximas a la actividad mínima detectable, esto es, en el rango de 1 – 10 Bq/l, y 2) en la medida de cesio-137 en muestras de agua continental de gran volumen, en las que el cesio-137 tiene un fotopico de 661,6 keV, cercano al fotopico gamma de 665,4 keV del bismuto-214, descendiente del radón-222, que puede interferir en su cálculo.

4.2. Series de datos

La figura 6 presenta el nivel de radón medido en el interior del laboratorio y los datos meteorológicos de presión, temperatura y humedad proporcionados por la estación de AEMet. En el mes de septiembre no hay medidas de radón, por lo que hay un hueco en la serie temporal de datos. Se observa que los niveles de radón en el interior del laboratorio varían estacionalmente a lo largo del año. En la tabla 4 se presenta un estudio estadístico de las series temporales de radón y parámetros meteorológicos clasificados por estación del año.

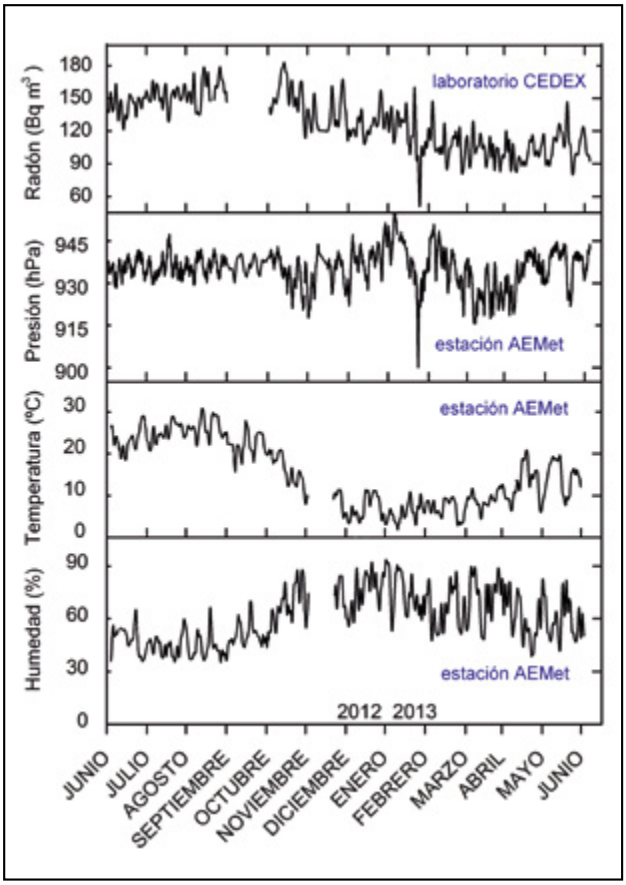

Figura 6. Datos de radón suavizados (ver nota a pie de tabla 4) del laboratorio del CEDEX e información meteorológica de la estación de AEMet de presión, temperatura y humedad desde junio 2012 hasta mayo 2013.

La concentración media de radón ha sido mayor en verano y otoño que en invierno y primavera. Se observa que la diferencia entre el nivel máximo y mínimo de radón puede superar los 200 Bq/m^3 como sucede en invierno. Los coeficientes de Pearson entre el radón y el resto de variables son bajos y, en algunos casos, su signo cambia de una estación del año a otra. Por esta razón en el apartado 4.3 se utiliza un método de análisis multivariante (MRLM) para explicar las variaciones del nivel de radón según un conjunto de variables.

En la figura 7 se representa el nivel de radón y la presión atmosférica durante dos semanas del mes de enero de 2013. Hay una disminución importante en el nivel de radón del laboratorio que está precedido por un descenso significativo de la presión atmosférica. Este hecho podría confirmar que efectivamente hay una relación de causalidad entre ambas variables.

