

Estudio, medida y mitigación de la concentración de radón en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidade da Coruña

Study, measurement and reduction of the radon concentration in the University School of Technical Architecture of the University of Coruña

A. Otero-Pazos (*), I. Fernández-Ibáñez (*), A. J. Piñón-Pazos (*), J. L. Calvo-Rolle (*), J. Giz-Novo (*)

RESUMEN

Se ha llevado a cabo un estudio de la concentración de gas radón en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidade da Coruña. Para ello se ha analizado la ubicación del edificio, el terreno y los materiales de construcción empleados. A continuación se han efectuado mediciones para determinar la concentración de gas radón, empleando dos técnicas: medida *in situ* con un detector de cámara de ionización (corto espacio de tiempo), y medida con detectores de trazas (largo espacio de tiempo). En función de los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta la legislación vigente (BOE, Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011), se han efectuado medidas correctoras (sellado de grietas, instalación de un sistema mecánico de ventilación) con el objetivo de mitigar las elevadas concentraciones de radón. Tras la ejecución de dichas medidas correctoras se efectuaron nuevas mediciones, verificándose la mitigación de radón en valores que oscilan entre el 50 y el 90 %.

Palabras clave: radón; cámara de ionización; detectores de trazas; ventilación mecánica; mitigación.

ABSTRACT

A study of radon concentration has been carried out at the University of A Coruña's Technical Architecture School. For that purpose, soil and construction materials, as well as building location have been analyzed. After that, measurements have been performed in order to find out radon concentrations. Two techniques have been used to make that enquiry for both short term and long term measurements: for short term, measurements were made using an on-site ionization chamber detector, while, for long term, trace detectors have been employed. Due to the results, and according with the Spanish Law (Spanish Official Bulletin – Boletín Oficial del Estado, of December 21, 2011, IS-33 Instruction), corrective works have taken place (cracks sealing, installation of a forced ventilation system) in order to diminish the high radon concentrations. After works, new measurements proved that radon concentration values lowered about 50 % and 90 %.

Keywords: radon; ionization chamber; trace detectors; mechanical ventilation; reduction.

(*) University of A Coruña. Laboratory of Environmental Radioactivity. Escuela Universitaria Politécnica. C/ Avenida 19 de febrero, s/n. 15405, Ferrol, A Coruña (Spain).

Persona de contacto/Corresponding author: alberto.otero.pazos@udc.es (A. Otero-Pazos)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1230-9078> (A. Otero-Pazos); <http://orcid.org/0000-0001-9553-7799>

(I. Fernández-Ibáñez); <http://orcid.org/0000-0002-0116-8361> (A. J. Piñón-Pazos);

<http://orcid.org/0000-0002-2333-8405> (J. L. Calvo-Rolle); <http://orcid.org/0000-0002-8179-3684> (J. Giz-Novo)

Cómo citar este artículo/Citation: Otero-Pazos, A., Fernández-Ibáñez, I., Piñón-Pazos, A. J., Calvo-Rolle, J. L., Giz-Novo, J. (2017). Estudio, medida y mitigación de la concentración de radón en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidade da Coruña. *Informes de la Construcción*, 69(547): e217, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.16.101>.

Copyright: © 2017 CSIC. **Licencia / License:** Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de *Informes de la Construcción* se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Attribution License (CC BY) Spain 3.0.

Recibido/Received: 05/07/2016

Aceptado/Accepted: 26/04/2017

Publicado on-line/Published on-line: 27/09/2017

1. INTRODUCCIÓN

El radón es un gas noble producido por la descomposición radiactiva natural del uranio (^{238}U). El uranio es un elemento químico muy activo, capaz de asociarse y desplazarse en combinación con otros (1), y que está presente en casi todas las rocas del planeta en pequeñas proporciones (ppm), que varían según el tipo de suelo (2). La Comunidad Autónoma de Galicia (España) es una zona propicia para la acumulación de radón, dada la composición granítica de su suelo, que presenta de las mayores concentraciones de uranio (3).

Más pesado que el aire, inerte, inodoro, incoloro e insípido (4), el radón se libera fácilmente desde la tierra al aire, donde se desintegra dando lugar a varios productos de duración corta, conocidos como descendientes del radón (5). Cuando éstos se descomponen, emiten partículas alfa radiactivas que se adhieren a aerosoles, polvo y otros elementos suspendidos en el aire (6). Al inhalarlas, estas partículas alfa se depositan en las células epiteliales de las vías respiratorias pudiendo alterar su ADN y ser causa de cáncer pulmonar (7). Según la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA), el gas radón es la segunda causa de cáncer de pulmón, después del tabaco, causando 21.000 muertes cada año en ese país (8).

Se introduce en los edificios a través de grietas en el suelo, juntas de construcción, espacios bajo pavimentos suspendidos, oquedades en paredes de sótanos o en el suministro de agua. Normalmente, las concentraciones de radón al aire libre son muy bajas. En promedio está entre 5 y 15 Bq/m³ (6). Sin embargo, las concentraciones interiores son más altas, alcanzando máximos en minas, cuevas o plantas de tratamiento de agua (6).

En España, en 2001, se publica el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (9), que recomienda realizar estudios en todos aquellos lugares de trabajo cuyo personal pueda estar expuesto a concentraciones elevadas de radón, torón y sus descendientes. A finales de 2010 se publica el RD 1439/2010 (10), por el que se modifica el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes del 2001, introduce 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 (11), 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.

Así, la legislación española establece que la concentración media de radón en el lugar de trabajo ha de ser menor de 600 Bq/m³ (300 Bq/m³ para permanencias prolongadas). Por encima de este valor (> 600 Bq/m³), debe implementarse un sistema de mitigación, con controles periódicos que aseguren que los niveles de concentración de radón se mantienen por debajo (11).

A nivel europeo existe la Directiva 2013/59/EURATOM de 5 de diciembre de 2013, que establece en el artículo 54 los 300 Bq/m³ como nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire (12).

Este artículo está centrado en el trabajo realizado por el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la UDC para la de-

terminación de concentración de radón en el edificio de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de Coruña, así como de las soluciones adoptadas para su mitigación en los casos necesarios. Se comienza describiendo la ubicación y características del edificio. A continuación se detallan los medios y estrategia de las mediciones efectuadas, para posteriormente exponer los resultados así como las soluciones de mitigación de radón utilizadas. Finalmente se extraen las conclusiones.

2. OBJETO DEL ESTUDIO

En este apartado se estudia la composición del terreno sobre el que está ubicado el edificio objeto de estudio. Se describen las características estructurales y constructivas de éste, así como su distribución en las diferentes plantas.

2.1. Ubicación de la EUAT

La Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad de A Coruña forma, con otras facultades, el Campus de la Zapateira, en la ladera sureste-noroeste del Monte da Fraga, al sur de A Coruña y cerca del Castro de Elviña, referencia cultural de la ciudad. En la Figura 1 se muestra la ubicación de dicho edificio.

