

# EL GAS RADÓN COMO CONTAMINANTE ATMOSFÉRICO

## *THE RADON GAS. AN AIR POLLUTANT*

Luis Santiago Quindós Poncela, Carlos Sainz Fernández, Luis Quindós López, Ismael Fuente Merino y José Luis Arteché

Grupo Radón. Facultad de Medicina de Santander. Universidad de Cantabria

### RESUMEN

En este trabajo se abordan distintos aspectos acerca de la problemática del radón en viviendas. Este gas de origen natural se encuentra prácticamente en la totalidad de los suelos de la corteza terrestre debido a la presencia de uranio y radio en la composición de los mismos. En función de factores arquitectónicos y de hábitos de ocupación de la vivienda pueden alcanzarse concentraciones elevadas del gas en interiores. En estas situaciones existe un incremento cuantificable del riesgo de desarrollar cáncer de pulmón en los habitantes de la vivienda. En los últimos años, las mejoras metodológicas en la realización de estudios epidemiológicos han conducido a la obtención de evidencias científicas de la relación entre la presencia de radón en interiores y el riesgo de cáncer de pulmón. Esta relación, encontrada hace años en trabajadores de minas de uranio, ha sido corroborada en el caso del radón residencial a la luz de los metaanálisis realizados recientemente a partir de estudios epidemiológicos agrupados.

Durante los últimos 25 años se han realizado más de 6.000 medidas de radón en interiores. Se presentan los principales resultados de las mayores campañas de medida llevadas a cabo, así como los criterios recientemente establecidos por el Consejo de Seguridad Nuclear acerca de los niveles de intervención en viviendas y lugares de trabajo.

**PALABRAS CLAVE:** radón, cáncer, descendientes.

### INTRODUCCIÓN

El radón se encuentra en cantidades significativas en el suelo<sup>1</sup>, y es este el que representa la mayor contribución del mismo en el interior de las viviendas, tal y como se muestra en la figura 1, sin descartar contribuciones puntuales de materiales de construcción y aguas. La evidencia documental que data del siglo XVI indica que la exposición a niveles elevados de radón era probablemente la causa del exceso de muertes debido a cáncer de pulmón de los mineros de algunas minas de Europa Central, tales como las minas de plata en Alemania y Bohemia<sup>2</sup>. Inicialmente, los científicos pensaban que la radiación natural no era peligrosa para la salud de la

### ABSTRACT

In this work different aspects about the problem of the radon in dwellings are approached. This gas of natural origin is virtually present in all the soils in the earth's crust due to the presence of uranium and radium in the composition of them. Depending on architectural factors and of occupancy habits of the house, high concentrations of this gas can be reached indoors. In these situations, there is a quantifiable increment of the risk of developing lung cancer in the inhabitants of the housing. In the last years the methodological improvements in the realization of epidemiologic studies have led to the obtaining of scientific evidences about the relationship between the presence of indoor radon and the risk of lung cancer. This relationship, found years ago in workers of uranium mines, has been corroborated in the case of the residential radon by the light of several recent meta-analysis performed on groups of epidemiologic studies.

More than 6.000 radon measurements have been carried out in Spain during the last 25 years. A summary of the results obtained from the main national radon surveys are also presented, as well as the criteria recently established by the Spanish Nuclear Safety Council concerning radon action levels in dwellings and workplaces.

**KEY WORDS:** radon, decay products, cancer

población en la mayor parte de nuestros países. Sin embargo, ese punto de vista comenzó a cambiar a mediados del siglo XX. El cambio fue dramático en los años 70 y 80, cuando se descubrió que el interior de algunas casas tenía niveles de radón en concentraciones elevadas. Entonces, en 1984, el asunto atrajo la atención nacional en los Estados Unidos, cuando un trabajador de la construcción puso en marcha un monitor de radiación al entrar en la estación de Generación Nuclear de Limerick, en Pensilvania. La planta no estaba generando todavía productos de fisión, esto hizo pensar que su casa era la fuente de contaminación. En estos momentos, se entiende que en áreas donde el nivel natural de radón es alto, la baja presión del aire dentro de las casas

