

Acciones de rehabilitación frente a la entrada de gas radón

Rehabilitation Measures against radon gas entry

Borja Frutos Vázquez*¹, Manuel Olaya Adán*, José Luis Esteban Saiz*

* Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Madrid. ESPAÑA

Fecha de recepción: 01/ 12/ 2010
Fecha de aceptación: 01/ 04/ 2011
PAG. 95 - 121

Resumen

El gas radón es un agente patológico para los usuarios de los edificios en donde se manifiesta su presencia. Por su origen, en la cadena de desintegración del uranio, conlleva efectos radiactivos que, en el organismo humano, determinan un aumento de riesgo en la generación de cáncer pulmonar. Procedente de suelos donde hay masas de granito u otros sustratos con contenidos de uranio, penetra a través de los materiales habitualmente usados en la construcción; como es el caso de las soleras de hormigón, muros de sótano, etc. Para impedir la inmisión de este gas en los espacios habitados, se pueden considerar varias actuaciones en edificios ya construidos. El objeto de este trabajo consiste en mostrar los resultados sobre reducciones de radón conseguidas por distintas soluciones constructivas que se han diseñado y ejecutado con el fin de frenar la inmisión de gas radón al interior de un prototipo de vivienda construido al efecto.

Palabras Clave: Radón, prevención de riesgo de entrada, actuaciones correctoras

Abstract

Radon gas is a pathological agent for inhabitants of buildings where it is present. Due to its origin in uranium decay chain, it bears radioactive effects that inside human body lead to higher risks of developing lung cancer. It comes from soils containing granite masses or other substrates containing uranium. It enters through common material used in constructions, such as concrete ground slabs, basement walls, etc. In order to avoid such gas immission into inhabited rooms, several measurements can be considered for existing buildings. This study intends to show the results obtained for radon reductions by means of different constructive solutions, already designed and executed so as to stop radon gas immission into a prototype building constructed for this specific purpose.

Keywords: Radon gas, entry risk prevention, corrective measurements

1. Introducción

El uranio (U-238), elemento presente en la composición de suelos, aparece como origen de una cadena de desintegración de elementos radiactivos dentro de la cual se haya el gas radón (Rn- 222). Este gas inerte de origen natural, con un periodo de vida de 3.8 días, es capaz de viajar entre los poros del suelo hasta alcanzar la superficie, donde podrá diluirse entre los gases de la atmósfera o penetrar en el interior de los edificios si éstos no se encuentran debidamente protegidos, completando en ambos casos su proceso de desintegración. Al penetrar en un espacio cerrado, el radón se acumula aumentando su concentración. La inhalación de este gas puede llegar a generar cáncer pulmonar debido a que la radiación que se produce de la desintegración del mismo y sus descendientes de vida corta en el interior de nuestro organismo, es capaz de alterar el ADN de los tejidos pulmonares. Barros Dios et al., 2002; Sarah y David, 2003; IRCP, 1987; W.H.O., 2001; Pavia, 2003 y Cohen, 1993.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: borjafv@ietcc.csic.es

La Organización Mundial de la Salud, califica al radón como agente carcinógeno de grado 1. Según este Organismo, el radón es la segunda causa de contracción de cáncer pulmonar detrás del tabaco.

En las últimas décadas se han ido recogiendo, en la normativa de salubridad de distintos países, las sucesivas recomendaciones emanadas de investigaciones sobre los efectos en la salud ⁽²⁾ que supone respirar en espacios cerrados con presencia de gas radón.

El denominador común de estas normativas es la asignación de niveles límite de concentración de radón ⁽³⁾ (Comisión de Comunidades Europeas, EURATOM, 1990), en tales espacios así como la intervención con soluciones constructivas que reduzcan dichas concentraciones por debajo de los límites seguros. En general contemplan ámbitos de aplicación bien relacionados con las condiciones que deben cumplir los espacios destinados a puestos de trabajo o bien espacios residenciales. En particular, en lo referente a espacios residenciales, las condiciones de salubridad en la edificación para España, están recogidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE) derivado de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) ⁽⁴⁾. En la actualidad, esta normativa no contempla la protección de los usuarios de los edificios frente al riesgo de habitar con excesiva concentración de gas radón en espacios cerrados.

Durante la fase de redacción del Código, el Consejo de Seguridad Nuclear de España (CSN), presentó una propuesta de inclusión de un capítulo que incluyese medidas de protección frente a la entrada de radón en edificios de nueva construcción. La propuesta se basa en los límites de concentración de radón aceptables propuestos por la Comisión Europea (Comisión de Comunidades Europeas, EURATOM, 1990):

Niveles límites de concentración:

< 200 Bq/m³ para viviendas de nueva construcción

< 400 Bq/m³ para viviendas construidas

En esta primera versión del Código ya aprobada, el ministerio no creyó oportuno incluir aspectos relativos a la protección frente al gas radón. Uno de los argumentos para no hacerlo fue el de evitar una percepción de riesgo en la sociedad en aquellas viviendas que ya estaban construidas y para las que no se tenían datos en el momento de aprobación de código de medidas correctoras probadas. Por este motivo se creyó oportuna la presentación de un proyecto de investigación que se está realizando bajo el amparo y subvención del Consejo de Seguridad Nuclear.

² - International Commission on Radiological Protection (ICRP)

- The International Atomic Energy Agency (IAEA)

³ - World Health Organization (WHO). Department of protection of the human environment. "Sources, Exposure and Health Effects" Organización Mundial de la Salud (2001)

⁴ Comisión Europea de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM)

⁴ www.codigotecnico.org



El proyecto tiene como título “Estudio de la viabilidad y la efectividad de las acciones de remedio frente a la presencia de gas radón en los edificios existentes” y el objeto de este artículo es presentar los avances en esta primera fase en la que se ha construido un módulo experimental y se ha estudiado la entrada del gas en el mismo. Estos datos se han correlacionado con variables atmosféricas para entender la influencia de los cambios climáticos en el flujo de radón hacia el interior. Por último, se han ejecutado distintas soluciones constructivas enfocadas a frenar la entrada del gas radón al interior, y se ha estudiado, en cada una de ellas, la eficiencia de reducción en la concentración interior del gas. Dichas medidas podrían denominarse actuaciones de rehabilitación enfocadas a la mejora de las condiciones de salubridad de una vivienda entendiendo que, una excesiva concentración de gas radón, constituye un riesgo para la salud como manifiestan distintos organismos a través de estudios médicos.

El equipo investigador está formado por personal de:

- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc (CSIC). España
- Cátedra de Física Médica. Facultad de Medicina. Universidad de Cantabria. España

2. Métodos

2.1 Ubicación del módulo experimental

Para la elección del lugar donde construir el módulo experimental se ha pretendido escoger una zona con alta presencia de radón en el terreno para así poder llegar a testar las actuaciones de remedio con mayor efectividad. La empresa ENUSA Industrias Avanzadas, S.A. que ha dedicado su actividad a la extracción de uranio en las inmediaciones de Ciudad Rodrigo en la mina de Saélices el Chico, provincia de Salamanca, España, ha colaborado en el proyecto cediendo el terreno donde se ha construido el módulo. La alta presencia de radón en la zona y la disponibilidad de la empresa ENUSA han sido determinantes para la elección de la ubicación final. En las Figuras 1 y 2 se puede observar la situación de la zona de actuación dentro del mapa de presencia de radón que ha elaborado el CSN (Consejo de Seguridad Nuclear). Matarranz, 2004; Quindós, 2004.