Las condiciones topográficas de este emplazamiento, en una ladera de fuerte pendiente, que las edificaciones fueron adaptando y transformando con excavaciones y rellenos, fueron determinantes, tanto para la ubicación de los edificios como para su propia forma.

En la Figura 2 observamos la topografía descrita y la ubicación del edificio en la ladera en que se encaja el edificio, lo que agrava el problema de concentración de radón por aumentar la superficie en contacto con el terreno.

Situado en la zona alta del macizo granítico de A Coruña se asienta sobre granodiorita tardía (13). Ésta se caracteriza microscópicamente por texturas de tipo alotriomórfico o hipidiomórfico de grano grueso y muy raramente orientadas, siendo sus componentes esenciales cuarzo, microclina, plagioclasa sódica y moscovita. Desde el punto de vista hidrogeológico son rocas de baja permeabilidad, reduciéndose la acumulación de agua a las zonas de fractura (14).

2.2. Estructura o formato del edificio

La EUAT, construida en 1975 según proyecto de los arquitectos Juan Castañón Fariña y José María Laguna Martínez, fue variando su configuración para dar respuesta a nuevas necesidades docentes. Concebida en principio con entreplantas abiertas que permitían una iluminación y ventilación cruzada, la construcción de forjados intermedios en los espacios a doble altura y la tabicación de nuevas aulas supuso la pérdida de estas características.

El edificio está articulado espacial y funcionalmente por una potente estructura de hormigón encajada en la ladera (15). De planta rectangular, con sus fachadas más largas orientadas al este y al oeste y una superficie de 10.805,82 m², está organizado en cuatro plantas y un semisótano bajo la rasante de acceso. En la planta tercera y última están las aulas de dibujo y aulas informáticas; en la segunda, las clases teóri-



Figura 1. Situación del Campus da Zapateira. Fuente: Google Maps.

cas y despachos; en la primera, dirección, biblioteca, tres aulas especiales en anfiteatro. La planta baja, en la que se sitúa la entrada principal, alberga zonas comunes de exposiciones, cafetería, biblioteca y administración, mientras en la planta semisótano se sitúan las aulas de máster, talleres y laboratorios, así como almacenes, instalaciones y servicios.

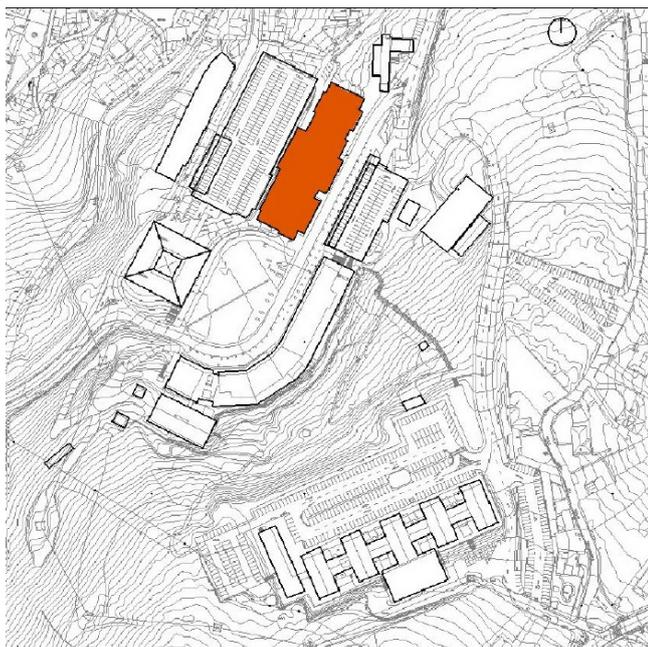


Figura 2. Ubicación de la EUAT en el Campus da Zapateira.
Plan Director de Infraestructuras da UDC, Campus da Zapateira, A Coruña, Universidade da Coruña, Vicerrectorado de Infraestructuras y Gestión Ambiental, 2009.

En la Figura 3 se puede ver la fachada este y la sección de la EUAT.

En esta planta semisótano se sitúan también cinco laboratorios de Materiales de Construcción y un taller de maquetas, dedicados a tareas de docencia e investigación en el ámbito universitario, así como a la realización de diferentes ensayos de materiales en colaboración con distintas empresas de control de calidad de la autonomía gallega. Por su ubicación, en contacto directo con el terreno, estos locales son los más susceptibles de presentar valores altos de concentración de radón.

Las características de los distintos locales son:

- Laboratorio n.º 1: superficie de 108,80 m² y una altura de 3,20 m (348,16 m³), el contacto con el terreno es únicamente por la solera. Frente con ventanas a la fachada posterior con orientación oeste.
- Laboratorio n.º 2: superficie de 132,50 m² y una altura de 4,82 m (638,65 m³), el contacto con el terreno es únicamente por la solera. Ventanas en sus fachadas norte y oeste. Es el laboratorio a tratar de mayor volumen. En la entrada dispone de un despacho para los técnicos de laboratorio con lo cual la ocupación es relativamente alta.
- Laboratorio n.º 3: superficie de 157,93 m² y una altura de 3,79 m (598,55 m³). El contacto con el terreno se produce por una pared longitudinal (semisótano) y por la solera, teniendo en este caso únicamente ventanas por la fachada norte.
- Taller de maquetas: superficie de 113,39 m² y con un volumen total de 451,85 m³, se diferencian dos partes en función de su altura. A la entrada ésta es de 3,81 m, al fondo