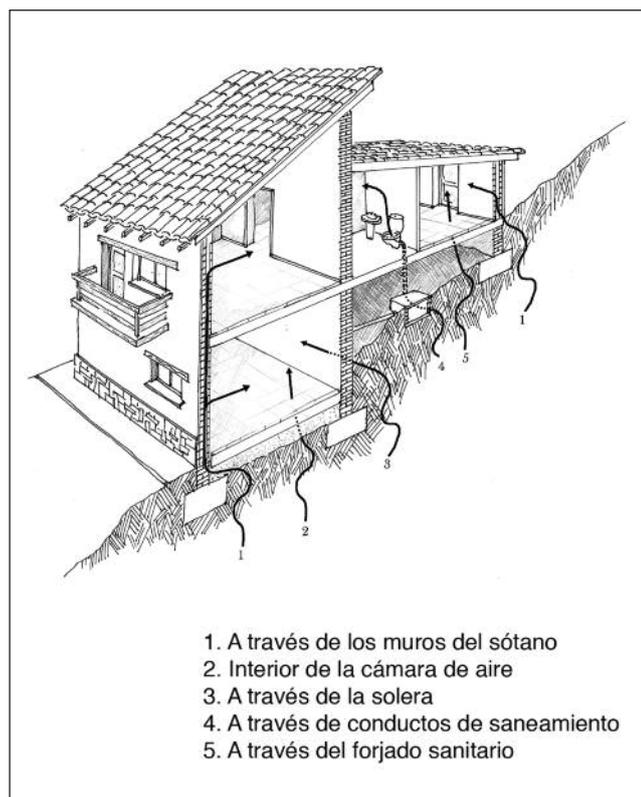


FIGURA 1. Fuentes de radón en una vivienda unifamiliar.

trae como consecuencia, un flujo hacia el interior de aire rico en radón, a través de las grietas en las losas del piso o en las paredes de los sótanos<sup>3</sup>.

En respuesta a la necesidad creciente de información sobre los riesgos de la exposición en interiores se han llevado a cabo estudios epidemiológicos en la población general. Los primeros estudios fueron en gran parte ecológicos en diseño y los resultados variados. Estudios de casos y controles de cáncer de pulmón se implementaron principalmente en los Estados Unidos y Europa. Algunos de estos primeros estudios no medían realmente el radón en interiores, confiando en medidas sustituibles como es el tipo de construcción de la casa, por estas razones los datos obtenidos no resultaron fiables a la hora de proveer estimaciones cuantitativas del riesgo. Estudios más sofisticados con muestras más amplias se llevaron a cabo a mediados y finales de los años 80. Algunos de estos estudios sugerían una asociación entre los niveles elevados de radón en las viviendas y una elevada incidencia de cáncer de pulmón; aunque otros no, incluyendo el estudio que llevó a cabo Salud Canadá en Winnipeg. Estos estudios, en conjunto, no pudieron aportar evidencia concluyente de riesgo incrementado de cáncer de pulmón<sup>4</sup>.

A finales de los años 80, el IV Comité de Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante (BEIR) revisó los estudios de casos y controles publicados y planificados. Inmediatamente se evidenciaron las limitaciones potenciales del tamaño de la muestra y los posibles niveles

de margen de error en las medidas. Se propuso agrupar estudios individuales y se convenció a agencias financiadoras, como el Departamento de Energía y la Comisión para las Comunidades Europeas, para que apoyaran la planificación de grupos eventuales de estudios globales de casos y controles, relacionados con la exposición al radón en interiores y el cáncer de pulmón.

La incertidumbre en la relación entre radón y cáncer de pulmón en los estudios de control de casos iniciales se ha ido reduciendo con sucesivas mejoras metodológicas. En estos momentos se acepta que decenas de miles de muertes cada año por cáncer de pulmón están relacionadas con la exposición al radón. La solidez de los datos y los análisis apuntan a una necesidad de acción. Para reducir el riesgo de cáncer de pulmón por la exposición al radón, las autoridades nacionales deben establecer métodos y medidas que, con una sólida base científica, contribuyan a desarrollar políticas de salud adecuadas.

