

Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España

Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España

Trabajo encargado a la Universidad de Santiago de Compostela y realizado en colaboración con el Ministerio de Sanidad y el Consejo de Seguridad Nuclear.

Autores

Mónica Pérez Ríos^{1,2,3}

Marta García Talavera⁴

Montserrat García Gómez⁵

Santiago González Muñoz⁵

Julia Rey-Brandariz^{1,3}

Juan Miguel Barros Dios^{1,2,3}

Alberto Ruano Raviña^{1,2,3}

- (1) Área de Medicina Preventiva y Salud Pública. Universidad de Santiago de Compostela
- (2) CIBER de Epidemiología y Salud Pública, CIBERESP, España
- (3) Instituto de Investigaciones Sanitarias de Santiago de Compostela, IDIS. Santiago de Compostela, España
- (4) Subdirección de Protección Radiológica Ambiental. Consejo de Seguridad Nuclear
- (5) Subdirección General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral. Dirección General de Salud Pública. Ministerio de Sanidad.

Edita y distribuye:

© MINISTERIO DE SANIDAD
CENTRO DE PUBLICACIONES
PASEO DEL PRADO, 18-20. 28014 Madrid

NIPO: 133-21-049-6

ESTILO ESTUGRAF IMPRESORES, S.L. Pol. Ind. Los Huertecillos, Calle Pino, 5 -
28350 CIEMPOZUELOS (Madrid)

<https://cpage.mpr.gob.es>

Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España



GOBIERNO MINISTERIO
DE ESPAÑA DE SANIDAD

Índice

1.	Introducción	7
1.1.	Epidemiología del cáncer de pulmón	7
1.2.	Distribución de la incidencia y mortalidad por cáncer de pulmón en España	8
1.3.	Factores de riesgo del cáncer de pulmón	8
1.4.	Radón residencial	9
1.4.1.	Medición de radón	10
1.4.2.	Radón y cáncer de pulmón	10
1.4.3.	Estudios en España	11
1.4.4.	Fumadores vs. nunca fumadores	15
1.4.5.	Distribución de radón en España	15
1.5.	Mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición a radón residencial	18
1.6.	Mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición a radón residencial en España	18
2.	Objetivos	21
3.	Metodología	23
3.1.	Información utilizada	23
3.2.	Método de cálculo	25
4.	Resultados	27
4.1.	Mortalidad por cáncer de pulmón en España	27
4.2.	Prevalencia de exposición a radón por Comunidades Autónomas	28
4.3.	Mortalidad atribuible a radón residencial en España y por Comunidades Autónomas	29
5.	Discusión	37
5.1.	Comparación con otros países y otros estudios	38
5.2.	Efecto del consumo de tabaco en la mortalidad atribuible a radón	41
5.3.	Aspectos metodológicos. Ventajas y limitaciones	41
6.	Conclusiones	45
7.	Implicaciones	47
8.	Bibliografía	49

9. ANEXO I	53
9.1. Obtención de la prevalencia de exposición a radón residencial por Comunidad Autónoma	53
9.2. Cálculo del número de personas expuestas según los umbrales de exposición a radón, considerando la altura de la vivienda en pisos	55

1. Introducción

1.1. Epidemiología del cáncer de pulmón

El cáncer de pulmón es un grave problema de salud pública en la actualidad. Presenta una elevada incidencia y mortalidad en los países desarrollados y España no es una excepción. Según datos de la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud estimados para 2018, el cáncer de pulmón es hoy en día, a nivel mundial, el cáncer de mayor incidencia en varones, con una tasa estandarizada a la población mundial de 31,5 casos por 100.000 habitantes. En mujeres, esta cifra es de 14,6 casos por 100.000 habitantes y ocupa la tercera posición tras el cáncer de mama y el cáncer colorrectal (1). En cuanto a mortalidad, el cáncer de pulmón es el más letal en varones, con una tasa de 27,1 fallecimientos por 100.000 habitantes y en mujeres es el segundo más letal con una tasa de 11,2 muertes por 100.000 habitantes, ambas ajustadas a la población mundial (1). La escasa diferencia entre incidencia y mortalidad refleja la baja supervivencia del cáncer de pulmón.

En España no hay datos poblacionales de incidencia de cáncer para todo el país, y los datos existentes provienen de la extrapolación de registros poblacionales que no llegan a cubrir el 30% de la población española. Los datos de incidencia de las proyecciones elaboradas por la Red de Registros de Cáncer en España (REDECAN), estiman 21.847 casos de cáncer de pulmón en varones para 2020 (tasas estandarizadas a la población mundial de 43,8 casos por 100.000 habitantes) y 7.791 casos en mujeres (tasas estandarizadas a la población mundial de 15,4 casos por 100.000 habitantes). En hombres y en mujeres el cáncer de pulmón es el tercer tumor en incidencia (2).