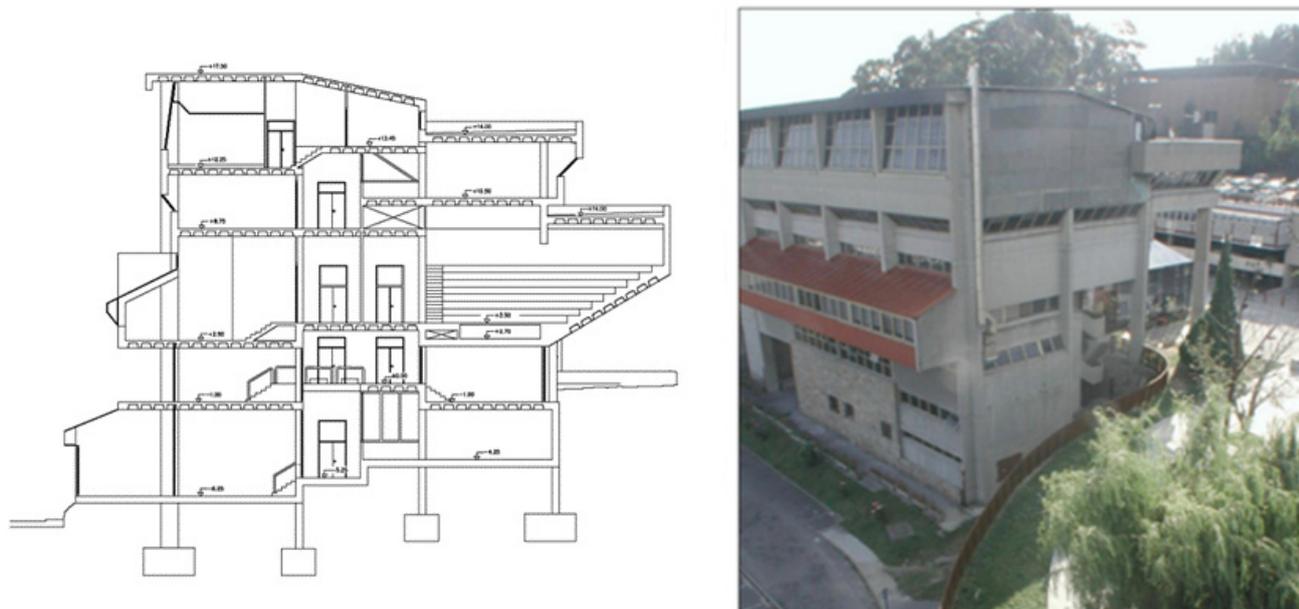


Figura 3. Fachada este y sección de la EUAT. Plan Director de Infraestructuras da UDC, Campus da Zapateira, A Coruña, Universidade da Coruña, Vicerrectorado de Infraestructuras y Gestión Ambiental, 2009.

la parte más alta tiene 4,81 m de altura y en su parte en contacto con el terreno tiene un patio inglés que aporta iluminación natural y la posibilidad de disponer de sistemas de ventilación a fachada, se entiende que este patio inglés resta en la difusión de radón hacia el espacio al no existir un contacto directo entre terreno y muro. En la parte baja tiene contacto directo con el terreno. La ocupación es muy esporádica.

- Aula de máster II: superficie de 90,45 m² y una altura de 4,80 m (434,16 m³), el contacto con el terreno es únicamente por la solera. Frente con ventanas a la fachada posterior con orientación oeste.
- Despacho PDI de Física: superficie de 36,66 m² y una altura de 3,20 m (117,31 m³), el contacto con el terreno es únicamente por la solera. Frente con ventanas a la fachada posterior con orientación oeste.

En la Figura 4 se muestra la planta semisótano de la EUAT, identificando los distintos locales.

- Laboratorio n.º 4: superficie 76 m², en la zona de la entrada un espacio de 3,78 m de alto y la mayor parte del laboratorio con una altura útil de 2,78 m. Se produce contacto con el terreno por uno de sus muros y la solera. Dispone de una mampara cerrada que resta del volumen del laboratorio 24 m³, dejando como volumen del laboratorio 205,75 m³.
- Laboratorio n.º 5: superficie 76 m², en la zona de la entrada un espacio de 3,78 m de alto y la mayor parte del laboratorio con una altura útil de 2,78 m. Simétrico al laboratorio n.º 4, salvo en la no existencia de una mampara cerrada para utilización de vitrina de extracción, con lo cual el volumen final del espacio es de 229,75 m³.

3. MÉTODOS

La medición de la concentración de radón es una tarea compleja, que está sujeta a múltiples variables como son el tipo de suelo y su permeabilidad, las condiciones climatológicas (lluvia, viento, presión) y los materiales de construcción de los edificios, entre otros (16). En este apartado se describe cómo se han realizado las mediciones de radón y los equipos utilizados.

3.1. Equipos de medida empleados

3.1.1. Equipo medidor Alphaguard

Es un monitor de radón Genitron Alphaguard PQ 2000PRO activo de radón, con detector basado en cámara de ionización

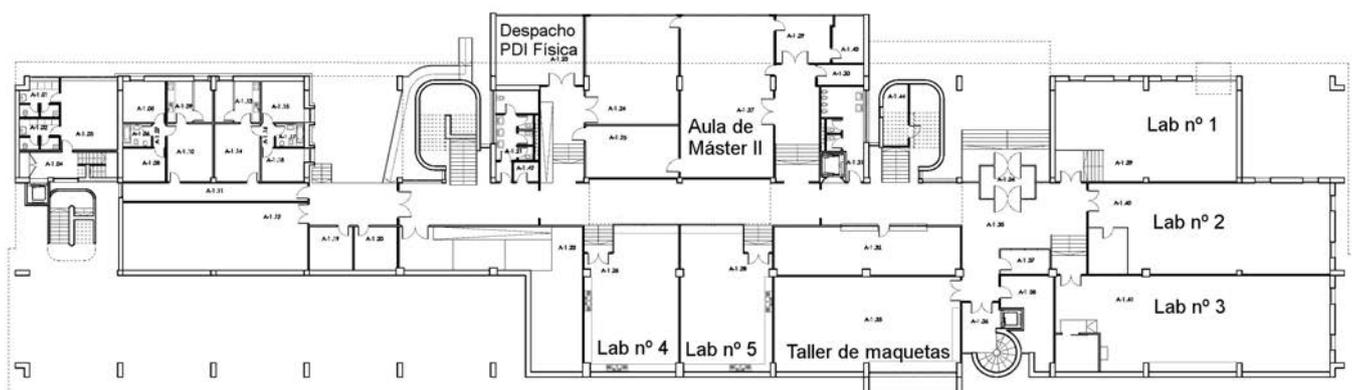


Figura 4. Planta semisótano de la EUAT. Ubicación de los locales descritos. Servicio de Obras y Urbanismo, UDC.

y un volumen nominal de la cámara de 0,5 L. Utiliza un filtro de fibra de vidrio para evitar la entrada de polvo en la cámara. Este equipo posee un rango de detección de 2 Bq/m^{-3} hasta $2 \cdot 10^6 \text{ Bq/m}^{-3}$, una sensibilidad de 1 cpm a 20 Bq/m^{-3} , una medición simultánea de presión atmosférica, temperatura y humedad, una autonomía de 10 días (batería) (17).

3.1.2. Detectores de radón marca Kodalpha

El detector de radón Kodalpha es un dosímetro pasivo de medición basado en pista nuclear de estado sólido (SSNTD). El resultado de la medición de radón obtenida por este tipo de sistema representa la concentración media del radón durante todo el periodo de medición. Consiste en una caja pequeña, negra cuyas dimensiones son de $4,0 \times 7,5 \times 0,5 \text{ cm}$. La parte sensible al radón es una pequeña película del tipo LR115 que consta de una base de poliéster de 100 micras de grosor, recubierta con una fina capa nitrato de celulosa (α -sensible) de 12 micras. Cuando una partícula α alcanza la película, ésta causa daños localizados a la estructura molecular de la capa de nitrato de celulosa. Pequeños orificios son visibles bajo el microscopio, pudiendo ser contabilizados y cuantificados con precisión (18). Se opta por este tipo de detector frente a otros que hay en el mercado debido a que éste es más sensible y eficiente al radón (19).