A este respecto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) tuvo la previsión de trabajar en el desarrollo de las directrices. En 1996 publicó un informe que contenía diferentes conclusiones y recomendaciones encaminadas a comprender científicamente el riesgo del radón. Más recientemente, a través de del proyecto internacional *International Radon Project*, en el que han participado más de treinta países, este organismo ha mostrado la necesidad que tienen los países de actuar en las áreas de control y comunicación de riesgos<sup>5</sup>.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Riesgos derivados de la inhalación de radón

En los últimos 15 años, investigadores de todo el mundo se han reunido regularmente para establecer un marco de trabajo y colaboración comunes. Se han agrupado estudios en Norteamérica y Europa para producir análisis combinados de los diferentes trabajos, obteniéndose esencialmente los mismos resultados.

El proyecto norteamericano de agrupación incluyó información de siete estudios sobre la exposición al radón en el sector residencial, para un total de 3.662 casos y 4.966 controles. Esto permitió un examen más detallado de la distribución de concentraciones de radón, del riesgo de cáncer de pulmón y sus modificadores potenciales, que los realizados con anterioridad. Todos los estudios utilizaron detectores de trazas para medidas a largo plazo, con el fin de establecer las concentraciones de radón en el sector residencial. Las probabilidades (ORs) de cáncer de pulmón se incrementaron con la concentración de radón en este sector de estudio. La OR estimada después de una exposición al radón, con una concentración de 100 Bq/m<sup>3</sup> en un intervalo de exposición de 5 a 30 años antes de la fecha de referencia, fue de 1,11

(95% intervalo confiable = 1,00-1,28). Esta estimación, es compatible con el 1,12 (1,02-1,25) pronosticado por la extrapolación en una tendencia descendente de datos de la minería. No había evidencias de la heterogeneidad de los efectos de radón en los estudios. No había heterogeneidad aparente en la asociación por sexo, nivel educacional, tipo de respuesta (personal o enviada) o tabaquismo, aunque había algunas evidencias de la relación entre la disminución del riesgo de cáncer de pulmón asociado al radón con la edad<sup>6</sup>.

El grupo de colaboración europeo extrajo información de 13 estudios existentes, que incluyen 7.148 casos de cáncer de pulmón y 14.208 controles. La concentración media de radón para los 13 estudios de nueve países es considerablemente mayor que la media en los análisis combinados norteamericanos. La concentración media de radón en las viviendas de las personas del grupo de control era de 97 Bq/m<sup>3</sup>, con 11 % de las medidas > 200 y 4% > 400 Bq/m<sup>3</sup>. La probabilidad de cáncer de pulmón era de 1,08 (con 95% intervalo confiable 1,03-1,16) por 100 Bq/m<sup>3</sup> de incremento en el radón medido<sup>7,8</sup>.

Esta estimación del exceso de riesgo no difiere significativamente con el estudio, la edad, el sexo o el tabaquismo. En ausencia de otras causas de muerte, los riesgos absolutos de cáncer de pulmón a la edad de 75 años a concentraciones usuales de radón de 0,100 y 400 Bq/m<sup>3</sup> serán de 0,4%, 0,5% y 0,7%, respectivamente, para los no fumadores y cerca de 25 veces mayor (10%, 12% y 16%) para los fumadores. Es decir, de forma colectiva, pero no por separado, los estudios europeos muestran el peligro del radón en el sector residencial, especialmente para los fumadores o aquellos que abandonaron el hábito recientemente.

Los resultados de estos estudios conjuntos muestran una evidencia consistente de la asociación entre el radón residencial y el riesgo de cáncer de pulmón, un resultado pronosticado por la extrapolación de los resultados de estudios ocupacionales realizados a mineros expuestos al radón en el interior de las minas, y consistente con los resultados que arrojan los estudios *in vitro* y con animales<sup>9</sup>. Además, todo lo anterior ha venido refrendado por la última publicación de la OMS, en la que no solo deja clara la relación existente entre la exposición a radón y la incidencia de cáncer de pulmón, sino que además establece un porcentaje, entre el 3% y el 14% del total de los cánceres de pulmón, atribuible directamente a la inhalación de dicho gas<sup>10</sup>.