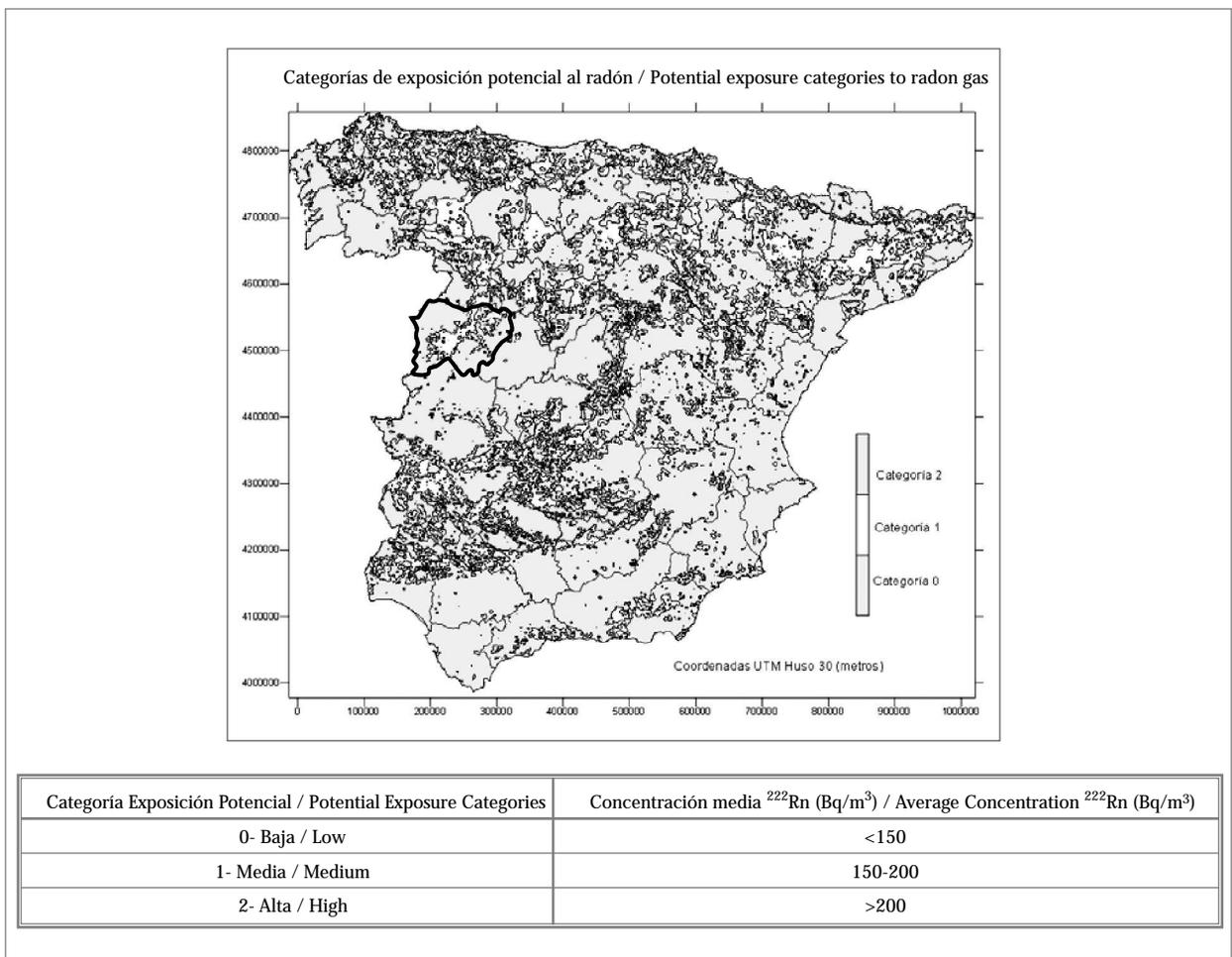


Figura 1. En el mapa de estimación de presencia de radón en viviendas, se observa que la provincia de salamanca se encuentra en una zona de alto riesgo
 Figure 1. The estimation map for gas radon presence inside buildings in Spain shows that Salamanca Province is located in a high risk zone

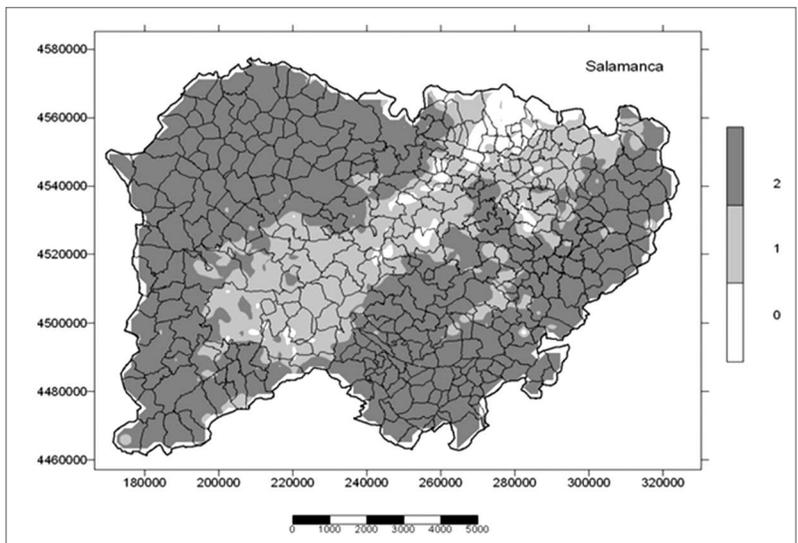


Figura 2. Mapa de la provincia de salamanca. Presenta unos índices altos (grado 2) en la mayoría del territorio. El punto rojo indica la situación exacta de la ubicación del módulo en las instalaciones de ENUSA, Ciudad Rodrigo, Salamanca, España

Figure 2. Map of Salamanca Province shows high indexes in most of the territory (grade 2). Red dot indicates the exact modulus location at ENUSA facilities. Ciudad Rodrigo, Salamanca, Spain

2.2 Registros de radón en el terreno de actuación.

Verificación de concentraciones

Se ha llevado a cabo una caracterización radiológica del suelo elegido sobre el que se ha construido el módulo experimental, que ha consistido básicamente en:

- Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo
- Evaluación de la concentración de radón en profundidad
- Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad

A continuación se presentan los principales resultados alcanzados en cada uno de los apartados indicados según el protocolo del laboratorio de la Cátedra de Física Médica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cantabria.

- Determinación de la concentración de elementos radiactivos en suelo

Se han caracterizado 9 muestras de terreno en el lugar de construcción del módulo experimental. En la (Tabla 1) se muestran los resultados de una muestra obtenida en la excavación realizada bajo el módulo.

Tabla 1. Caracterización radiológica de la muestra de terreno obtenida en la excavación realizada para construir el módulo experimental
Table 1. Radiological characterization of a soil sample obtained from excavation executed to construct the experimental modulus

PROCEDENCIA /ORIGIN	Instalaciones de Enusa – Saélices El Chico (Salamanca)/Enusa Facilities – Saélices El Chico (Salamanca)		
REFERENCIA /REFERENCE	CSIC-ENUSA 03		
REFERENCIA UC /REFERENCE UC	068/05		
FECHA RECOGIDA /COLLECTION DATE	10/02/05		
FECHA ANÁLISIS /ANALYSIS DATE	10/03/05		
PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS /ANALYSIS PROCEDURE : CFM-FM-1003.01			
	ACTIVIDAD ACTIVITY (Bq/Kg)	ERROR DE LA ACTIVIDAD ACTIVITY ERROR (Bq/Kg)	L.I.D. (Bq/Kg) 160,1
^{238}U (^{234}Th)	1278,8	94	16,4
^{226}Ra (^{214}Bi)	1012,5	62	32,3
^{232}Th (^{228}Ac)	47,3	11,0	107
^{40}K	826	67	11,1
^{137}Cs	--	--	

Destaca la elevada concentración de radio, 20 veces superior a un suelo normal, lo que garantiza la presencia de gas radón (Quindós, 1995).

b) Evaluación de la concentración de radón en profundidad

Mediante el empleo de una sonda, células de centelleo, equipo contador, se ha evaluado la concentración de radón a 1 metro de profundidad, en la zona donde ha sido colocado el módulo así como en los alrededores del mismo. Los resultados de las 20 medidas realizadas en una superficie de unos 150 m², muestran una concentración media de radón a un metro de profundidad de 250.000 Bq/m³, si bien es de destacar la gran variabilidad encontrada en la concentración de radón que oscila desde los 70.000 Bq/m³ hasta 500.000 Bq/m³, lo que en principio, clasificaría la zona como de alto riesgo a la presencia de radón en viviendas según la propuesta que aparece en el anteproyecto de nuevo Código Técnico de la Edificación.

c) Estudio granulométrico del suelo y permeabilidad:

Al objeto de disponer de una información global del suelo sobre el que se construye el módulo, se ha llevado a cabo un análisis granulométrico en dos de las muestras recogidas que han dado un resultado de permeabilidad media para el suelo de 10⁻¹² m²/s.

2.3 Diseño y construcción del módulo. Materiales empleados

El diseño del módulo experimental parte de la idea de reproducir las características tipológicas de una vivienda en España usando los materiales comunes para este tipo de construcciones.

El módulo presenta dos alturas, una de ellas sobre la rasante del terreno y la otra semienterrada. De esta manera se puede estudiar la presencia de radón en sótanos y en plantas elevadas. También se puede usar el semisótano para reproducir el caso de una cámara ventilada bajo un forjado sanitario. En planta ocupa un cuadrado de 5 metros de lado. Las dos plantas están unidas mediante una escalera interior con puerta que cierra ambos espacios. La cubierta es plana transitable para poder acceder a ella y manipular los sistemas de extracción que se vayan a colocar. En las Figuras 3 y 4 se puede observar los planos de diseño arquitectónico del módulo experimental.