3.2. Estrategia de las mediciones

1. En primer lugar se realizan unas mediciones en continuo de 2-3 horas con un monitor de radón Genitron Alphaguard PQ 2000PRO, para encontrar los focos de entrada de radón. La primera media hora es necesaria para que el equipo alcance el equilibrio con la atmósfera externa. El mayor o menor tiempo de medida una vez alcanzado el equilibrio dependerá de la mayor o menor variabilidad de las primeras medidas realizadas. Hay que tener en cuenta que estas primeras medidas tienen como objetivo detectar focos de radón.

2. Una vez detectados los focos de radón, se colocan dosímetros de trazas integrados durante un tiempo de 3 meses en aquellos lugares de trabajo con mayor tiempo de exposición, con el objetivo de estimar la concentración de actividad media anual radón.

Los criterios que se han seguido a la hora de la selección de los locales para la realización de las medidas iniciales han sido:

- Ubicación de dependencias, en contacto o lo más próximas posibles al terreno (sótanos, plantas bajas de edificios), donde es más probable la entrada de radón.

- Ocupación prolongada por parte de personal de la UDC (profesores, personal de administración y servicios y alumnos).

4. RESULTADOS

Este apartado muestra los resultados obtenidos en las mediciones de radón y las medidas correctoras llevadas a cabo en la EUAT.

4.1. Concentraciones iniciales de radón

En un primer paso y, para acotar la zona a intervenir, el 19/03/13 se realizan 3 medidas en continuo con el equipo Alphaguard en los tres primeros niveles del edificio. En cada dependencia el equipo está midiendo un tiempo de 2 horas. Los lugares seleccionados son el laboratorio n.º 2 (planta -1), conserjería (planta 0) y despacho 1.14 (planta +1). Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Como se observa en la Tabla 1 existe un punto con elevada concentración de radón, situado en la planta -1, por lo que se decide colocar 3 detectores de trazas marca Kodalpha en varios puntos de esta planta durante un periodo que se extiende entre el 19/03/13 y el 01/07/13 (Tabla 2). Estas medidas de larga duración van a permitir obtener resultados de la concentración de radón extrapolables a un año.

Los resultados obtenidos muestran que las 2 dependencias de la planta -1 estudiadas superan los 600 Bq/m^3 establecidos en la IS-33. Se decide realizar nuevas medidas en otras dependencias de dicha planta, dado que su índice de ocupación por parte del alumnado, profesorado y trabajadores es bastante elevado, lo que aconseja tener datos fehacientes. Los lugares estudiados comprenden los 5 laboratorios de Materiales de Construcción, el taller de maquetas, el despacho PDI de Física y el aula máster II.

Las nuevas mediciones de radón se realizan durante el mes de febrero de 2014. Estas medidas se han llevado a cabo con el equipo Alphaguard. El equipo estuvo midiendo en cada estancia un tiempo comprendido entre 24 y 72 horas (las medidas de mayor tiempo incluyen el fin de semana). Estas medidas se realizaron manteniendo las condiciones de ventilación habituales en dichas dependencias. Muchas de ellas no tenían ningún tipo de ventilación. Prueba de ello es que en el laboratorio n.º 2 las ventanas estaban estropeadas y no se podían abrir. Los resultados de las medidas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 1. Resultados de medición de radón con equipo Alphaguard (19/03/13).

Planta	Lugar de medida	Fecha	Actividad media radón (Bq/m^3)	Temperatura ($^{\circ} \text{C}$)	Humedad relativa (%)	Presión (mbar)
-1	Laboratorio n.º 2	19/03/13	2.123 ± 213	19,1	63,8	989
0	Conserjería	19/03/13	389 ± 97	19,8	47,2	988
+1	Despacho 1.14	19/03/13	170 ± 61	19,5	45,6	988

Tabla 2. Resultados de concentración de radón con detectores Kodalpha (del 19/03/13 al 01/07/13).

Planta	N.º serie dosímetro	Lugar de medida	Inicio exposición	Final exposición	N.º de días	Actividad media de radón (Bq/m^3)	Incertidumbre 2σ	
							$\pm \%$	$\pm \text{Bq/m}^3$
-1	427365	Laboratorio n.º 2	19/03/13	01/07/13	104	2.137	17	363
-1	427367	Laboratorio n.º 4	19/03/13	01/07/13	104	919	17	156
0	427366	Conserjería	19/03/13	01/07/13	104	159	18	29

Tabla 3. Resultados de las medidas de radón llevadas a cabo en la planta -1 de la EUAT.

Número de medida	Planta	Lugar de medida	Fecha inicio medida	Fecha final medida	Actividad media radón (Bq/m ³)	Temp (° C)	Humedad relativa (%)	Presión (mbar)
1	-1	Laboratorio n.º 2	06/02/14 (12:40)	07/02/14 (13:00)	1.633 ± 189	19,8	46,3	990
2	-1	Laboratorio n.º 3	07/02/14 (13:00)	11/02/14 (12:40)	3.300 ± 328	18,8	45,0	991
3	-1	Laboratorio n.º 1	11/02/14 (12:40)	12/02/14 (13:30)	180 ± 52	16,7	48,9	999
4	-1	Taller de maquetas	12/02/14 (13:40)	13/02/14 (13:30)	930 ± 133	17,5	55,1	997
5	-1	Laboratorio n.º 4	13/02/14 (13:40)	14/02/14 (13:50)	1.100 ± 147	19,8	50,9	991
6	-1	Laboratorio n.º 5	14/02/14 (13:50)	18/02/14 (13:40)	1.713 ± 196	18,9	43,6	997
7	-1	Aula máster II	18/02/14 (13:40)	19/02/14 (12:50)	55 ± 24	17,5	51,4	1.007
8	-1	Despacho PDI Física	19/02/14 (13:00)	20/02/14 (12:10)	83 ± 29	19,8	51,4	1.005
9	-1	Laboratorio n.º 3 (cámara húmeda)	20/02/14 (12:10)	21/02/14 (10:40)	4.728 ± 437	20,6	49,9	1.006

En la Figura 5 se muestra la ubicación de los locales en que se realizaron las medidas en la planta -1 de la EUAT.

4.2. Medidas correctoras

Los resultados obtenidos verifican que hay varias estancias que presentan valores de radón muy elevados (superiores a 600 Bq/m³), en los que es necesario llevar a cabo medidas correctoras para disminuir la concentración de radón.

Para reducir la concentración de radón existen varias soluciones posibles:

- Sellado de todas las grietas apreciables, oquedades y fisuras en suelos o paredes, para impedir la penetración del radón en el edificio. Sin embargo, en la mayoría de ocasiones esta medida no es totalmente efectiva (22) (23).
- Intracción: instalando pequeños ventiladores para soplar aire fresco filtrado al edificio. El principio fundamental es incrementar la presión en el interior del edificio respecto a la presión exterior, de manera que el gas radón no pueda fluir al interior (22) (23) (24).
- Extracción: el propósito es extraer aire del interior del edificio cuando la concentración alcanza un valor determinado. Normalmente se utiliza extracción forzada para mejorar el rendimiento y reducir el tiempo de respuesta (23) (25).