### Recomendaciones y regulación

La Comisión Internacional para la Protección Radiológica (ICRP)<sup>11</sup> estableció en 1991 que la mejor opción de un nivel de acción para las viviendas traería consigo la necesidad de un considerable trabajo para remediar esta situación. En 1993 recomendó un nivel óptimo en el radón de 200-600 Bq/m<sup>3</sup>, el cual corresponde

a dosis anuales efectivas de 3 a 10 mSv. Esta comisión en sus nuevas recomendaciones, refrendadas en su última reunión el pasado mes de marzo de 2007 en Essen (Alemania) no ha hecho sino reafirmarse en el mismo criterio, en cierta medida, en contra de las opiniones de múltiples investigadores que sugerían un descenso en los mencionados límites. Es más, a raíz de la publicación del *WHO Handbook Indoor Radon*, la ICRP en su reunión de comisión en noviembre de 2009 propone una reducción del nivel de 600 Bq/m<sup>3</sup> a 300 Bq/m<sup>3</sup>, lo que sin duda es una proposición de cambios de los factores de conversión de concentración a dosis<sup>12</sup>.

En cuanto a las acciones de remedio, la Environmental Protection Agency (EPA) estadounidense considera que el método más efectivo y económico es la despresurización compartida. Esto cuesta un promedio de 1.200 dólares por casa. La autoevaluación por un inspector profesional puede costar muy poco, unos 350 dólares. La aplicación de barreras impermeables al radón en las casas nuevas podría añadir de 350 a 500 dólares al costo de las mismas. Esta agencia no depende de la regulación sino de la voluntad de acción, de la educación pública y de la asociación de un amplio rango de organizaciones, los gobiernos, ONGs, los educadores, los empleados de bienes raíces y de la industria de servicios del radón. La EPA considera que la mejor oportunidad para abordar la problemática del radón está en el propio mercado inmobiliario, encontrándose los mayores obstáculos para la aceptación pública en los gastos para mitigar el problema cuando este se presenta.

La Acción Concertada ERRICCA-2 (European Radon Research and Industry Collaboration Concerted Action, Contract No: FIRI-CT-2001-20142), encuadrada dentro del Fifth Framework Programme de la Unión Europea, representa el mayor esfuerzo realizado hasta el momento presente, en la labor de conseguir que investigadores y profesionales unan sus esfuerzos para tratar de minimizar el impacto negativo que el gas radón tiene en nuestra salud, reuniendo a representantes de más de veinte países procedentes del campo científico e industrial.

## RESULTADOS

### El radón en España

Desde hace más de treinta años el interés en esta fuente principal de radiación natural ha dado lugar al desarrollo de campañas nacionales de medida, encaminadas a evaluar los niveles medios de radón en viviendas y a localizar las áreas de mayor riesgo potencial, derivado de la inhalación del radón y sus descendientes (Figura 2), al igual que se ha llevado a cabo en otras zonas de la Unión Europea (Figura 3).

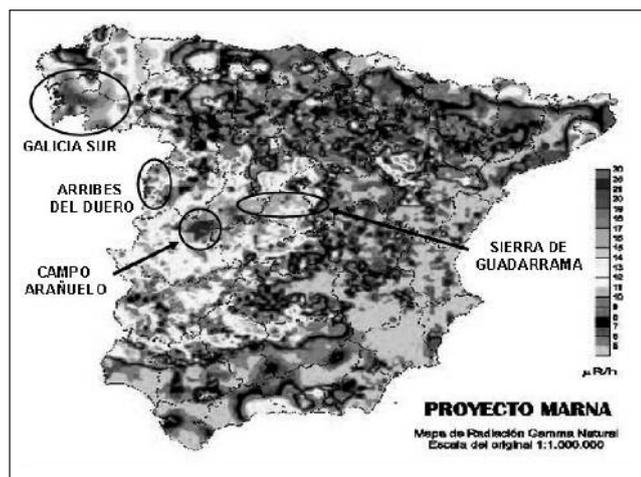


FIGURA 2. Mapa de radiación gamma externa y regiones de alto nivel de radiación natural en España.