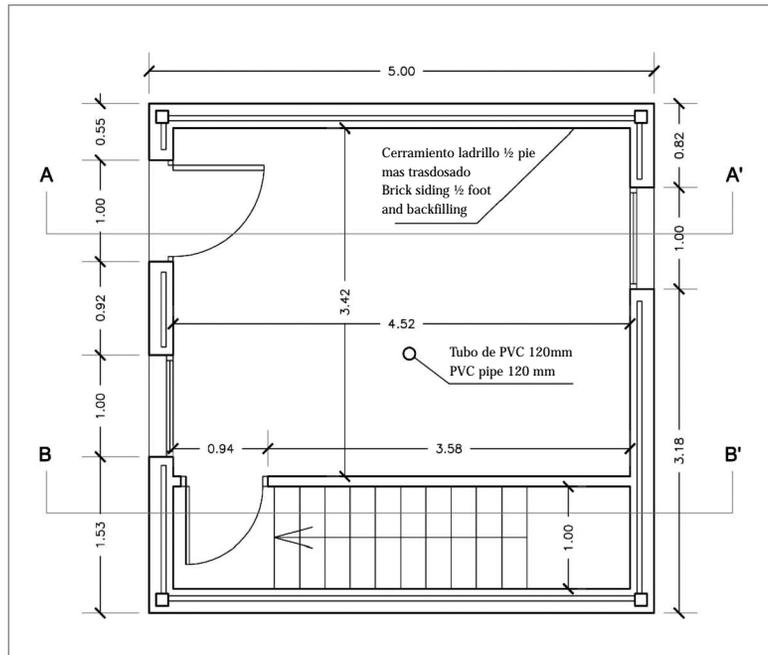


Figura 3. Diseño de planta baja del módulo experimental
Figure 3. Ground floor design in experimental modulus

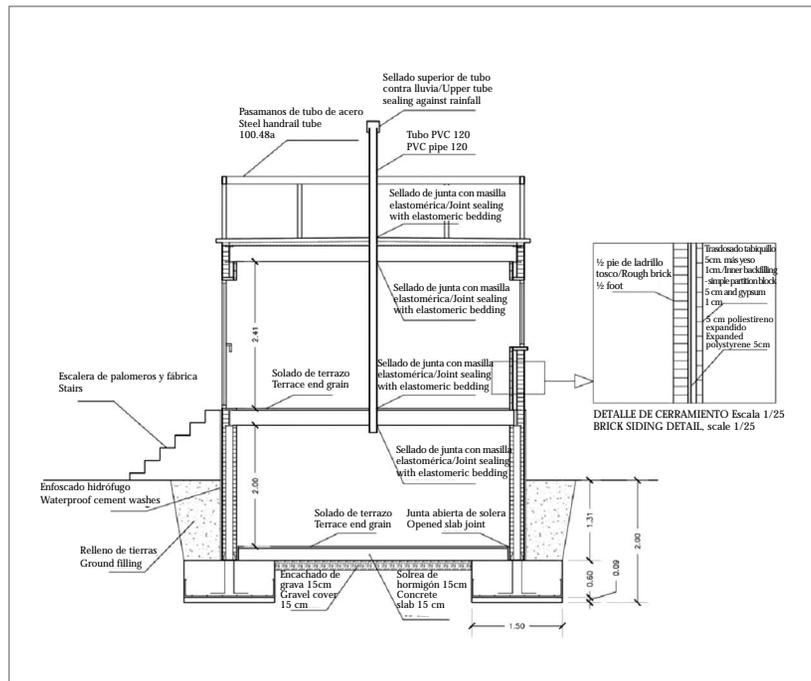


Figura 4. Sección del módulo experimental por el eje central
Figure 4. Experimental modulus section by central axis

Para la construcción se han usado materiales propios de este tipo de edificaciones:

- Sótano: Muros de sótano de 1 pie de ladrillo perforado con enfoscado de mortero de cemento exterior. Sin drenaje ni lámina impermeabilizante. De esta manera, el módulo se encuentra sin protección alguna frente al paso de radón desde el terreno.
- Solera: Losa de hormigón de 10 cm de espesor sobre enchado de grava. No se ha instalado lámina impermeabilizante para no obstaculizar el paso de radón hacia el interior
- Cerramiento de planta: Muro de 1/2 pie de ladrillo exterior, cámara de aire y trasdosado interior con tabique de hueco sencillo.
- Cubierta: La cubierta es plana con acceso desde el exterior para la instalación de sistemas de extracción.

El módulo cuenta con una puerta de acceso y dos ventanas en fachadas opuestas que se utilizan para provocar una ventilación natural. Además esta dotado de red eléctrica a través de un generador de gasoil que garantiza un suministro constante para abastecer a los equipos de medida y a los extractores que se instalen. En la Figura 5 se observa el módulo terminado.

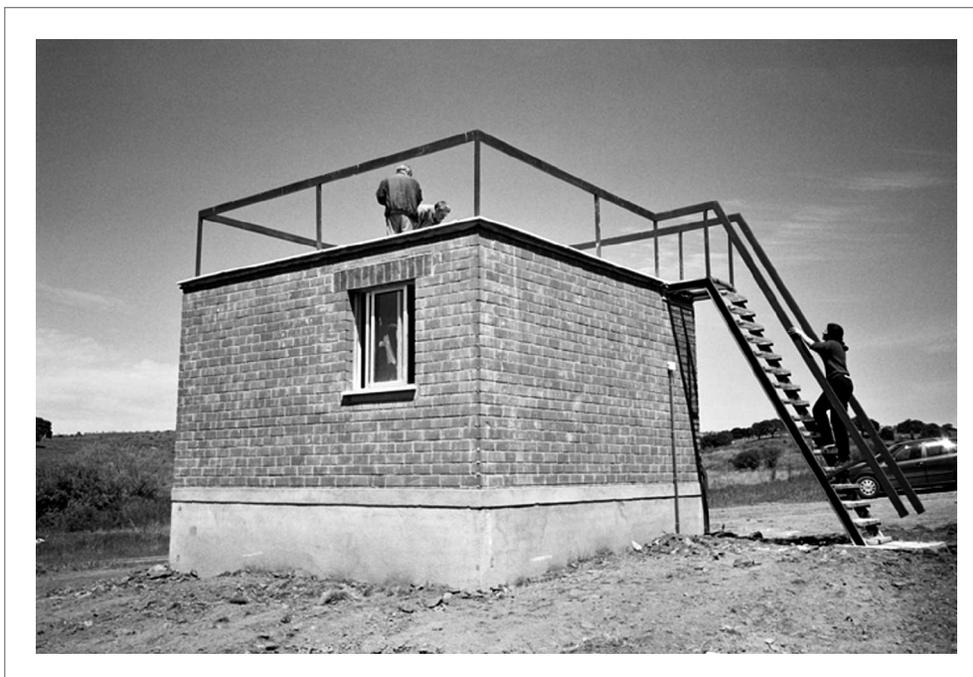


Figura 5. Fotografía del módulo terminado

Figure 5. Picture of finished modulus

2.4 Programa de trabajo

El proyecto de investigación tiene como objetivo previo estudiar la entrada de radón en el módulo experimental construido sin protección alguna frente al paso del gas. Se ha estudiado la concentración de radón en los espacios interiores (planta de sótano y planta baja) correlacionando los registros con los datos de viento, presión atmosférica, precipitaciones y temperaturas.

La segunda fase del proyecto se ha dedicado a estudiar la viabilidad y la efectividad de algunas soluciones correctoras realizando mediciones de concentración de radón tras haber introducido dichas actuaciones.

2.5 Equipo para el registro de los diferentes parámetros

En el interior del módulo se han instalado los equipos necesarios para registrar los distintos parámetros:

Para medir la permeabilidad del terreno “in situ” se ha utilizado el equipo Checo RADON-JOK que usa el flujo de aire que se extrae a un 1 metro de profundidad.

Para el registro de las concentraciones de radón se han usado equipos DOSEMAN (Sarad) y SCOUT (Sarad) que proporcionan medidas en continuo con promedios de hora en hora.

También se dispone de 8 sondas de temperaturas en el interior y exterior y otras 4 para el registro de diferencias de presión entre el interior y el exterior del módulo y entre la planta superior e inferior. Por otro lado contamos con el uso de información meteorológica a través de la estación de ENUSA en Saelices (lluvia, viento, temperatura, humedad)



Figura 6. Laboratorio instalado en el interior del módulo para la medida en continuo de los diferentes parámetros de registro
Figure 6. Laboratory installed inside the modulus for the continuous measurement of different parameters

3. Resultados

Se presentan a continuación los registros obtenidos de concentración de radón en el interior del módulo cuando este se encontraba sin ningún tipo de protección frente al paso del gas. Estos se han correlacionado con los datos atmosféricos del periodo de medida y nos da una idea de la influencia que estos tienen en la penetración y acumulación de radón.

Posteriormente se muestran los resultados de efectividad de algunas soluciones correctoras introducidas, determinados por las comparaciones de concentraciones de radón antes y después de introducir dichas medidas.

3.1 Concentraciones de radón correlacionadas con datos atmosféricos. Módulo sin protección frente a la entrada de gas radón

El módulo construido se mantuvo cerrado durante el periodo inicial, aproximadamente 4 meses, con el fin de estudiar el comportamiento del radón en el prototipo de edificio. Se trata de una edificación construida sin ningún tipo de medida de protección frente al radón y que, por tanto, es susceptible a la penetración del mismo a través de su envolvente.

Diversos estudios ⁽⁵⁾ (Font, 2002; Nazaroff, 1988) analizan la generación de radón procedente del terreno, la penetración del mismo a través de los cerramientos de un edificio, y su acumulación en el interior de los mismos.

Las tasas de emanación y exhalación tienen que ver con la generación de radón y su movilidad a través de los poros del terreno, siendo factores fundamentales, la cantidad de radio en origen y la permeabilidad en el suelo.

La diferencia entre las presiones que existen en el terreno y las que existen en el interior del módulo determina el flujo de radón hacia el interior (Hintenlang y Al-Ahmady, 1992; Allen, 1997). Debido a distintos factores como pueden ser las ventilaciones o los gradientes de temperaturas, es normal encontrar una depresión en el interior de un edificio comparada con la presión en los poros del terreno, y ello es lo que induce, principalmente, un flujo de radón por convección desde el terreno hasta el interior del edificio.