- Subventilación: provocando una ventilación, natural o forzada, en cámara de aire bajo forjado, para disipar el radón antes de que penetre en el edificio (23) (24).

Debido a las complicaciones derivadas del comportamiento del radón, así como de su desplazamiento, ya sea por difusión o por convección, es difícil establecer una relación directa entre las soluciones mitigadoras (incremento de la renovación de aire, sellado de grietas, etc.) y la disminución en la concentración de radón. Esto lleva a un proceso en el cual se van adoptando soluciones y efectuando nuevas medidas hasta alcanzar concentraciones aceptables. De ahí surge el primer criterio en la elección: que las actuaciones se escalen y sean superponibles. Es decir, se comienza con las medidas más sencillas y económicas y si no son suficientes, se lleva a cabo otra, de manera que sumen efectividad y no haya retroceso.

Un segundo criterio de elección es que la solución adoptada requiriese del menor mantenimiento posible.

En este caso, en que se intervenía en un edificio ya existente, algunas de las soluciones más eficaces, como la subventilación del forjado, eran inviables o excesivamente caras dadas las características constructivas de la EUAT.

Las actuaciones efectuadas son:

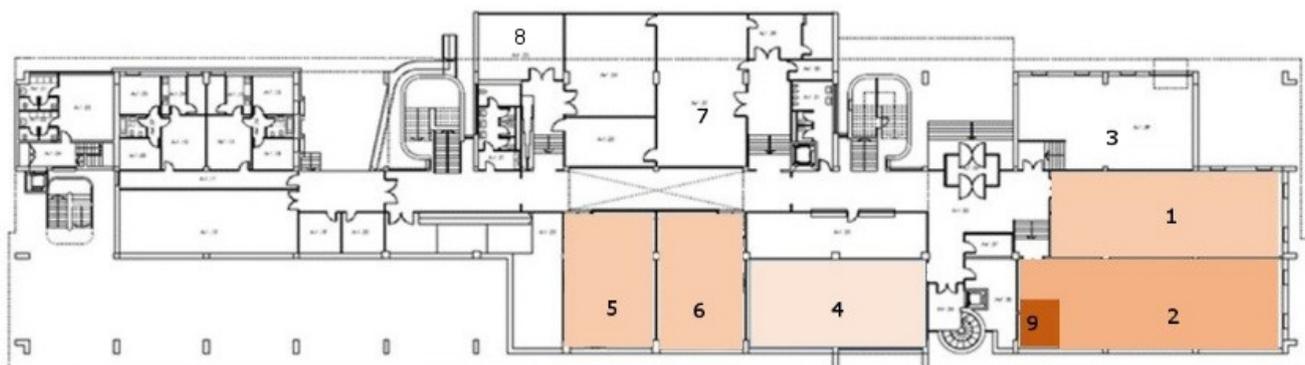


Figura 5. Planta semisótano con referencia de la actividad media de radón reflejada en la Tabla 5.

- Demolición de la cámara húmeda del laboratorio n.º 2, debido a su uso escaso y a la acumulación de gas radón.
- Sellado de grietas en el suelo de los laboratorios n.ºs 2, 3 y 4. El sellado se lleva a cabo con pintura epoxi curada con poliámida, de alto contenido en sólidos y alta tixotropía que permite obtener elevados espesores por mano, dotando a los suelos de una impermeabilización total.
- Instalación de un sistema de extracción mecánica en los laboratorios n.ºs 2, 3, 4, 5 y en el taller de maquetas.

En el resto de estancias se han obtenido concentraciones de radón muy bajas (laboratorio n.º 1, aula máster II y despacho PDI de Física), por lo que no es necesario realizar ninguna medida mitigadora. La bibliografía demuestra que estas soluciones son efectivas a la hora de mitigar la concentración de radón (25).

En los laboratorios n.ºs 4 y 5 existía ya un sistema de extracción mecánica de aire. Los equipos preexistentes eran ventiladores axiales de extracción en conducto (tipo TD). El aire entraba desde el pasillo a través de lamas practicables en la parte alta de los laboratorios. El barrido de aire producido se supone ineficaz al no disponer los ventiladores de un alto caudal y estar ubicada la entrada y salida de aire en la parte superior. Además, debido a la deficiente instalación de los extractores, la emisión sonora era importante y permanecían habitualmente desconectados.

En un paso previo a la instalación del equipo de extracción mecánica de aire se decide hacer una serie de mediciones de radón en los laboratorios n.ºs 4 y 5, con el objetivo de obtener un número de renovaciones por hora y de tiempo de funcionamiento de los sistemas de extracción mecánica ya existentes. Las conclusiones obtenidas tras estas mediciones de radón podrán ser extrapoladas a los laboratorios n.ºs 2 y 3 para la instalación de un nuevo sistema de ventilación mecánica que permita reducir los niveles de radón a valores no perjudiciales para la salud.

En las Figuras 6 y 7 puede verse el estado del laboratorio n.º 2 antes y después del sellado con la pintura epoxi.

Los equipos de medida de radón se ubicaron en zonas aproximadamente iguales de los laboratorios, al fondo del mismo en la parte central, no obstante en el caso del laboratorio n.º 4

la proximidad de la mampara podría hacer que las condiciones no se pudiesen considerar exactamente iguales.

En la Figura 8 se representa la concentración de radón en función del tiempo, mostrándose además los tiempos de funcionamiento de la extracción mecánica de aire.

Se realiza un estudio del tiempo de funcionamiento de los equipos de ventilación mecánica ya existentes, con el objetivo de llegar a un compromiso entre el descenso de la concentración de actividad de radón hasta niveles no perjudiciales para la salud, y la eficiencia energética. Para ello se parte de una temporalización inicial de 11 horas de funcionamiento. Al observarse oscilaciones en la concentración de actividad de radón, con picos por encima de 600 Bq/m³, se decide programar un periodo de funcionamiento 24 horas que se muestra claramente efectivo, reduciendo los niveles a una media aproximada de 200 Bq/m³.

Una vez que se ha comprobado que la solución funciona en continuo, se realiza una parada del equipo de ventilación para ver la evolución del radón, observándose un comportamiento errático del gas en los 5 días posteriores a dicha parada. En la parte intermedia del intervalo de casi 3 días se manifiesta que, sin existir ningún tipo de ventilación, los niveles están contenidos en valores asumibles. El objetivo de esta prueba es valorar la eficacia del sistema de ventilación a la hora de retirar el radón del ambiente. Al volver a accionar el equipo se muestra una reducción drástica del radón, que alcanza sus valores mínimos a las 5 horas de la puesta en funcionamiento del equipo.