En España, la primera campaña nacional de medida de radón empezó en 1988<sup>13</sup>. Los datos obtenidos de las 2.000 medidas llevadas a cabo en este estudio representaron el primer paso para afrontar la problemática del radón en España. Además, desde 1991 el Consejo de Seguridad Nuclear I, junto con la Empresa Nacional del Uranio y algunas universidades, desarrollaron el proyecto MARNA<sup>14,15</sup>. Este proyecto tuvo como objetivo principal realizar un mapa nacional de radiación natural, con el cual estimar las zonas de emisión potencial de radón. La confección del mapa se hizo a partir de medidas de radiación gamma externa y estimaciones de la cantidad de radio en suelos, usando parámetros geológicos y correlaciones empíricas entre tasa de exposición gamma externa al aire libre y la concentración de  $^{226}\text{Ra}$  en suelo.

A partir de la información conjunta obtenida en estos estudios se inició otra campaña nacional de medida de radón y varias regionales focalizadas en aquellas zonas donde se registraron los valores más altos de radiación natural. Estos proyectos contemplaron una aproximación más amplia a la exposición a fuentes naturales de radiación, incluyendo, además de las medidas de radón en interiores, medidas de radiación gamma externa y caracterización del contenido en isótopos radiactivos naturales de suelos.

Las medidas del radón en interiores fueron realizadas con detectores de trazas CR-39 expuestos en periodos de seis meses, tal y como se muestra en la figura 4. En todas las medidas se aplicó un factor de corrección estacional, necesario para obtener valores representativos de la concentración media anual de radón<sup>16</sup>. La radiación gamma externa a 1 m sobre el suelo se midió usando un monitor Mini-Instruments tipo 6-80 dotado con un tubo Geiger Muller MC-70, especialmente diseñado para medir niveles gamma ambientales. Por otro lado, la determinación de radiaci-

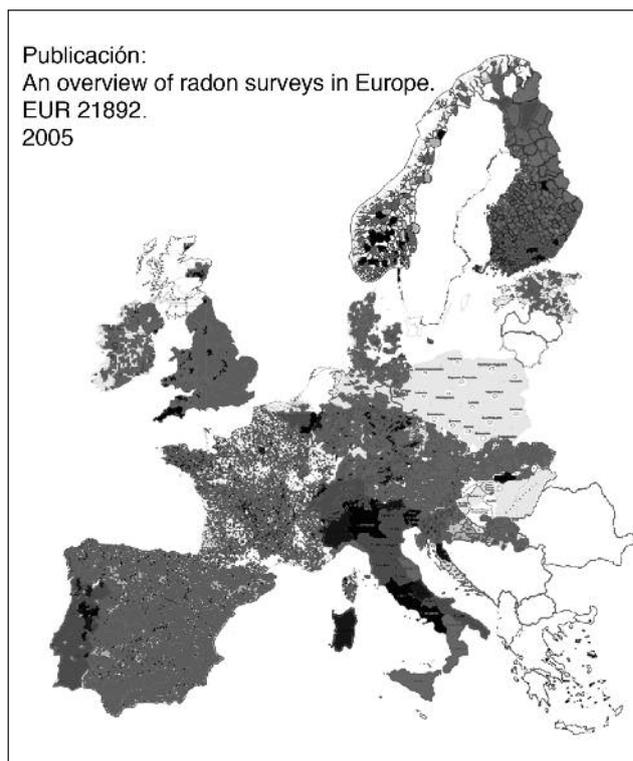


FIGURA 3. Mapas "potenciales" de radón a nivel europeo.

vidad en suelos se centró en la medida de las concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ . Para ello, todas las muestras de suelo son secadas en horno a 100 °C durante 24 h, pesadas para determinar el contenido en agua, trituradas y tamizadas. Una vez envasadas, se espera un periodo no inferior a cuatro semanas para asegurar que se ha alcanzado el equilibrio radiactivo entre  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  y sus descendientes de vida corta. Transcurrido este tiempo, las medidas de actividad gamma se realizan usando un detector de semiconductor de Ge de alta pureza y bajo fondo con una eficiencia relativa del 20% y una resolución de 1,86 KeV en el pico de 1,33 Mev.

#### Entorno de las centrales nucleares españolas

Durante 1998 y 1999, el Consejo de Seguridad Nuclear financió un proyecto de evaluación de la exposición a fuentes naturales de radiación a las que se encuentra sometida la población en el entorno de las centrales nucleares en España. Las seis instalaciones en activo aglutinan en sus alrededores una población total de unas 200.000 personas. Las magnitudes medidas en este proyecto fueron radón en interiores, tasa de dosis por radiación gamma externa y contenido radiactivo natural en suelos.