Los cambios en las variables atmosféricas no afectan de la misma manera al aire de los poros del terreno que al del interior del módulo (Kraner, 1964), produciéndose un desfase en tiempo hasta igualarse las condiciones. Este desfase provoca modificaciones en el gradiente de presiones y, por tanto, variaciones en el flujo de radón hacia el interior. A continuación se analizan los resultados obtenidos en esta fase:

⁵ - Lluís Font "The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors" Grupo de Física de les Radiacions, Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España.
- Modelos de movimiento de radón en terreno (Washington and Rose, 1992; Schery and Siegel, 1986; Rogers and Nelson, 1991; Chen and Thomas, 1995), modelos de penetración de radón en espacios (Andersen, 1992; Nielson et al., 1994; Revzan et al., 1993; Riley et al., 1996).

a) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de precipitaciones.

Se observa una correlación positiva entre la lluvia y el aumento de la concentración interior de radón, tanto en el sótano como en la primera planta. Este efecto de la precipitación puede estar relacionado con una reducción de la permeabilidad del suelo en el entorno del módulo, que induce una salida preferente del radón por el suelo seco bajo el mismo (Quindós, 1995). (Figura 7).

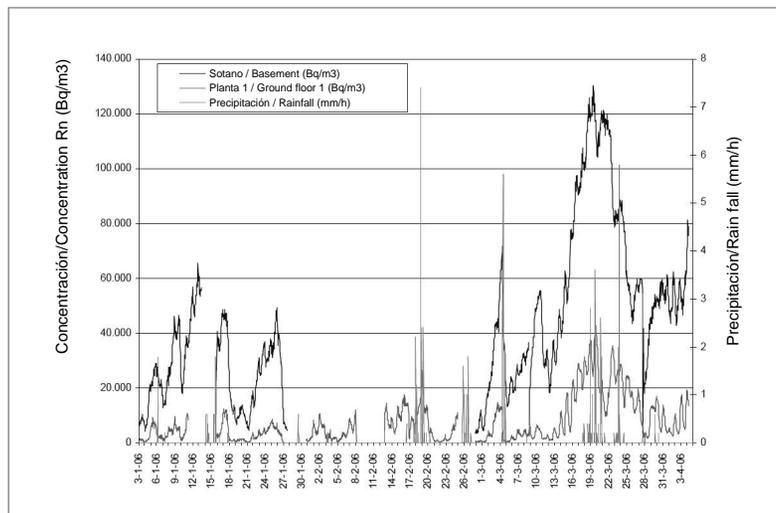


Figura 7. Concentraciones de radón de los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con las precipitaciones registradas en la zona. Se aprecia un aumento de las concentraciones cuando se producen picos sustanciales en las precipitaciones

Figure 7. Radon gas concentration in basement and ground floor spaces, correlated with rainfall registered in the zone. A concentration increase is observed when significant rainfall peaks take place

b) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de velocidad de viento y presión producida por este.

La acción del viento sobre la concentración de radón interior tiene dos vertientes opuestas. Por un lado, en función de las características arquitectónicas de la vivienda, el viento puede favorecer el intercambio de aire entre el interior y el exterior de la misma. Este aporte de aire con baja concentración de radón, daría lugar a una reducción de la misma en el interior.

Por otra parte, el viento induce una diferencia local de presiones entre el interior y el exterior proporcional al cuadrado de su velocidad, que favorece la entrada de radón en el recinto cerrado.

En nuestro módulo, este efecto parece más eficaz que el de intercambio de aire. No obstante, las diferencias de presión inducidas apenas superan los 20 Pa, significativamente menores que las diferencias observadas en la presión atmosférica como veremos más adelante.

c) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de temperaturas exteriores.

El cambio de temperatura en el exterior es objeto de una modificación del gradiente de presiones entre el interior y el exterior. Este efecto se denomina “Stack” (efecto chimenea) y explica, en los edificios, el movimiento de un gas por cambios de temperatura. El aire caliente que se genera en una vivienda en invierno, se expande (aumento de presión por la ley los gases ideales $P=nRT/V$ ⁽⁶⁾) y tiende a fugarse por chimeneas, fisuras o grietas, ventanas, etc. Ese proceso crea una depresión interior que favorece la entrada de radón desde el suelo por succión.

Durante el periodo analizado, no parece haber correlación entre ninguna de las temperaturas medidas y la concentración de radón. Únicamente en los últimos siete días se observó correlación positiva entre las temperaturas exteriores y la concentración de radón interior. La diferencia de temperaturas entre el aire exterior e interior del módulo puede inducir una diferencia de presiones que modifique la entrada de radón. Para el rango de datos disponibles, estas diferencias son pequeñas (del orden de 1 Pa) y no parecen responsables de las variaciones observadas en la concentración de radón.

d) Concentraciones de radón correlacionadas con datos de presión atmosférica.

Se observa una correlación negativa entre la presión atmosférica y las concentraciones de radón en el interior del módulo. Los descensos de presión provocan un incremento significativo de la concentración. El mecanismo por el que se produce tal incremento podría relacionarse con la permeabilidad del suelo a diferentes profundidades. Las variaciones observadas de presión son del orden de 10^3 Pa, tres órdenes de magnitud mayores que las inducidas por el viento o la diferencia de temperaturas, lo cual indica que se trata del parámetro dominante de entre los otros tres analizados anteriormente.

⁶ $P=nRT/V$ El aumento de presión es directamente proporcional al aumento de temperatura a volumen constante

Complementariamente se ha observado una relación entre los cambios de presión atmosférica, las precipitaciones y la velocidad del viento. Las bajas presiones suponen un incremento de la probabilidad de precipitaciones. De una forma menos evidente, también se observa que los descensos de presión incrementan la velocidad del viento. (Figura 8)

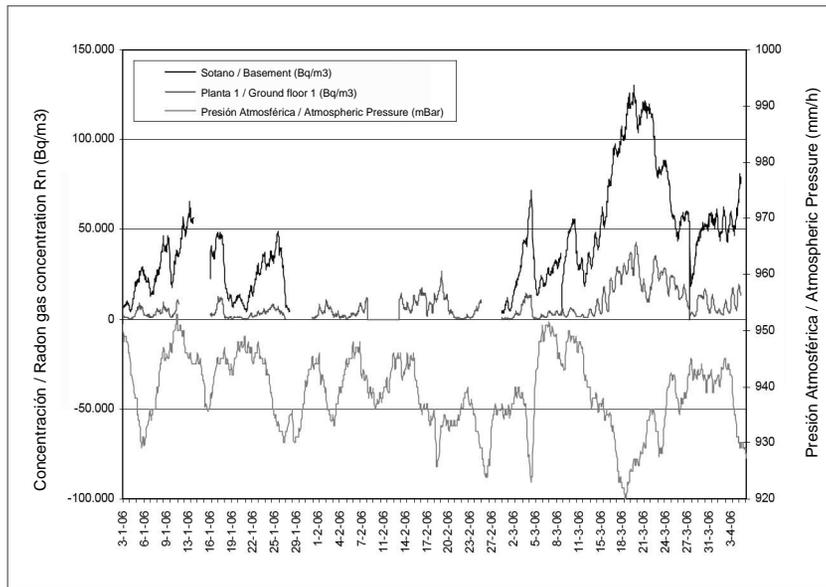


Figura 8. Concentraciones de radón de los espacios de sótano y planta baja, correlacionados con la presión atmosférica
 Figure 8. Radon gas concentration in basement and ground floor correlated with atmospheric pressure

3.2 Efectividad de las medidas de rehabilitación enfocadas a reducir la concentración de radón interior

Durante el periodo inicial del módulo, sin protección frente a la inmisión de gas radón, se han registrado unas concentraciones de radón promediadas en el tiempo de dicho periodo. Estas concentraciones sirven de base comparativa para poder evaluar que reducción de radón consiguen las soluciones correctoras que han sido testadas por periodos de tiempo de aproximadamente un mes. Las concentraciones iniciales en el módulo sin proteger constituyen el patrón base de comparación, y son las siguientes:

Tabla 2. Concentraciones de radón en punto de inicio. Situación de módulo sin protección
 Table 2. Radon gas concentration at initial point; non-protected modulus situation

	Planta SÓTANO / Basement	Planta 1 / Ground floor 1	Relación / Relation P. sótano / P.1 / Basement / GF 1
Concentración PROMEDIO (3 meses) Average concentration (3 months)	39.385 Bq/m3	6.855 Bq/m3	6 5,75

En esta fase de la investigación, se introducen en el módulo distintas medidas de protección (Loomis, 1995; Loomis, 1994; Murley, 1996; Clavensjö y Akerblom, 1994; Collingnan, 1999; CSTC, 1999; EPA, 2001), frente a la inmisión de radón y se evalúan conforme a su capacidad para reducir la concentración de radón en el interior del módulo.

Este tipo de medidas podrían clasificarse en dos grandes grupos atendiendo a la base de funcionamiento en aquellas que interponen barreras frente al paso de radón en todo elemento del edificio que esté en contacto con el terreno (soleras, muros de sótano, etc.) (Ver Figura 10) y aquellas que extraen el gas del terreno antes de que este pueda penetrar en los edificios mediante la instalación de sistemas de expulsión de aire conectados al terreno (Ver Figura 9). Dentro de éstas últimas existen variaciones como la presurización en lugar de la extracción, o las ventilaciones de forjados sanitarios.