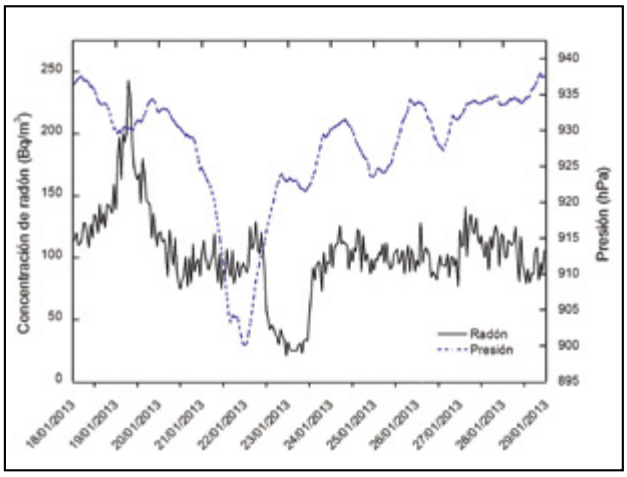

Figura 7. Nivel de radón y presión atmosférica en un intervalo correspondiente a enero de 2013.

Si analizamos el comportamiento diario del nivel de radón en el laboratorio, se observa que presenta valores máximos a primera hora de la mañana mientras que los mínimos se alcanzan por la tarde (ver figura 8). Este comportamiento ha sido observado por otros autores (Miles y Algar, 1988; Kolarž *et al.*, 2009). En la figura 8 se observa que este comportamiento es independiente de la estación del año, siendo en los meses de verano y otoño más destacable.

Tabla 4. Estudio estadístico de los datos de radón sin suavizar[a] y parámetros meteorológicos (presión, temperatura y humedad)

	Parámetro	Media	Desv. Típica	Máximo	Mínimo	Max – Min	Pearson
Verano 2012	Radón (Bq/m^3)	151,4	25,8	240,0[a]	74,0[a]	166	1
	Presión (hPa)	935,9	3,2	947,4	928,3	19,1	-0,13
	Temperatura (ºC)	26,7	5,2	40,4	13,9	26,5	-0,56
	Humedad (%)	44,0	12,2	92,0	18,0	74,0	0,33
Otoño 2012	Radón (Bq/m^3)	144,7	25,7	225,0[a]	77,0[a]	148,0	1
	Presión (hPa)	933,0	5,8	943,8	917,7	26,1	-0,08
	Temperatura (ºC)	13,8	5,3	27,4	0,9	26,5	0,23
	Humedad (%)	68,9	15,2	98,0	34,0	64,0	0,38
Invierno 2013	Radón (Bq/m^3)	116,8	23,4	243,0a	21,0[a]	222,0	1
	Presión (hPa)	912,8	7,8	955,8	900,1	55,7	0,34
	Temperatura (ºC)	6,70	3,3	16,6	-0,9	17,5	0,00
	Humedad (%)	73,0	16,6	98,0	27,0	71,0	0,44
Primavera 2013	Radón (Bq/m^3)	103,0	18,0	190,0[a]	58,0[a]	132,0	1
	Presión (hPa)	932,6	7,2	944,7	914,9	29,8	-0,02
	Temperatura (ºC)	12,1	5,1	28,0	0,7	27,3	0,20
	Humedad (%)	64,7	18,6	97,0	25,0	72,0	0,16

Nota[a]: En algunos casos no coinciden los máximos y mínimos de radón de la tabla 4 con la figura 6, ello es debido que en la figura se han suavizado los datos para visualizar mejor el comportamiento del radón.

Conviene señalar que, en Sesana *et al.* (2003), donde se comparan las concentraciones de radón en el mes de enero y en julio de 2000, se observa el mismo comportamiento a lo largo del día encontrado en el laboratorio del CEDEX, aunque estos autores encuentran una mayor concentración de radón en invierno (mes de enero) que en verano (mes de julio). Sin embargo, en lugares subterráneos, otros autores como Perrier y Richon (2010), han encontrado que la relación entre la concentración de radón en verano e invierno era superior a 1, siendo este resultado similar al encontrado en el laboratorio del CEDEX.