Después se prueba un régimen de 8,5 horas alternativas con 1,04 renovaciones/hora en el prorrateo a 24 horas, poniendo la ventilación a funcionar en intervalos regulares a lo largo del día, para intentar de esta forma que los niveles no se incrementen. Con este horario se demuestra que sin una ventilación continua es muy difícil mantener los valores de radón por debajo de los niveles recomendados en la legislación. De esta forma se decide dimensionar el sistema de ventilación mecánica que se va a instalar para un total de 3 renovaciones/hora de forma que permita una regulación para ajustar el caudal a lo estrictamente necesario. Una vez ejecutada la red de ventilación se volverá a medir para valorar la eficacia de la nueva instalación y validar así la solución técnica adoptada.



Figura 6. Estado del suelo del laboratorio n.º 2, antes del sellado.

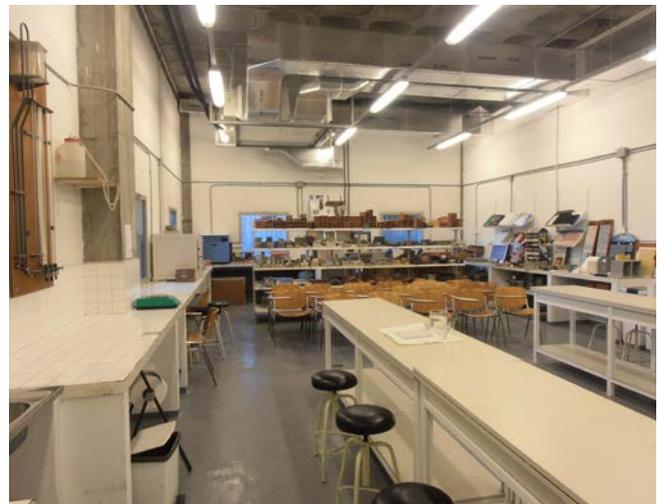


Figura 7. Laboratorio n.º 2, tras el sellado con la pintura epoxi.

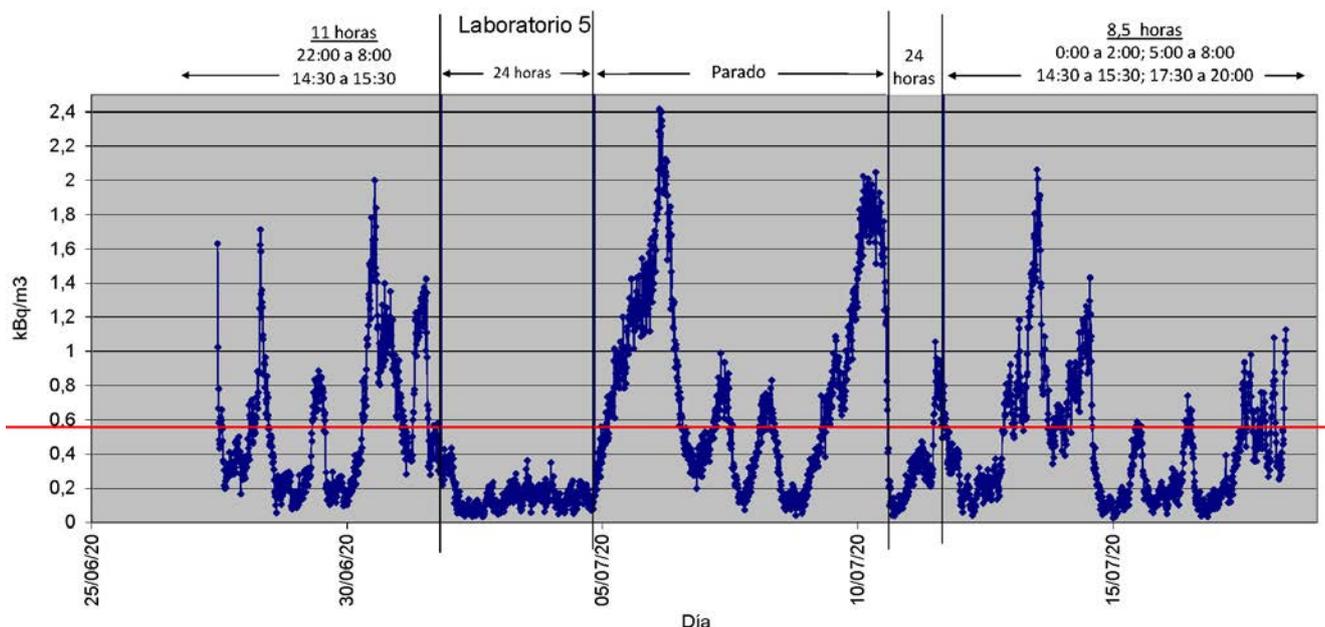


Figura 8. Concentración de actividad de radón en función del tiempo y de las horas de funcionamiento de los equipos de ventilación mecánica.

Los locales a ventilar suponen un total de 2.124,41 m³, con lo que al estar dimensionado para 3 renovaciones/hora se requiere un caudal de renovación de más de 6.000 m³/h, motivo por el cual para dar cumplimiento a lo dispuesto en el reglamento de instalaciones térmicas en edificios era necesario incorporar un sistema de recuperación de calor. Este equipo permite realizar una renovación de aire, mediante aporte de aire exterior recuperando la energía del aire contaminado de salida, mediante la utilización de un intercambiador de alta eficiencia. Por la situación de los laboratorios se pensó en una solución en base a 2 equipos recuperadores con batería de calor, uno ubicado en el laboratorio n.º 2, para dar servicio tanto a éste como al laboratorio n.º 3, y otro situado en el taller de maquetas, para dar servicio a dicho taller, así como a los laboratorios n.º 4 y n.º 5.

Las redes de conductos debían de favorecer un barrido lo más completo posible del volumen de aire de los espacios, ubicando la impulsión en un extremo del mismo y la extracción en el otro. El sistema incorpora una batería de calor conectada a la red de calefacción, para conseguir no sólo adecuar térmicamente el aire de entrada, sino también para climatizar el espacio, por lo que posteriormente se cierra la red de radiadores de las zonas en las que se actúa. Los conductos

se realizaron en climaver Neto, un conducto de fibra de vidrio con un acabado interior rugoso que sirve para atenuar el ruido producido por el paso del aire a través del conducto. La regulación de los sistemas debería de posibilitar varias marchas de ventilación y el establecimiento de horarios de funcionamiento.

En la Figura 9 se muestra la instalación en los laboratorios n.º 2 y 3, siendo la red azul la de impulsión y la roja la de retorno.

4.3. Concentraciones finales de radón

Se realizan nuevas mediciones de radón para comprobar la eficacia de dichas modificaciones, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.