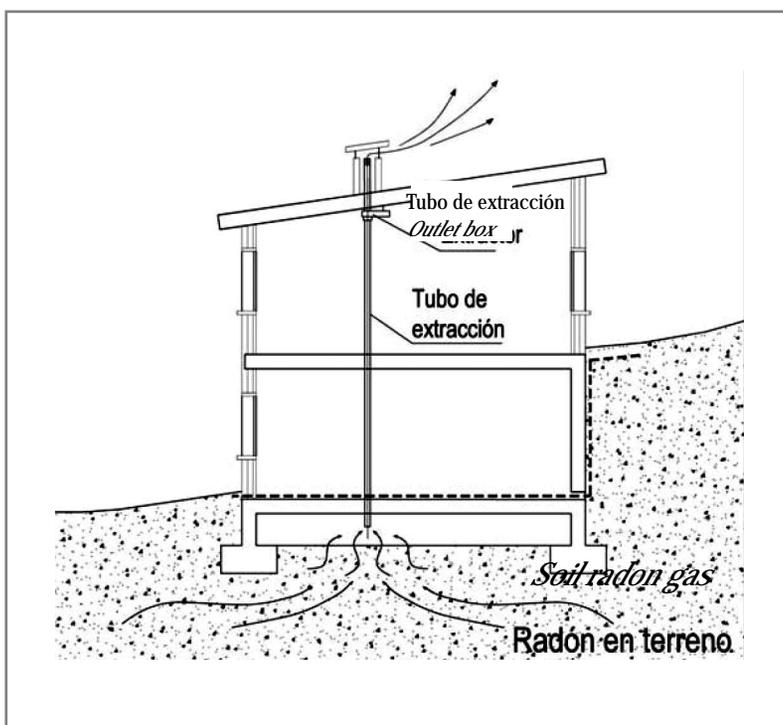


Figura 9. Medidas de extracción
Figure 9. Extraction Measures

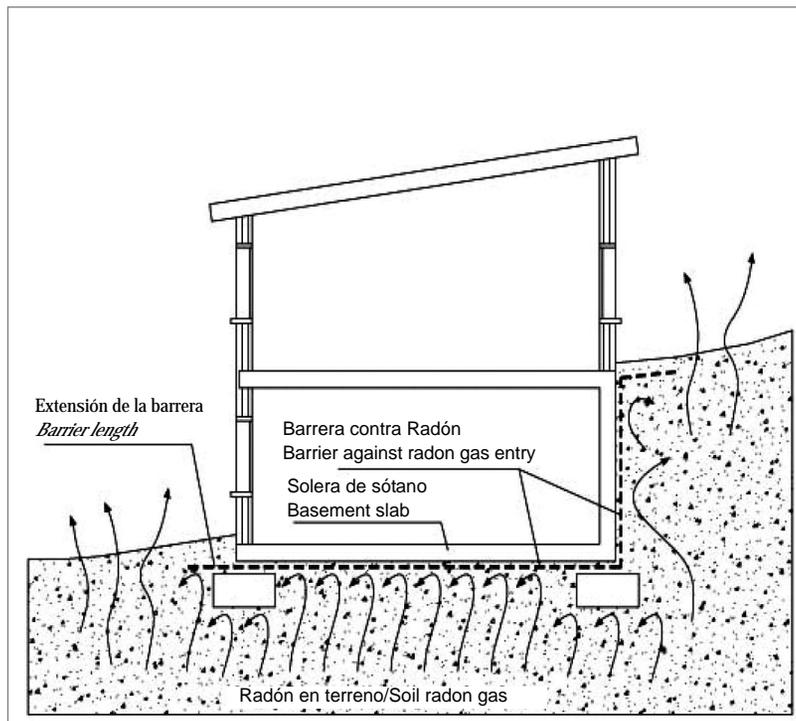


Figura 10. Medidas de barreras
Figure 10. Barrier Measures

En este trabajo se analizan únicamente las medidas de extracción, mediante tiro natural y mediante tiro forzado usando espacios de captación (arquetas) centrados y exteriores

a) Efectividad de un sistema de extracción natural por captación en arqueta central.

Esta medida de rehabilitación consiste en un sistema de extracción natural del gas en el terreno de asiento de la edificación. Se ha construido al efecto una arqueta enterrada para captar el gas en el subsuelo y se ha situado bajo la solera del módulo perforando la losa de hormigón. También se aprovecho para construir una arqueta exterior para evaluar la influencia de la ubicación de las mimas. Ambas se han construido con ladrillo perforado para permitir la entrada del gas hacia el interior. (Figuras 11 y 12).

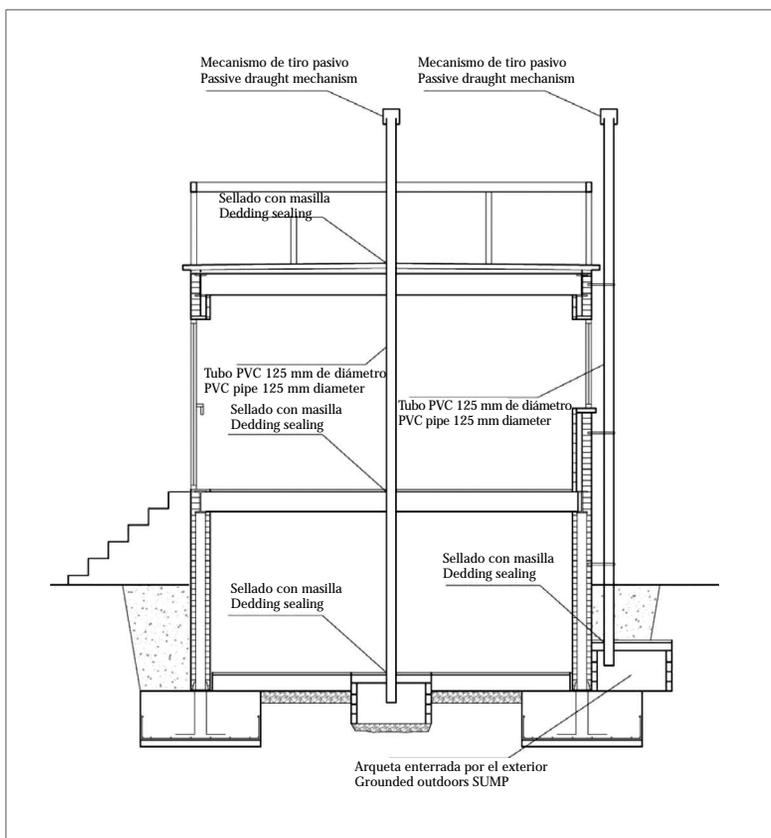


Figura 11. Sección del módulo por el eje central. Se observa el diseño del sistema de extracción
 Figure 11. Modulus section by central shaft. It shows the extraction system design

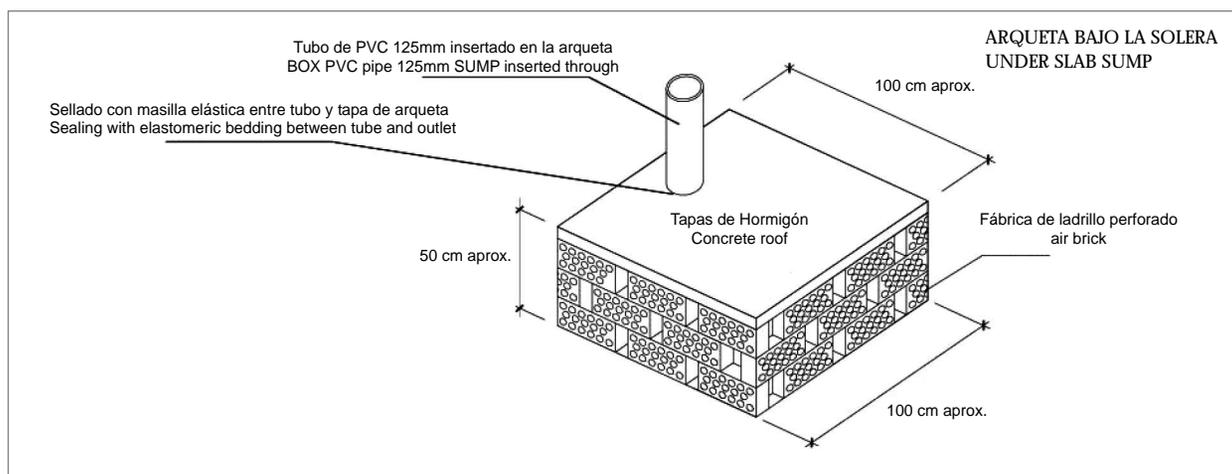


Figura 12. Diseño de la arqueta tipo
 Figure 12. SUMP prototype design

Se han insertado tubos por la parte superior de las arquetas y se les ha conducido hasta cubierta para forzar un tiro natural. (Figuras 13 y 14)



Figura 13. Fotografía de la construcción de la arqueta situada bajo la solera de sótano
Figure 13. Picture of construction of SUMP inserted under basement slab



Figura 14. Salida de los tubos a cubierta. En esta fotografía se encuentran sellados en su extremo
Figure 14. Tubes output to the roof. This picture shows tubes sealed in the base

Se trata de estudiar la mitigación que puede producir el sistema de extracción en la concentración interior. En los extremos de estos tubos, se colocó un dispositivo de extracción natural que funciona por el efecto del viento. (Figura 15).