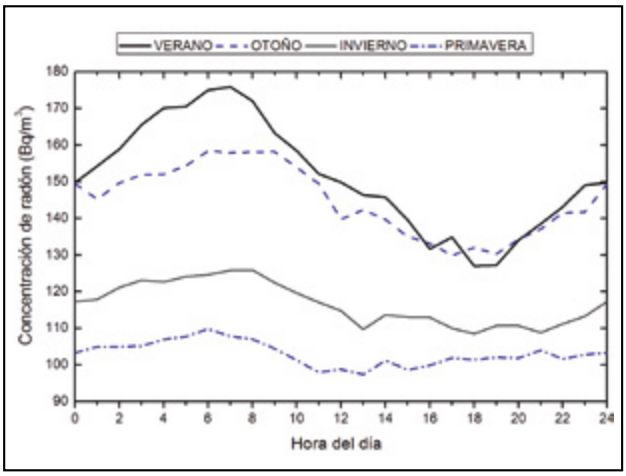

Figura 8. Nivel de radón medio a lo largo del día en el laboratorio de radiactividad ambiental para las cuatro estaciones del año.

Este hecho indica que los resultados obtenidos son provisionales para el laboratorio de medidas de radiactividad del CEDEX y que para llegar a resultados más concluyentes sería necesario la realización de un estudio más dilatado en el tiempo.

4.3. Modelo de regresión lineal múltiple

Para seleccionar las variables del MRLM se procede a descartar aquellas que tengan colinealidad y multicolinealidad. Una vez hecho esto, se comprueba con qué modelo se obtiene un mejor ajuste. A cada variable se le ha asignado un código (ver tabla 5).

Tabla 5. Lugar de medida, código y significado de las variables

Lugar de medida	Código	Significado
Otras variables	O	Hora de la medida
Laboratorio CEDEX	C	Concentración de radón
	P	Presión atmosférica
	T	Temperatura
	H	Humedad relativa
Estación meteorológica AEMet	p	Presión atmosférica
	x	Tendencia barométrica
	t	Temperatura
	h	Humedad relativa
	v	Velocidad del viento

La colinealidad se identifica por medio de la matriz de correlaciones que contiene los coeficientes de Pearson para todas las variables objeto del estudio, excepto el radón que es la variable dependiente. En la tabla 6 se muestra la matriz de correlaciones correspondiente al intervalo de medidas realizadas en primavera (el resultado es similar en el resto de estaciones). Las correlaciones más altas se han destacado en negrita. Como era previsible, hay una correlación alta entre las presiones P y p, por lo que una de las dos variables se tiene que excluir del MRLM. Hay otras variables que también muestran correlaciones relativamente altas.

Se ha seleccionado un MRLM formado por las variables O-p-h-t-x, esto es, la variación de la concentración de radón a lo largo del día y los parámetros meteorológicos de AEMet. En la tabla 7 se indica la estadística del MRLM

Tabla 6. Matriz de correlaciones para primavera

Variable	O	P	H	T	p	h	t	x	v
O	1								
P	-0,035	1							
H	0,084	-0,148	1						
T	-0,006	-0,173	0,087	1					
p	-0,017	**0,997**	-0,141	-0,168	1				
h	-0,205	**-0,411**	**0,399**	0,030	**-0,421**	1			
t	**0,443**	0,159	**0,460**	0,068	0,183	**-0,478**	1		
x	**0,442**	0,104	0,017	-0,082	0,082	-0,072	-0,193	1	
v	0,275	0,081	0,454	0,008	0,092	-0,263	**0,617**	0,109	1

Tabla 7. Estadística de la regresión múltiple aplicado a un modelo de 5 variables en primavera

Variable	Coeficiente	Desviación típica	t-Student	p-valor	VIF
Constante	578,70	178,70	3,24	0	-
O	0,21	0,13	1,58	0,12	1,33
p	-0,56	0,19	-2,92	0	1,25
t	0,57	0,36	1,60	0,11	1,67
h	0,40	0,06	6,74	0	1,60
x	-5,78	0,88	-6,54	0	1,09

de este modelo para las medidas realizadas en primavera (se han obtenido resultados similares con el resto de estaciones del año). La multicolinealidad del modelo se ha evaluado a través del factor VIF (valor de inflación de la varianza), que no presenta ningún valor problemático.

La concentración de radón (C) se ha estimado como una función de la hora del día (O) y las variables meteorológicas dadas por la presión (p), temperatura (t), humedad (h) y tendencia barométrica (x).