El mayor promedio de dosis efectiva anual se encontró en el entorno de la central nuclear de Almaraz, en la provincial de Cáceres<sup>17</sup>. El valor estimado, de 4,07 mSv  $\text{y}^{-1}$ , fue 1,6 veces superior al promedio nacional. Y la

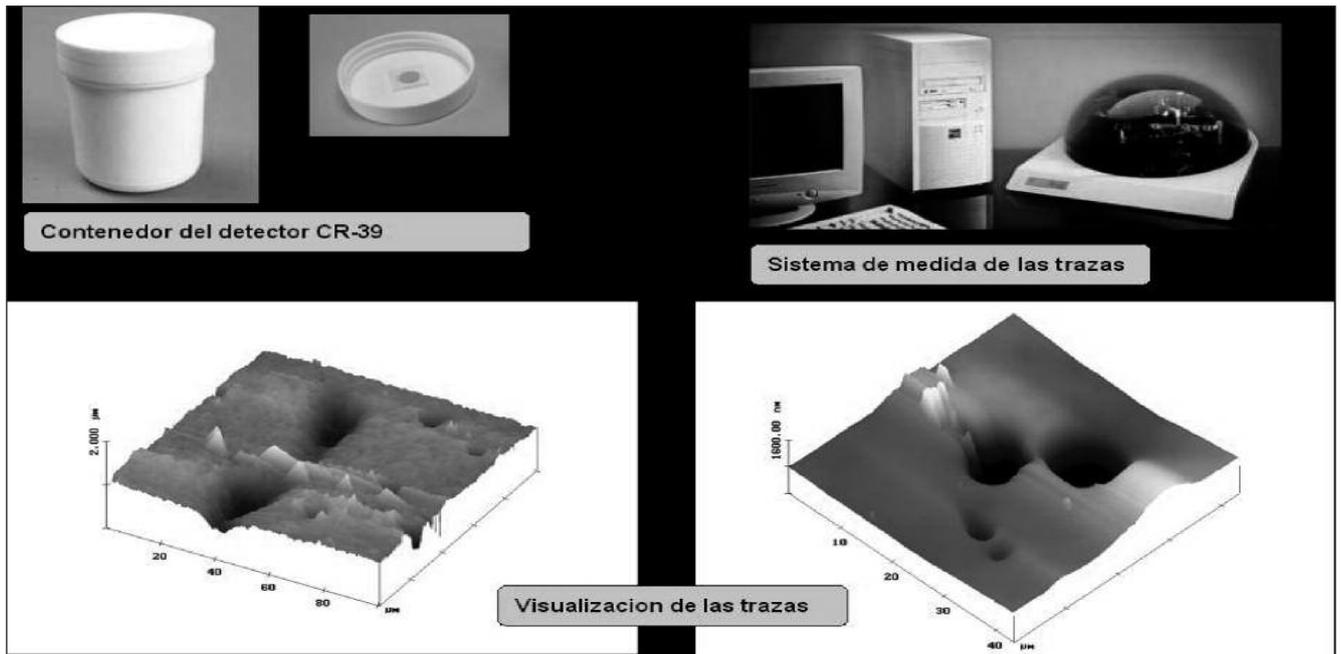


FIGURA 4. Evaluación de la concentración de radón.

razón de esta importante diferencia con el resto de las zonas estudiadas se encontró en las concentraciones de radón en viviendas. Por esta razón, y con el fin de realizar una estimación más precisa de la dosis debida a la exposición al radón, se llevó a cabo un mayor número de medidas en la región del Campo Arañuelo, en el entorno de la central de Almaraz.

Además de la mejora en la estimación de dosis, este estudio puso de relieve la existencia de una zona de alto nivel de radón en la comarca de la Vera en el norte del Campo Arañuelo. En la Vera se encontró que un 9% de las casas, presentaban concentraciones promedio de radón superiores a los  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ . Además, la nueva estimación de dosis proporcionó un valor promedio de  $6 \text{ mSv}$  por año en la comarca, encontrándose el valor máximo de  $25 \text{ mSv}$  por año en el pueblo de Jarandilla, perteneciente a la zona en la que los estudios previos habían mostrado que un 30% de las casas tenían niveles de radón por encima de  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ .

#### Entorno de las antiguas minas de uranio

Desde 2000 hasta 2001, con financiación del Consejo de Seguridad Nuclear, se realizó un estudio de medida de radiación natural en el entorno de las seis zonas empleadas para la extracción y procesado del mineral de uranio en España. La mayoría de las antiguas minas de uranio se localizan en la parte occidental del país y predominan en su composición geológica rocas metamórficas, calcita y granodioritas. Las minas fueron explotadas durante el periodo comprendido entre 1950 y 1980 para, posteriormente, iniciarse un plan de restauración que duró desde 1987 hasta 1996. Uno de los principales objetivos del plan de restauración fue reducir y controlar el flujo de radón desde el suelo y la con-

taminación radiológica del agua. La población de todas estas áreas comprende unos 400.000 habitantes.

Las máximas media geométrica de concentración de radón y dosis efectiva anual de  $111 \text{ Bq m}^{-3}$  y  $5,1 \text{ mSv}$  por año, respectivamente, se encontraron en los alrededores de la mina de Albala<sup>18</sup>. La estimación de dosis efectivas medias anuales produjo valores en el rango comprendido entre  $3,2$  y  $5,1 \text{ mSv}$  al año, lo que representa entre 1,2 y 2 veces el valor promedio nacional. Un 14% de las viviendas con concentraciones de radón superiores a  $400 \text{ Bq m}^{-3}$  pertenecía al entorno de la mina de Albala.

#### Sierra de Guadarrama

El área de la sierra de Guadarrama, en el norte de la provincial de Madrid, fue objeto de otra campaña de medida regional. En el primer estudio nacional se observó un elevado porcentaje de casas con niveles de radón en interior superiores a  $200$  y  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ , que son los niveles de acción recomendados por la Unión Europea para viviendas de nueva construcción y ya construidas, respectivamente<sup>19</sup>. Dado el predominio de suelos graníticos en esta zona y el considerable aumento de la población (la población desde el año 1990 hasta 2000 aumentó de 500.000 a 1.500.000 habitantes), se inició en 2002 un estudio de radón que todavía sigue en marcha.

Las medidas realizadas hasta ahora muestran que un 14% de las viviendas tienen concentraciones de radón por encima de  $400 \text{ Bq m}^{-3}$  y un 30%, superiores a  $200 \text{ Bq m}^{-3}$ . La media geométrica de la concentración de radón en la sierra de Guadarrama es de  $180 \text{ Bq m}^{-3}$  lo que supone un valor cuatro veces superior al promedio nacional.

## Villar de la Yegua

Quizá la zona de alto nivel de radiación más importante de España se encuentra entorno al pueblo de Villar de la Yegua, en la provincial de Salamanca. En este pueblo se encontró la mayor concentración de radón, 25,000 Bq m<sup>-3</sup> en el interior de una vivienda, y la evaluación de la dosis de radiación recibida por fuentes naturales ha arrojado valores superiores a los 40 mSv al año. Las sucesivas series de medidas realizadas desde 1988 hasta ahora confirman a Villar de la Yegua como zona de alto nivel de radón<sup>20</sup>. La media geométrica de la concentración de este gas en interiores es de 818 Bq m<sup>-3</sup>, 18,2 veces mayor que el promedio nacional. Por otro lado, los porcentajes de casas con concentraciones por encima 400 y 1000 Bq m<sup>-3</sup> son del 75% y 25%, respectivamente.

Lo anteriormente expuesto indica claramente la necesidad de realizar estudios epidemiológicos acerca de los efectos que sobre la salud de los habitantes de esta zona tiene la exposición a las fuentes naturales de radiación.

## DISCUSIÓN

Los resultados de las campañas de medida presentados constituyen una base de datos de gran utilidad para el desarrollo de estudios específicos de aquellas zonas en las que se han encontrado los niveles de radón más elevados. Del desarrollo de estos proyectos puede obtenerse un conocimiento más detallado de las principales fuentes de radón en las viviendas, que permite no solo diagnosticar con precisión la necesidad de aplicación de medidas de remedio, sino también decidir cuál de las posibles actuaciones es la más adecuada en cada caso.