Figura 15. En esta fotografía se encuentra abierto el tiro de la arqueta situada bajo el módulo mientras que el otro tubo está sellado
 Figure 15. This picture shows SUMP opened draught located underneath the modulus, while the other tube is sealed

El efecto que ello causó fue una reducción considerable en la concentración de radón en el interior del módulo. En la Figura 16 se observa como la concentración de radón en el sótano se reduce de unos índices que oscilan en torno a los 80.000 Bq/m³ hasta los 1.500 Bq/m³. En planta baja la concentración ha pasado de un valor medio de 20.000 Bq/m³ a un valor medio de 500 Bq/m³.

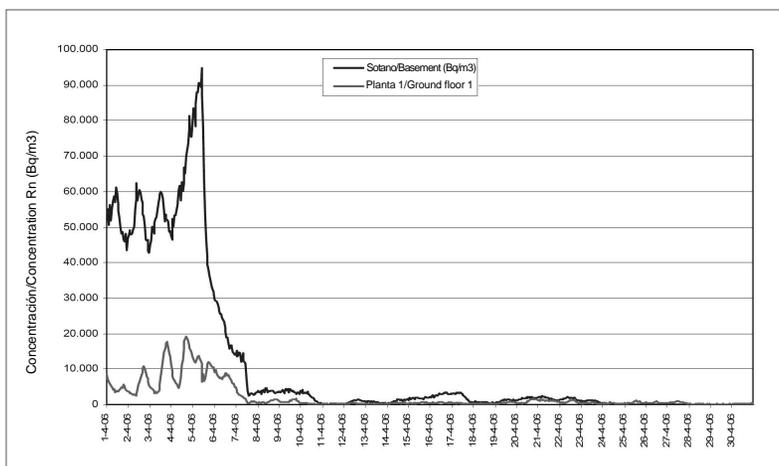


Figura 16. En esta gráfica se observa la reducción en la concentración de radón cuando han entrado en funcionamiento la extracción natural a través de las dos arquetas enterradas
 Figure 16. This graph shows a radon gas decrease when natural draught is operating by means of two grounded SUMPS

La velocidad de viento puede provocar un mejor funcionamiento del tiro pasivo debido al efecto “venturi” y parece que así se confirma en los días del 10 al 12 del mes de abril en los que se observa una relación positiva entre el aumento de la velocidad del viento y la disminución de concentración radón (Figura 17).

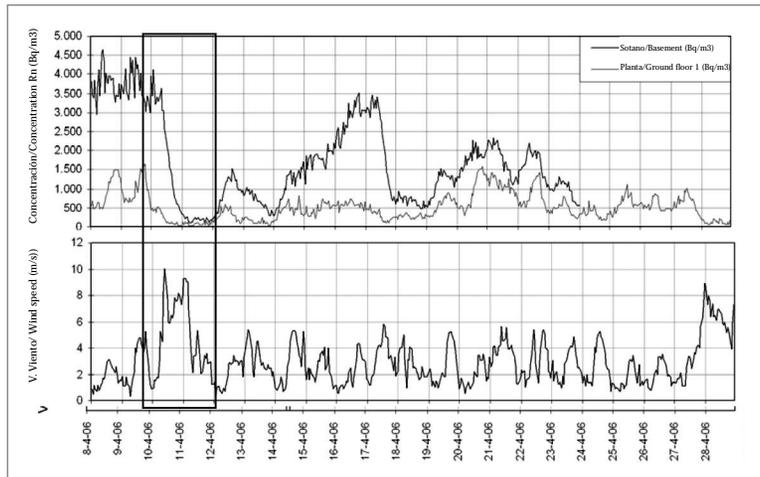


Figura 17. Al aumentar la velocidad de viento se produce una succión mayor por las arquetas y por tanto una mayor extracción de radón
 Figure 17. When increasing wind speed a higher suction process is produced through SUMPS and therefore a higher output of radon gas takes place

Los resultados de efectividades de esta primera medida se resumen en la Tabla 3 que muestra las concentraciones iniciales, las obtenidas tras la intervención y la reducción de radón conseguida por la medida correctora introducida. Esta reducción se expresa también en porcentaje sobre la inicial.

Tabla 3. Efectividad de la medida de rehabilitación (a)
 Table 3. Rehabilitation measure effectiveness (a)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m3) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN NATURAL NATURAL DRAUGHT								
01-Extracción Natural por arqueta Central 01-Natural draught by central SUMP	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91

b) Efectividad de un sistema de extracción natural por captación en arqueta exterior.

La base de funcionamiento de este sistema es la misma que la del sistema anterior. En este caso, se sella el tubo que conecta la arqueta central y se abre el de la exterior. La extracción se realiza únicamente por la arqueta exterior mediante tiro natural. De esta manera se analiza que capacidad de extracción presentan las arquetas en función de su ubicación. En la medida anterior funcionaba la arqueta central, y en ésta solo la exterior.

La efectividad de esta medida es la siguiente:

Tabla 4. Efectividad de la medida de rehabilitación (b)
Table 4. Effectiveness of rehabilitation measure (b)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m3) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN NATURAL NATURAL DRAUGHT								
03-Extracción Natural por arqueta Exterior 03-Natural draught by central sump	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53

Se observa que las efectividades conseguidas son bastante menores que en la anterior medida correctora. Este fenómeno se podría explicar por la barrera que constituye la cimentación del módulo. La arqueta se encuentra enterrada por el exterior de la zapata corrida de cimentación.

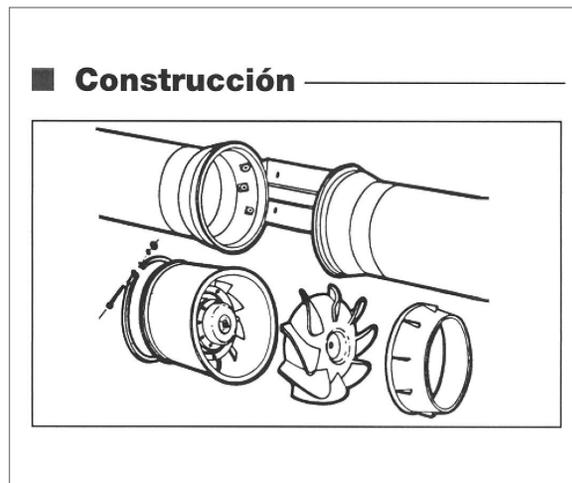
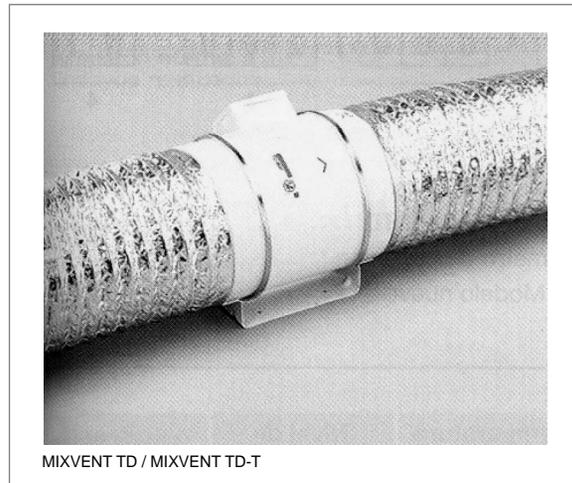
Dicha cimentación perimetral cerca, físicamente, el espacio de terreno bajo él, generando una zona que se ve menos afectada por las succiones creadas por la arqueta. Esta situación provoca que una mayor cantidad de radón penetre en el interior del módulo en lugar de alcanzar la arqueta de captación. Por otro lado se ha comprobado que, al igual que ocurría en la medida correctora anterior, el viento juega un papel importante en la extracción de radón por arquetas de captación.

La succión que produce el viento en la cabeza del tubo, ayudado por el mecanismo de tiro pasivo, con lleva a una mayor potencia extracción y con ello, mayor radón expulsado. A mayor velocidad mayor es la extracción y por tanto mayor es la reducción en la concentración interior.

c) Efectividad de un sistema de extracción forzada (ventilador de 80 W de potencia) por arqueta central.

Ésta es una variante de la medida de extracción natural por arqueta central (a) en la que se ha forzado el tiro mediante un extractor mecánico de 80 W de potencia. La base de funcionamiento es la misma, extraer aire contaminado de radón del terreno bajo el módulo para evitar que este penetre en el interior del edificio. La extracción se realiza a través de la misma arqueta de captación en la situación central bajo la solera del módulo, y la conexión al exterior es mediante el mismo tubo de la medida nº 2. En la boca de salida a cubierta se instaló un extractor mecánico de tipo helico-centrífugo.