Verano: $C = 1888 - 0{,}84\ O - 1{,}83\ p + 1{,}35\ t + 0{,}55\ h - 1{,}93\ x$ ($R^2 = 0{,}45$)

Otoño: $C = 1197 - 0{,}89\ O - 1{,}17\ p + 1{,}53\ t + 0{,}62\ h + 0{,}33\ x$ ($R^2 = 0{,}35$)

Invierno: $C = -667 - 0{,}34\ O + 0{,}83\ p - 0{,}41\ t + 0{,}32\ h - 2{,}02\ x$ ($R^2 = 0{,}29$)

Primavera: $C = 579 + 0{,}21\ O - 0{,}56\ p + 0{,}57\ t + 0{,}40\ h - 5{,}78\ x$ ($R^2 = 0{,}32$)

Otros autores, Dubčáková y Praks (2010), y Simion *et al.* (2013) han realizado estudios similares, obteniendo coeficientes de determinación similares a los obtenidos en este artículo. En las figuras 9, 10, 11 y 12 se representan los valores reales de concentración de radón y la concentración estimada de radón calculada por el MRLM para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. En general, se observa un buen ajuste entre las concentraciones de radón estimadas con el modelo y las concentraciones de radón medidas con el AlphaGUARD.

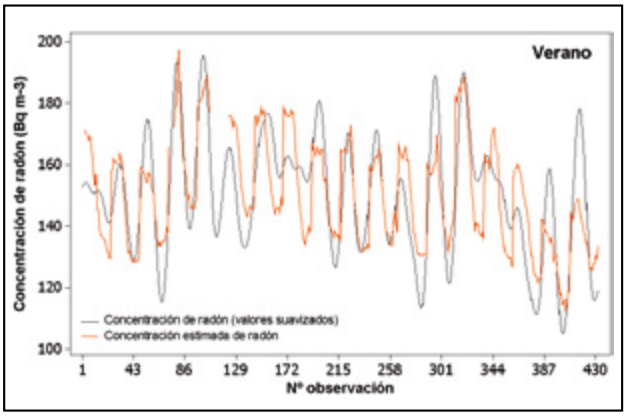

Figura 9. Medidas de radón realizadas en verano y estimaciones de la concentración de radón obtenidas por el MRLM.

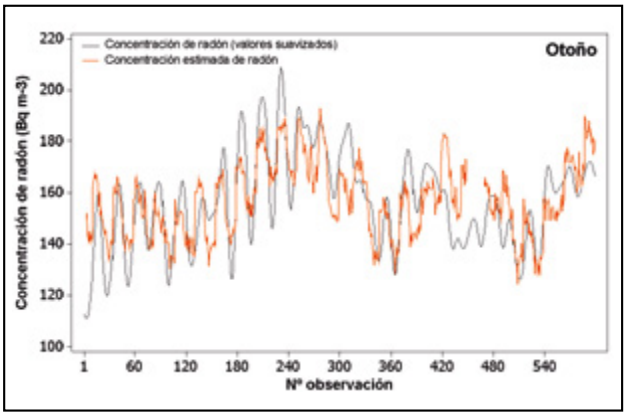

Figura 10. Medidas de radón realizadas en otoño y estimaciones de la concentración de radón obtenidas por el MRLM.

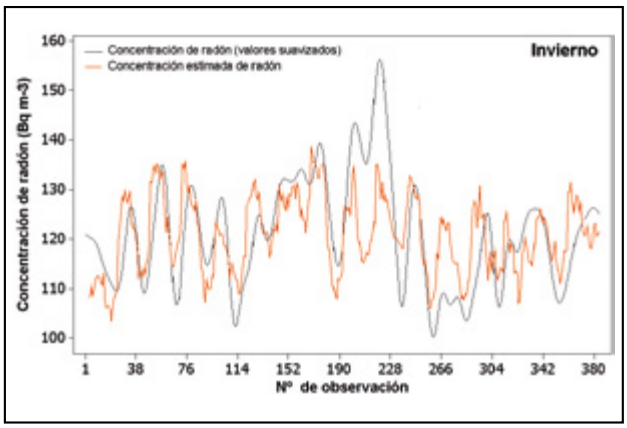

Figura 11. Medidas de radón realizadas en invierno y estimaciones de la concentración de radón obtenidas por el MRLM.