De los resultados se extrae que las medidas correctoras han conseguido reducir la concentración de radón considerablemente, hasta valores inferiores a los que establece la legislación (11), a excepción del taller de maquetas. Se establece como definitivo el funcionamiento del sistema de extracción en un régimen de 2 renovaciones por hora, de lunes a viernes, de las 6:00 hasta las 22:00. Se colocan nuevos detectores de

Tabla 4. Resultados de las medidas de radón en la planta -1 de la EUAT, llevadas a cabo con el equipo Alphaguard, tras la implantación de las medidas correctoras.

Planta	Lugar de medida	Fecha inicio medida	Fecha final medida	Actividad media radón (Bq/m ³)	Temperatura (° C)	Humedad relativa (%)	Presión (mbar)
-1	Laboratorio n.º 2	19/05/15 (9:30)	20/05/15 (11:20)	241 ± 59	18,6	46,6	1.010
-1	Laboratorio n.º 3	18/05/15 (10:20)	19/05/15 (9:20)	278 ± 64	19,3	51,8	1.006
-1	Laboratorio n.º 4	21/05/15 (12:30)	21/05/15 (13:30)	373 ± 85	19,8	44,2	1.018
-1	Laboratorio n.º 5	21/05/15 (13:40)	22/05/15 (8:10)	513 ± 92	20,2	46,3	1.017
-1	Taller de maquetas	18/05/15 (11:30)	19/05/15 (12:10)	511 ± 91	19,6	47,3	1.016

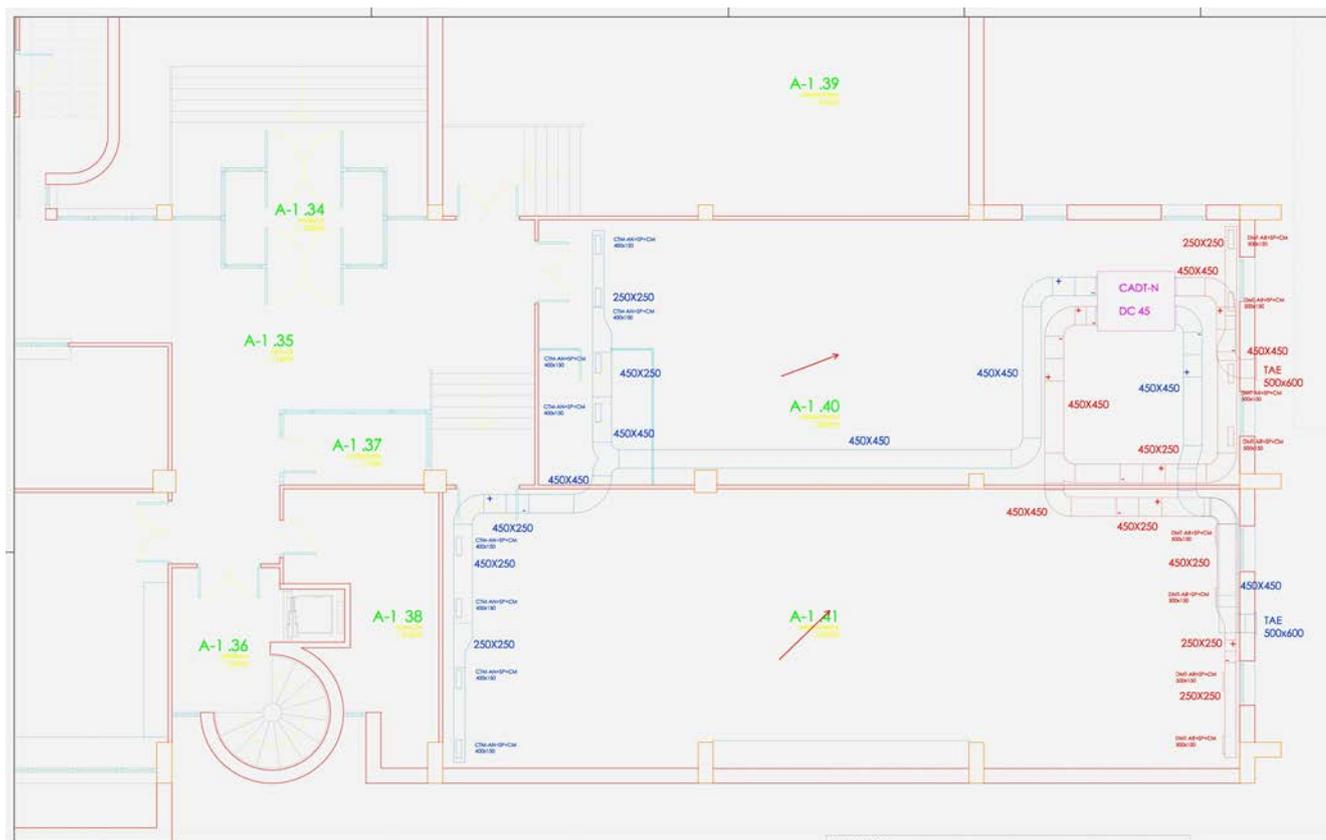


Figura 9. Planos de instalación del sistema de ventilación mecánico de aire.

trazas Kodalpha en las estancias objeto de estudio durante 3 meses para obtener medidas de radón que sean extrapolables a un año, tal como establece la legislación (IS-33). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Se ha comprobado que las medidas correctoras han sido satisfactorias, reduciendo las concentraciones de radón ostensiblemente. El porcentaje de reducción de concentración de radón en las distintas dependencias estudiadas puede observarse en la Tabla 6.

5. CONCLUSIONES

Los resultados se encuentran por debajo de lo establecido en la Instrucción del 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural (Instrucción IS-33 n.º 22, Sección III, p. 6833 del *BOE*, publicada el 26/01/12) que establece que «el nivel para la protección de los trabajadores frente a la exposición al ^{222}Rn en sus puestos de trabajo debe ser 600 Bq/m^3 de concentración media anual, durante

Tabla 5. Resultados de las medidas de radón en la planta -1 de la EUAT, llevadas a cabo con detectores Kodalpha, tras la implantación de las medidas correctoras.

Planta	N.º serie dosímetro	Lugar de medida	Inicio exposición	Final exposición	N.º de días	Actividad media de radón (Bq/m^3)	Incertidumbre 2σ	
							$\pm \%$	$\pm \text{Bq/m}^3$
-1	496482	Laboratorio n.º 2	08/07/15	08/10/15	92	426	17	72
-1	496483	Laboratorio n.º 3	08/07/15	08/10/15	92	458	17	78
-1	496481	Laboratorio n.º 4	08/07/15	08/10/15	92	228	18	41
-1	496480	Laboratorio n.º 5	08/07/15	08/10/15	92	349	17	59
-1	496484	Taller de maquetas	08/07/15	08/10/15	92	476	17	81

Tabla 6. Comparación de los niveles de radón en diversas dependencias de la planta -1 de la EUAT, al inicio y al final del estudio realizado.