El diámetro de conexión es de 125 mm y genera una depresión máxima en la arqueta central de 155 Pa. Las Figuras 18 y 19 muestran el tipo de extractor instalado:



Figuras 18 y 19. Modelo de extractor colocado en el tubo. Marca: Soler & Palau. Modelo: MIXVENT TD 350/125
 Figures 18 y 19. Flow duct fan installed in the tube. Brand Soler & Palau. Model MIXVENT TD 350/125

Las características de este extractor son las que muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Características técnicas del extractor instalado
 Table 5. Technical characteristics of the installed flow duct fan

Tipo Type	Velocidad Speed (r.p.m.)	Potencia absorbida Power absorbed max. (W)	Intensidad absorbida Absorbed current max. (A)	Caudal de descarga libre Air flow at free discharge (m ³ /h)	Nivel de presión sonora Sound pressure level (dBA)	Peso Weigh (kg)
MIXVENT TD 350/125	2.210	80	0.37	360	30	2

La Figura 20 muestra el diseño de la medida correctora:

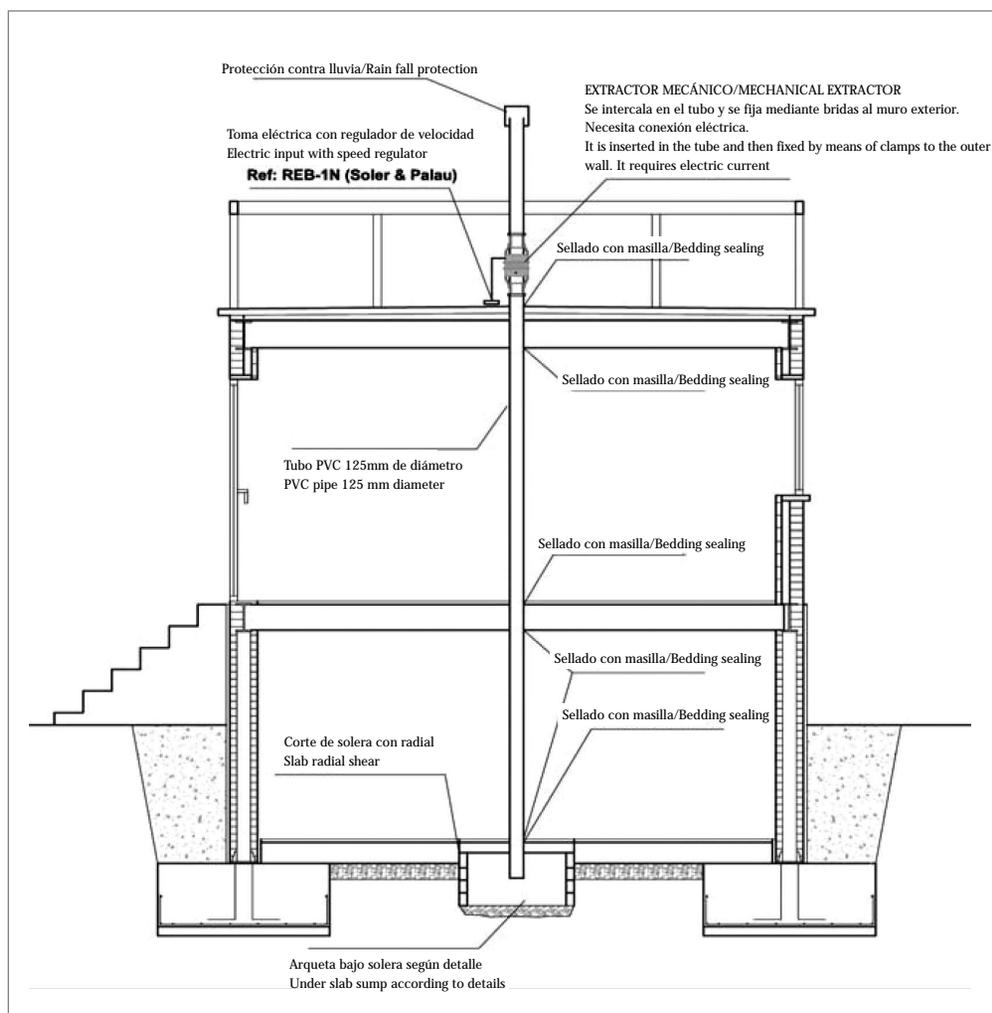


Figura 20. Diseño de la solución de rehabilitación (c)
 Figure 20. Design of rehabilitation solution (c)

La efectividad conseguida se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Efectividad de la medida de rehabilitación (c)
 Table 6. Effectiveness of rehabilitation measure (c)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m3) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m3) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m3) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN FORZADA NATURAL DRAUGHT								
05-Extracción Forzada (56w) por arqueta Central 05-Forced draught by central sump	39.385	6.855	409	368	38.976	6.487	99	95

Este cuadro muestra la alta efectividad conseguida con la medida. Los valores obtenidos en ambas plantas rondan los 400 Bq/m³, resultados que cumplen con los recomendados para edificios construidos según la Comisión Europea.

El mantenimiento del ventilador es un tema crucial en este tipo de medidas. La efectividad se confía al funcionamiento del extractor por lo que si éste falla el sistema deja de funcionar y el radón vuelve a acumularse en el interior del edificio sin que pueda ser detectado hasta que no se realicen nuevas medidas de concentración. Para evitar este fallo se pueden usar alarmas que saltan en cuando detectan un mal funcionamiento del ventilador. Por otro lado, la influencia de los cambios de presión atmosférica queda significativamente reducida por la acción del extractor mecánico.

d) Efectividad de un sistema de extracción forzada (ventilador de 80 W de potencia) por arqueta exterior.

En esta nueva medida, última de las de extracción por arquetas, se traslada el extractor mecánico de 80 w a la salida del tubo que conecta con la arqueta exterior. El tubo de la arqueta central se sella. La base de funcionamiento para esta solución es la misma que para la medida (b), extracción natural desde arqueta exterior, con la salvedad de que en este caso se fuerza el tiro mediante el uso de un extractor mecánico de 80 w de potencia. Con esta medida se ha analizado la capacidad de reducción de radón que tiene esta medida comparada con la (b) en la que el tiro era natural y también comparado con la efectividad de la medida anterior (c) en la que el mismo extractor estaba colocado en el tubo de conexión de la arqueta central.

La efectividad conseguida la muestra la Tabla 7.

Tabla 7. Efectividad de la medida de rehabilitación (d)
Table 7. Effectiveness of rehabilitation measure (d)

MEDIDA CORRECTORA CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m ³) INITIAL AVERAGAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m ³) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m ³) REDUCTION		REDUCCIÓN % REDUCTION	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor 1
EXTRACCIÓN FORZADA NATURAL DRAUGHT								
07-Extracción Forzada (80w) por arqueta Exterior 07-Forced draught by means of external sump	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93

Se observan efectividades bastantes superiores a la que daba la medida correctora de extracción por arqueta exterior por tiro natural (b), que mostraba unos resultados de efectividades del 58 % y 53 % para planta de sótano y planta 1 respectivamente.

En este caso, la cimentación del módulo que constituía una barrera para la extracción por arqueta exterior en tiro natural (b), no parece influir en el mismo grado. Se obtiene la siguiente apreciación: la instalación de un extractor en una arqueta exterior, consigue buenas efectividades en relación al tiro natural, y muy similares a las obtenidas por extracción forzada por arqueta central. Serviría, pues, para una actuación en edificio existente con una intervención por el exterior, que no ocasionaría molestias para los habitantes.

3.3 Análisis comparativo de efectividades de las medidas de rehabilitación ensayadas

La Tabla 8 muestra las reducciones de concentración de radón conseguidas por las distintas medidas de rehabilitación, expresadas tanto en Bq/m³ como en un porcentaje de reducción frente a las concentraciones iniciales.

Tabla 8. Efectividades comparadas
Table 8. Compared effectiveness

MEDIDA DE REHABILITACIÓN CORRECTIVE MEASURE	INICIAL CONCENTRACIÓN MEDIA (Bq/m ³) INITIAL AVERAGE CONCENTRATION		CONCENTRACIÓN TRAS LA INTERVENCIÓN (Bq/m ³) CONCENTRATION AFTER INTERVENTION		REDUCCIÓN (Bq/m ³) REDUCTION		EFECTIVIDAD REDUCCIÓN % REDUCTION EFFECTIVENESS	
	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1	Sótano Basement	Planta 1 Ground floor1
EXTRACCIÓN NATURAL NATURAL DRAUGHT								
a)-Extracción Natural por arqueta central Natural draught by means of central sump	39.385	6.855	1.742	603	37.643	6.252	96	91
b)-Extracción Natural por arqueta exterior Natural draught by means of external sump	39.385	6.855	16.607	3.213	22.778	3.642	58	53
EXTRACCIÓN FORZADA FORCED DRAUGHT								
c)-Extracción Forzada (80 W) por arqueta central Forced draught (80 w) by means of central sump	39.385	6.855	349	479	39.036	6.376	99	93
d)-Extracción Forzada (80 W) por arqueta exterior Forced draught (80 w) by means of external sump	39.385	6.855	327	480	39.058	6.375	99	93

En todas ellas, salvo en la medida c (extracción natural por arqueta exterior), se han conseguido efectividades superiores al 90 %. Aunque no se ha podido comprobar que exista una relación lineal en el porcentaje aplicado a otra concentración inicial de radón, si es de esperar, que en situaciones habituales en las que no exista una concentración de radón tan elevada (como ha sido el caso del terreno de la mina de uranio), sí se hubieran conseguido reducciones de radón por debajo de los 400 o 200 Bq/m³ en la mayoría de las medidas probadas.



La Figura 21 presenta un diagrama de barras donde se pueden ver los promedios de concentración tras la intervención en cada una de las medidas de rehabilitación. La línea roja indica el límite de riesgo a partir del cual se debería introducir una actuación de corrección según la comisión europea (400 Bq/m³) (7) para viviendas existentes.