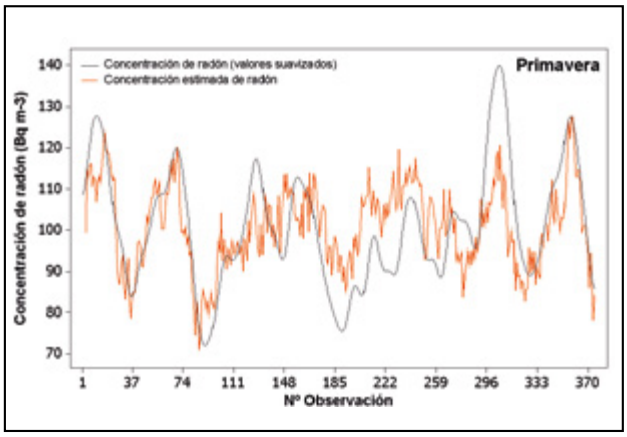

Figura 12. Medidas de radón realizadas en primavera y estimaciones de la concentración de radón obtenidas por el MRLM.

4.4. Análisis espectral

El análisis espectral se ha realizado para determinar las periodicidades a corto plazo (entre 4 y 40 horas) y a largo plazo (entre 40 y 800 horas). El método JPS ha permitido combinar los periodogramas de presión, temperatura y humedad en un solo periodograma.

En la figura 13 se muestran los periodogramas obtenidos entre 4 y 40 horas para cada estación del año. Se han identificado cinco componentes periódicas en el radón y en las variables meteorológicas analizadas con el método JPS. Como puede observarse en la figura 13, los periodos son de 4,8 h, 6 h, 8 h, 12 h y 24 h. Además, el radón y las variables meteorológicas presentan un comportamiento periódico similar.

Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por otros autores como Galmarini (2006). Este autor indica que estas componentes rigen el comportamiento a corto plazo del radón y que este comportamiento está ligado a la evolución diaria del espesor de la capa límite de la atmósfera (zona más baja de la troposfera que está en contacto con la superficie terrestre) y de la emisión constante de radón procedente del suelo. Otros autores como Udovičić *et al.* (2011) solo han encontrado la periodicidad de 24 horas.

En la figura 14 se muestran los periodogramas entre 40 y 800 h, ya que por encima de este rango no se observan picos significativos. En estos periodogramas se muestra que

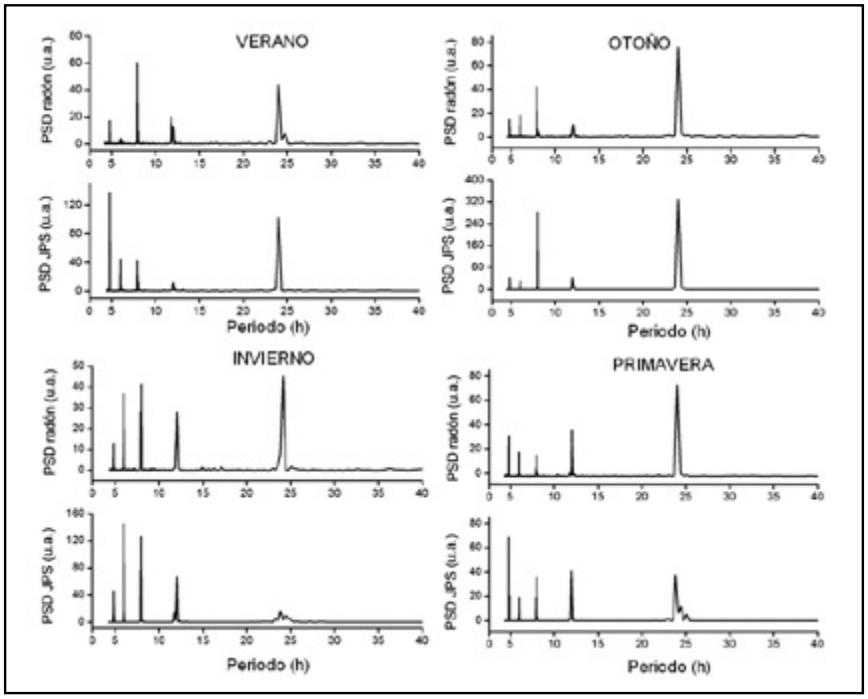

Figura 13. Periodogramas de Lomb-Scargle entre 4 y 40 horas para el radón y las variables meteorológicas combinadas por el método JPS (u.a., unidades arbitrarias).