Planta	Lugar medida	Concentración media radón Inicio estudio (Bq/m^3)	Concentración media radón final, tras medidas mitigadoras (Bq/m^3)	Reducción de concentración de radón (%)
-1	Laboratorio n.º 2	1.633 ± 189	426 ± 72	74
-1	Laboratorio n.º 3	3.300 ± 328	458 ± 78	86
-1	Laboratorio n.º 4	1.100 ± 147	228 ± 41	79
-1	Laboratorio n.º 5	1.713 ± 196	349 ± 59	80
-1	Taller de maquetas	930 ± 133	476 ± 81	49

la jornada laboral». Si se tiene en cuenta la Directiva Europea 2013/597/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013, donde se establecen los 300 Bq/m³ como nivel de referencia para el promedio anual de concentración de actividad de ²²²Rn en el aire, y la recomendación en la nota descriptiva n.º 291 publicada en septiembre del 2009 por la Organización Mundial de la Salud (OMS), todos los resultados obtenidos después de efectuar las medidas correctoras se encuentran por encima de dichas recomendaciones, a excepción del laboratorio n.º 4.

Con las medidas mitigadoras realizadas se ha conseguido disminuir la concentración de radón entre el 50 y el 90 %, obteniendo resultados en consonancia con los de otros au-

tores (26) (27) y siempre por debajo de lo establecido en la IS-33 (< 600 Bq/m³), demostrando de esta forma su eficacia.

Se recomienda realizar una reevaluación periódicamente para asegurar que la concentración media anual se mantiene por debajo de los valores indicados en la IS-33 que sería la legislación aplicable actualmente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Consejo de Seguridad Nuclear y a la Universidade da Coruña, sin su colaboración esta investigación no se hubiese podido llevar a cabo.

REFERENCIAS

- (1) Kourtidis, K., Georgoulas, A. K., Vlahopolou, M., Tsirliganis, N., Kastelis, N., Ouzounis, K., Kazakis, N. (2015). Radon and radioactivity at a town overlying Uranium ores in northern Greece. *J. Environ. Radioact.*, 150: 220-27, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.08.001>.
- (2) Liu, B., Peng, T., Sun, J., Yue, H. (2017). Release behavior of uranium in uranium mill tailings under environmental conditions. *J. Environ. Radioact.*, 171: 160-168, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.02.016>.
- (3) Cortina, D., Durán, I., Llerena, J. J. (2008). Measurements of indoor radon concentrations in the Santiago de Compostela area. *J. Environ. Radioact.*, 99: 1583-1588, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.004>.
- (4) Lamónaca, F., Nastro, V., Nastro, A., Grimaldi, G. (2014). Monitoring of indoor radon pollution. *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 47: 228-233.
- (5) Veleva, V., Valkov, N., Batchvarova, E., Kolarova, M. (2010). Variation of short-lived beta radionuclide (radon progeny) concentrations and the mixing processes in the atmospheric boundary layer. *J. Environ. Radioact.*, 101(7): 538-543, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.08.008>.
- (6) WHO (2015). Radon and health. [Online]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/> [Accessed: 11-Mar-2015].
- (7) National Academy of Sciences (1999). *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*, pp. 1-4. Washington, D.C.: National Academy Press.
- (8) I. E. D. US EPA, OAR, Radon: Assessment of Risks from Radon in Homes. [Online]. Available: http://www.epa.gov/radon/risk_assessment.html. [Accessed: 11-Mar-2015].
- (9) Ministerio de la Presidencia (2001). Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. *Boletín Oficial del Estado*, n.º 178, pp. 27284-27393. España.
- (10) Ministerio de la Presidencia (2010). Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio. *Boletín Oficial del Estado*, n.º 279, pp. 96395-96398. España.
- (11) Consejo de Seguridad Nuclear (2011). 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. *Boletín Oficial del Estado*, n.º 22, pp. 6833-6838. España.
- (12) Consejo de la Unión Europea (2014). Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. *Diario Oficial de la Unión Europea*, n.º L13, pp. 1-73.
- (13) Mapas geológicos de España 21 5-4 (La Coruña) y 45 5-5 (Betanzos). Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 1975.
- (14) Rodríguez Blanco, M. T., Taboada Castro, M. L., Taboada Castro, M. M. (2003). Caracterización Hidroquímica de un pequeño manantial del macizo granítico de A Coruña (NW España). *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*, 8: 285-300.
- (15) Alonso Pereira, J. R., Río Vázquez, A. S. (2013). Las Escuelas de Arquitectura de La Coruña. *Anais do X Seminário do.co.mo.mo_Brasil*.
- (16) Mentés, G., Eper-Pápai, I. Investigation of temperature and barometric pressure variation effects on radon concentration in the Sopronbanfalva Geodynamic Observatory, Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity*, 149: 64-72.
- (17) Saphymo GmbH (2009). User manual Portable Radon Monitor "AlphaGUARD". Frankfurt, Germany.
- (18) GT Analytic (2014). Kodalpha Radon-Dosimeters and LR-115 SSNTD Specifications. France.
- (19) Dwaikat, N., Safarini, G., El-Hasan, M., Lida, T. (2007). CR-39 detector compared with Kodalpha film type (LR115) in terms of radon concentration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 574: 289-291.
- (20) United States Environmental Protection Agency (2014). *Protocols for Radon and Radon Decay Product Measurements in Homes (MAH 2014)*. Air and radiation.
- (21) Piedecausa, B. (2013). Medidas de radón en espacios de trabajo subterráneos del Campus de la Universidad de Alicante. *Informes de la Construcción*, 65(531): 301-310.
- (22) Korhonen, P., Kokotti, H., Kalliokoski, P. (2000). Survey and mitigation of occupational exposure of radon in workplaces. *Build. Environ.*, 35: 555-562.

- (23) Scivyer, C. R. (2011). *Radon in the workplace: A Guide for Building Owners and Managers*. Building Research Establishment, BRE Trust.
- (24) Welsh, P. (1997). Trials of radon remedies in a UK test house: An introduction. *Environ. Int.*, 22(Suppl. 1): 1059-1067.
- (25) Maringer, F. J., Akis, M. G., Kaineder, H., Kindl, P., Kralik, C., Lettner, H., Lueginger, S., Nadschläger, E., Ringer, W., Rolle, R., Schönhofer, F., Sperker, S., Stadtmann, H., Steger, F., Steinhäusler, F., Tschurlovits, M., Winkler, R. (2001, May). Results and conclusions of the Austrian radon mitigation project 'SARAH'. *Sci. Total Environ.*, 272(1-3): 159-67.
- (26) Colorado-Aranguren, D., Domínguez-de Posada, J., Rodríguez-Rodríguez, A. (2014). Disminución de los niveles de radón en viviendas. Comparación de soluciones constructivas. *Tecnología y desarrollo*, 12. Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio.
- (27) Frutos, B., Olaya, M., Esteban, J. L. (2011). Sistemas de extracción como técnicas constructivas para evitar la entrada de gas radón en las viviendas. *Informes de la Construcción*, 63(521): 23-36.

* * *