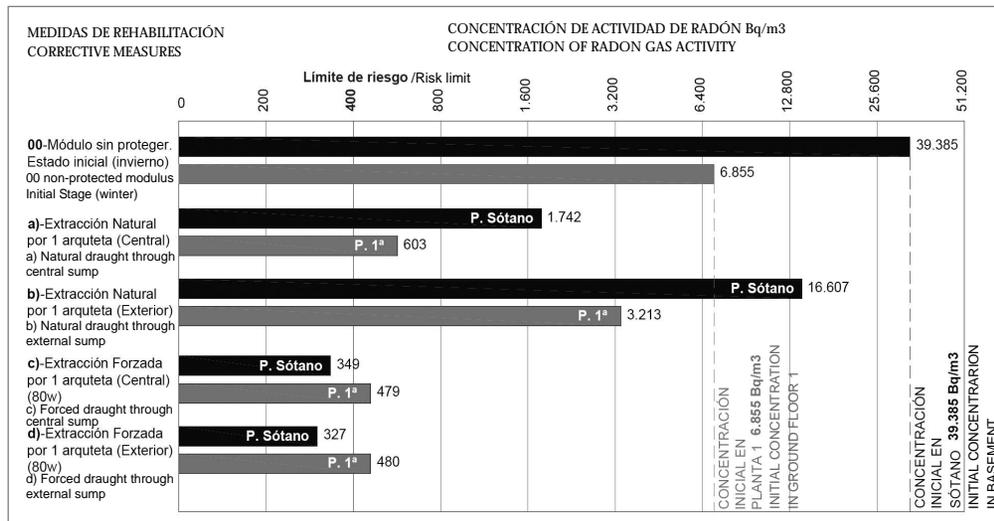


Figura 21. Reducciones de radón en cada una de las medidas correctoras
 Figure 21. Radon gas reductions for each corrective measure

Las líneas discontinuas marcan las concentraciones iniciales tanto en planta de sótano como en planta 1^a.

Las medidas que mayor efectividad han conseguido, y que se aproximan o alcanzan el límite de seguridad de concentración (400 Bq/m³), son aquellas que hacen uso de extractores mecánicos para forzar los tiros de las arquetas captadoras, por lo que hay que tener en cuenta que, para que den el rendimiento previsto, es necesario que el extractor no deje de funcionar. Se recomienda la instalación de un sistema de alarmas que detecten fallos eléctricos o mecánicos, y un programa de mantenimiento que garantice un funcionamiento continuo.

En cuanto a los sistemas de extracción natural, medida de tipo pasivo, se ha comprobado que la arqueta situada de forma centrada conforme a la planta, tiene una capacidad de captación mayor que la colocada por el exterior. Por otro lado, se ha visto que la velocidad del viento influye positivamente en la reducción de radón. Este efecto está relacionado con la mayor succión que se produce en la arqueta debido al efecto “Venturi” que provoca la velocidad de viento en la boca del tubo de expulsión.

⁷ Comisión Europea de 21 de Febrero de 1990 (90/143/EURATOM)

Tanto en el sistema que está conectado a la arqueta centrada o al de la arqueta de exterior, se han comprobado efectividades mayores cuando el viento supera velocidades de 8 m/s.

En términos generales, y teniendo en cuenta que se ha realizado el prototipo de edificio en un terreno con altos contenidos de radón, todas las medidas han dado resultados favorables y dentro de los rangos esperados, siendo las de máxima efectividad, las de tiro forzado.

4. Conclusiones

Atendiendo a las advertencias de entidades como la Organización Mundial de la Salud, IRPA (International Radiation Protection Association) o la propia Comunidad Europea en su directiva de 21 de Febrero de 1990 (EURATOM, 1990), la inhalación de gas radón constituye un riesgo para la salud al aumentar el riesgo de contraer cáncer pulmonar. En este sentido, el sector de la edificación debe plantear sistemas de protección que garanticen que, la inmisión del gas al interior de los espacios habitados, no supere los límites de concentración recomendados.

El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, a instancias de del Consejo de Seguridad Nuclear, ha desarrollado investigaciones para sentar las bases normativas destinadas a proteger a los usuarios de edificios de concentraciones excesivas de gas radón.

En cuanto a los registros de concentraciones de radón en el módulo cuando se encuentra sin ningún tipo de protección frente a la entrada del gas, parece que es la presión atmosférica el parámetro determinante de las variaciones en la concentración observadas en el interior del módulo. En cuanto a relación que pueda tener las precipitaciones en la concentración de radón en el interior del módulo, parece que se evidencian positivamente cuando la misma adquiere un valor significativo. Durante el periodo analizado de varios meses, no parece haber correlación entre ninguna de las temperaturas medidas y la concentración de radón interior.

El análisis de efectividades de las distintas medidas de rehabilitación testadas, muestra resultados satisfactorios en la ejecución de las distintas soluciones en un módulo experimental. Teniendo en cuenta los límites de la comisión europea (400 Bq/m^3 para viviendas construidas), en las concentraciones altas debidas a la localización, solo cumpliría la solución de extracción forzada. Sin embargo es probable que en situaciones habituales de concentraciones de radón inferiores a 1000 Bq/m^3 las soluciones estudiadas pueden ser suficientemente efectivas.

En este trabajo se han presentado algunas de las medidas de rehabilitación, quedando a la espera de poder mostrar los resultados de otro tipo de medidas como pueden ser presurizaciones bajo la solera, ventilaciones forzadas de semisótano y barreras de protección frente al paso de radón.



Todos estos sistemas se estiman efectivos y de su evaluación futura se podrá obtener el análisis en comparación con las medidas que se recogen en este trabajo.

5. Agradecimientos

Mostramos un especial agradecimiento a:

Enrique Suárez, José Luis Martín Matarranz y a Luis Quindós Poncela de la Universidad de Cantabria.

6. Referencias / References

- Allen L., Robinson Richard G., Sextro y William J. Riley (1997), Soil-gas entry into houses driven by atmospheric pressure fluctuations-the influence of soil properties. *Atmospheric Environment* vol. 31, no. 10, pp. 1487-1495.
- Barros-Dios J.M., Barreiro M.A., Ruano-Ravira A y Figueiras A. (2002), Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: A population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 156 (6), 548-555.
- Clavensjö B. y Gustav Akertblom G. (1994), "The Radon Book. Measures against radon" The Swedish Council for Building Research. Suecia
- Cohen B. (1993), Relationship between exposure to radon and various types of cancer. *Revista: Health Phys.* 65(5) 529-531.
- Collignan B. (1999), CSTB (Centre Scientifique et Technique de la Construction). "Réduire la concentration en radon dans les bâtiments existants". Francia
- Comisión de las Comunidades Europeas (1990), Recomendación de la Comisión de 21-2-1990 relativa a la protección de la población contra peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. (90/143/Euratom). D.O.C.E. L80, 2628.
- CSTC Centre Scientifique et Technique de la Construction (1999), Le radon dans les habitations. Bélgica
- EPA Environmental Protection Agency (2001), Building Radon Out. USA
- Font L. (2002), The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors" Grup de Física de les Radiacions, Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona
- Hintenlang D.E. y Al-Ahmady K.K (1992), Pressure differentials for radon entry coupled to periodic atmospheric pressure variations. *Indoor Air*, Volume 2, Number 4, pp. 208-215(8). December
- I.C.R.P International Commission on Radiological Protection (1987), Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. ICRP Publication 50, annals of the ICRP 17 (1), Pergamon Press, Oxford.
- Kraner H.W; Schrolder G.L; Evans R.D. (1964), Measurement of the effects of atmospheric variables on radon-222 flux and soil gas concentration. In: Adams, J.A.S. and Lowder, W.M. Editors, 1964. A review in the natural radiation environment University of Chicago Press, Chicago, pp. 191-195.
- Loomis L. (1995), Florida Department of Community Affairs. Radon Program "Florida standard for passive radon-resistant new residential building construction". USA
- Loomis L. (1994), Florida Department of Community Affairs. Radon Program "Florida standard for mitigation of radon in existing building". USA
- Matarranz J.L. (2004), Concentraciones de Radón en Viviendas Españolas. CSN, Madrid, España.
- Murley J.F. (1996), Florida Department of Community Affairs. Florida standard for radon-resistant new commercial building construction. USA
- Nazaroff W.W., Moed B.A. y Sextro R.G. (1988), Soil as a source of indoor radon: generation, migration, and entry. In: Nazaroff WW, Nero AV, editors. *Radon and its decay products in indoor air*. New York: Wiley-Interscience, p. 57 -112.
- Pavia M., Bianco A., Pileggi C. y Angelillo I.F. (2003), Meta-analysis of residential exposures to radon gas and lung cancer. *Bulletin of the World Health Organization* 2003, 81 (10), 732-738.
- Quindós L.S. (1995), Radón, un gas radiactivo de origen natural. CSN y Universidad de Cantabria, España
- Quindós L.S., Fernández P.L., Gómez J., Sainz C., Fernández J.A., Suarez E., Matarranz J.L. y Cascón M.C. (2004), Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environment International* 29, 1091-1096.
- Sarah C. y David C. (2003), Health Effects of residential radon: European perspective at the end 2002. II Workshop. Radón y Medio Ambiente. Santiago de Compostela
- World Health Organization (2001), Department of protection of the human environment. Sources, Exposure and Health Effects. Organización Mundial de la Salud.