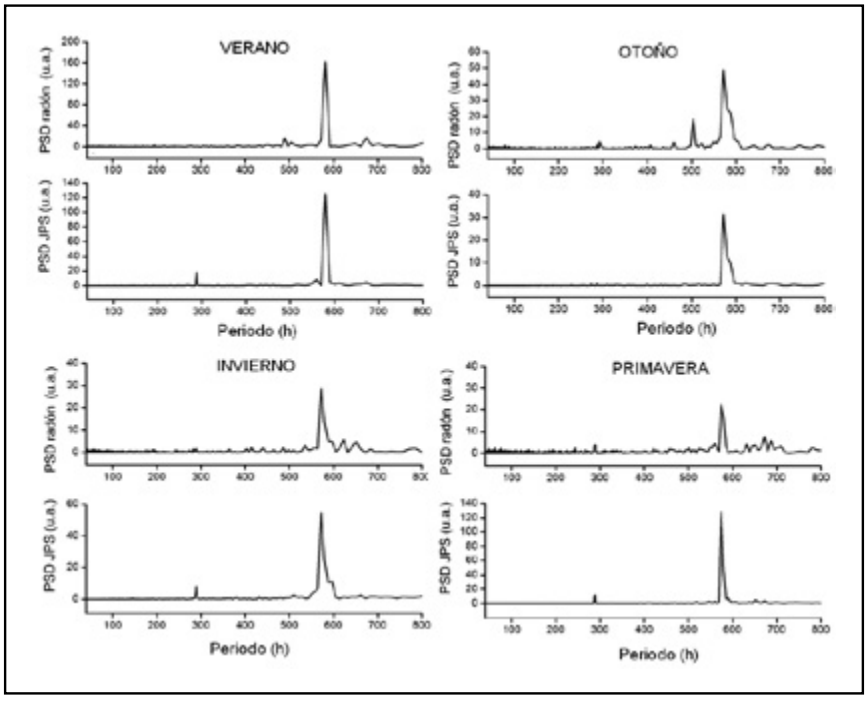

Figura 14. Periodogramas de Lomb-Scargle entre 40 y 800 horas para el radón y las variables meteorológicas combinadas por el método JPS (u.a., unidades arbitrarias).

el radón presenta una periodicidad cada 24 días (578 h). En este caso, solo se ha encontrado el artículo de Pereira (1990) con periodicidades similares (entre 25 y 30 días) en el hemisferio sur, relacionado con emisiones de radón procedentes del deshielo, según se indica en dicha referencia.

5. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados experimentales permite obtener las siguientes conclusiones:

1. Los resultados obtenidos en este artículo parecen indicar que el nivel de radón del laboratorio afecta al fondo en las medidas por espectrometría gamma, pero que no influye en las medidas de fondo por centelleo líquido. En cualquier caso, estos resultados requieren una mayor investigación. En particular, debería estudiarse los dos ensayos que realiza el laboratorio en las que esta influencia puede ser más significativa. Estos son, la determinación del radón en muestras de agua cerca de la actividad mínima detectable, esto es, en el

rango de 1 – 10 Bq/l, y en la medida del cesio-137 en muestras de agua de gran volumen.

2. Se observa que el nivel medio de concentración de radón en el periodo estudiado ha sido mayor en verano/otoño que en invierno y primavera. En algunos casos, variaciones bruscas de las condiciones meteorológicas pueden afectar a los niveles de radón. Además, se observa que el radón varía a lo largo del día, presentando valores máximos a primera hora de la mañana mientras que los mínimos se alcanzan por la tarde. Este comportamiento se ha comprobado para las cuatro estaciones del año, manifestándose de forma más llamativa en las estaciones de verano/otoño. Conviene señalar que los resultados obtenidos en este artículo son provisionales y que la variación de los niveles medios mensuales de la concentración de radón a lo largo del año habrá que analizarla con un registro histórico de medidas plurianual que actualmente está en ejecución.
3. En el MRLM que se ha utilizado para estimar el nivel de radón se tienen en cuenta las variables meteorológicas. Las variables seleccionadas permiten realizar un buen ajuste para explicar el comportamiento general del radón. El resto de la variación del radón puede explicarse por otros factores como la tasa de exhalación de radón de los materiales de construcción o por la propia ventilación del laboratorio, que pueden afectar al nivel de radón en espacios interiores.
4. A partir del análisis espectral de las series de datos, se ha comprobado que el radón fluctúa en el laboratorio del CEDEX con periodicidades cortas (4,8 h, 6 h, 8 h, 12 h y 24 h) y, a más largo plazo, con una periodicidad de 24 días.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del Proyecto I+D con código 27-04-2010 del CEDEX: "Estudios para la mejora de la determinación de emisores gamma mediante detectores de semiconductor y su aplicación a la medida de la radiactividad ambiental en muestras de agua". La información meteorológica ha sido proporcionada por AEMet.