Recientemente, el CSN ha establecido por vez primera criterios acerca de los niveles de acción de radón en viviendas y edificios de larga permanencia del público. En edificios ya construidos, el nivel de intervención para iniciar medidas de remedio es el recomendado por la Unión Europea de 400 Bq m<sup>-3</sup> de concentración media anual de radón. Se contempla también la posibilidad de iniciar medidas de remedio sencillas y económicas, a partir de concentraciones medias anuales de 200 Bq m<sup>-3</sup>. Con respecto a los edificios de nueva construcción, en los que es más sencilla y efectiva la introducción de medidas de remedio, se aplicará como nivel de intervención el valor que se incorpore en el Código Técnico de la Edificación. Una vez incorporado dicho valor, este será aplicable a todos los edificios, sean viviendas o lugares de trabajo. En cualquier caso, el tema del radón ya no es solo un aspecto más de la investigación, sino que día a día se ha convertido en un problema de salud pública, para el que en un futuro próximo habrá que tomar las medidas oportunas.

## REFERENCIAS

1. Quindós Poncela LS. Radón "un gas radioactivo de origen natural en su casa". Madrid: CSN - Universidad de Cantabria;1995.
2. Lubin JH, Boice JD, Edling C, Hornung RW, Howe G, Kunz E. Radon and lung cancer risk: a joint analysis of 11 underground miner studies. En: Public Health Services and National Institute of Health, eds. NIH;2007.
3. Darby S. Residential radon, smoking and lung cancer. *Radiat Res* 2005;163(6):696.
4. Brand KP, Zielinski JM, Krewski D. Residential radon in Canada: an uncertainty analysis of population and individual lung cancer risk. *Risk Anal* 2005; 25(2):253-69.
5. Zielinski JM, Carr Z, Krewski D, Repaholi M. World Health Organization s International Radon Project. *J Toxicol Environ Health A* 2006; 69(7):759-69.
6. Field RW, Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Kloz JB, Letourneau EG, Lynch CF, Lyon JL, Sandler DP, Schoenberg JB, Steck DJ, Stolwijk JA, Weinberg C, Wilcox HB. An overview of the North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J Toxicol Environ A* 2006;69(7):599-631.
7. Darby S, Hill D, Aivinen A, Barros-Dios JM, Bausson H. Residential radon and lung cancer-detailes results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scan J Work, Environ and Health* 2006;32(Suppl 1):1-84.
8. Barros-Dios JM, Barreiro MA, Ruano-Ravina A, Figueiras A. Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study. *Am J Epidemiol* 2002; 156:548-55.
9. Samet JM. Residential radon and lung cancer: end of the story? *J Toxicol Environ A* 2006; 69(7):527-31.
10. WHO. Handbook on indoor radon. A public health perspective;2010.
11. ICRP (International Commission on Radiological Protection). Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. ICRP Publication 50, annals of the ICRP 17(1), Oxford: Pergamon Press;1987.
12. ICRP. Statement on Radon. November;2009.
13. Quindós LS, Fernández PL, Soto J. National survey on indoor radon in Spain, *Env Int* 1991;17:449-53.
14. Suárez E, Fernández JA. Project MARNA: Natural Gamma Radiation Map. *Revista de la Sociedad Nuclear Española* 1997:58-65.
15. Quindós LS, et al. Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Env Int* 2004;29:1091-6.
16. Miles J, Howarth C. Memorandum: Validation scheme for laboratories making measurements of radon in dwellings: 2000 revision. National Radiological Protection Board. NRPB-M1140. Chilton, Didcot, Oxfordshire OX11 0RQ; 2000.
17. Quindós LS, et al. Natural radiation exposure in the vicinity of Spanish nuclear power stations, *Health Phys* 2003;85(5):594-8.
18. Quindós LS, et al., Population dose in the vicinity of old Spanish uranium mines, *Sci of the Tot Env* 2004;329:283-8.
19. European Union. Council Directive 90/143/EC of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. *Official Journal of the European Communities*; 1990.
20. International Commission on Radiological Protection. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Oxford: Pergamon Press; 1994.