7. BIBLIOGRAFÍA

Bossew P. (2005). A very long-term HPGe-background gamma spectrum. "Applied Radiation and Isotopes", 62, 635–644.

BOE 26/07/2001. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.

BOE 26/01/2012. Instrucción IS-33, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.

Consejo de Seguridad Nuclear (2010). Guía de Seguridad GSG-11.01: Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Editado por el CSN, 15-16.

Dubčáková R. y Praks, P. (2010). Statistical modelling of indoor radon concentration using meteorological parameters. "Reliability: Theory & Applications", 16, 32-39.

Galmarini, S. (2006). One year of ^{222}Rn concentration in the atmospheric surface layer. "Atmospheric Chemistry and Physics", 6, 2865-2886.

Genitron Instruments (2013). Products: Radon Monitoring with AlphaGUARD (online), http://saphymo.de//download/ag_fb_gb_05_2011.pdf (22 de enero de 2014).

Javorsek D., Sturrock P.A., Lasenby R.N., Lasenby A.N., Buncher J.B., Fischbach E., Gruenwald J.T., Hoft A.W., Horan T.J., Jenkins J.H., Kerford J.L., Lee R.H., Longman A., Mattes J.J., Morreale B.L., Morris D.B., Mudry R.N. y Newport J.R (2010). Power spectrum analysis of nuclear decay rates. "Astroparticle Physics", 34, 173-178.

Kolarž P.M., Filipović D.M. y Marinković B.P. (2009). Daily variations of indoor air-ion and radon concentrations. "Applied Radiation Isotopes", 67, 2062-2067.

Lomb N.R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. "Astrophysics and Space Science", 39, 447-462.

Miles J.C.H y Algar R. A. (1988). Variations in radon-222 concentrations: "Journal Radiological Protection", 8, 103-105.

Pereira E. B. (1990). Radon-222 time series measurements in the Antarctic peninsula (1986-1987). "Tellus", 42B, 39-45.

Perrier F. y Richon P. (2010). Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing. "Journal of Environmental Radioactivity", 101, 279-296.

Scargle J.D. (1982). Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. "Astrophysics Journal", 263, 835-853.

Sesana L., Caprioli E. y Marcazzan G.M. (2003). Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. "Journal of Environmental Radioactivity", 65, 147-160.

Simion, F., Cuculeanu, V., Simion E. y Geicu, A. (2013). Modeling the ^{222}Rn and ^{220}Rn progeny concentrations in atmosphere using multiple linear regression with meteorogical variables as predictors. "Romanian Reports in Physics", 65, 524-544.

Udovičić V., Grabež B., Dragić A., Banjanac R., Joković D., Panić B., Joksimović D., Puzović J. y Aničin I. (2009). Radon problem in an underground low-level laboratory. "Radiation Measurements", 44, 1009-1012.

Udovičić V., Aničin I., Joković D., Dragić A., Banjanac R., Grabež B. y Veselinović N. (2011). Radon time-series analysis in the underground low-level laboratory in Belgrade, Serbia. "Radiation Protection Dosimetry", 145, 155-158.

UOC (2014). Web del Proyecto E-Math de la Universitat Oberta de Catalunya (on line), http://www.uoc.edu/in3/emath (22 de enero de 2014).

Vanmunster T. (2007). Peranso Period Analysis Software, Peranso version 2.50, CBA Belgium Observatory, http://www.peranso.com (22 de enero de 2014).

WHO (2009). WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. World Health Organization. WHO Press, Geneva, Switzerland.