Según el Instituto Nacional de Estadística, el cáncer pulmonar fue en España la primera causa de muerte por cáncer en 2018, con 22.133 fallecidos. En varones, es la primera causa de muerte por cáncer y, en las mujeres, es la segunda tras el cáncer de mama (3). Debe destacarse que desde el año 2003 la mortalidad por cáncer de pulmón en mujeres españolas ha aumentado en un 114% y la de los varones en un 4% según los datos publicados anualmente por el Instituto Nacional de Estadística (4). Los datos anteriores indican que la actuación de las autoridades sanitarias frente al cáncer de pulmón debe ser prioritaria.

La supervivencia de cáncer de pulmón es muy baja y apenas ha mejorado en las últimas décadas a pesar de que se están introduciendo mejoras en el tratamiento del cáncer avanzado. Más de la mitad de los casos son

diagnosticados en estadio IV, cuando existe metástasis (5) y es uno de los tumores más letales. La supervivencia a los cinco años del diagnóstico se sitúa en Estados Unidos en un 19,4% (5). El estudio CONCORD-3, con casos diagnosticados entre 2000 y 2014 indica una supervivencia en España, a los cinco años del diagnóstico, del 13,5%, con valores similares al Reino Unido, pero por debajo de la supervivencia de Suiza o Suecia (con supervivencias en torno al 20% a los cinco años) (6).

1.2. Distribución de la incidencia y mortalidad por cáncer de pulmón en España

Según el observatorio del cáncer de la Asociación Española Contra el Cáncer (AECC), existe una importante variabilidad en la incidencia de cáncer de pulmón en nuestro país. De acuerdo con estimaciones para 2018, las provincias con mayor tasa de incidencia bruta en varones son Zamora, Lugo y Ourense, con valores entre 128 y 135 casos por 100.000 habitantes. La provincia con menor tasa de incidencia es Almería, con 72 casos por 100.000 habitantes. En mujeres, las provincias con mayor tasa de incidencia son las de León, Zamora, Ourense, Lugo y Asturias, con tasas que oscilan entre 36 y 38 casos por 100.000 habitantes. Globalmente, las provincias con menores tasas de incidencia son Murcia y Almería, con 25 casos por 100.000 habitantes (7). Los datos anteriores ponen de manifiesto en primer lugar la gran variabilidad en las tasas de incidencia interprovinciales y en segundo lugar las importantes diferencias en las tasas entre hombres y mujeres, debidas fundamentalmente al mayor consumo de tabaco entre los varones comparado con el de las mujeres.

1.3. Factores de riesgo del cáncer de pulmón

El cáncer de pulmón es una enfermedad multifactorial. Sin embargo, su principal factor de riesgo es el consumo de tabaco. A este consumo se le atribuyen entre el 75 y el 90% de todas las muertes por cáncer de pulmón (8), aunque hay algunas variaciones entre países. En general, la mortalidad por cáncer de pulmón atribuible al tabaco es mayor en varones que en mujeres, pero se ha estudiado poco cómo contribuyen otros factores de riesgo del cáncer de pulmón en esta mortalidad. La exposición a radón residencial es el principal factor de riesgo del cáncer de pulmón en nunca fumadores y el segundo factor de riesgo en importancia en personas que

han fumado en alguna ocasión, tal y como afirman la Organización Mundial de la Salud (OMS) (9) y la Agencia de Protección Ambiental Norteamericana (EPA) (10).

Otros factores de riesgo del cáncer de pulmón son la exposición a humo ambiental de tabaco, la ocupación, las actividades de tiempo libre de tipo bricolaje, pintura o modelismo, las enfermedades respiratorias previas, de naturaleza infecciosa o no infecciosa, o la dieta (11).

1.4. Radón residencial

El radón es un gas incoloro, inodoro e insípido que procede de varios elementos que se encuentran de forma natural en las rocas de la corteza terrestre (Uranio-238, Uranio-235 y Torio-232). El Radón-222 procede de la serie de desintegración radioactiva del Uranio-238 y otros isótopos menos comunes proceden de las series radiactivas que tienen como elemento de cabecera el Uranio-235 (Radón-219 o actinón) o el Torio-232 (Radón-220 o torón). Desde un punto de vista epidemiológico y de salud pública, el Radón-222 es el más relevante, pues comprende un 80% de todo el radón en la naturaleza. El radón procede directamente de la desintegración del Radio-226 y decae en otros elementos, que a su vez se transforman con el paso del tiempo emitiendo energía en forma de distintos tipos de radiación ionizante hasta que finalmente se transforman en un elemento estable. En el caso del Radón-222 este elemento estable es el Plomo-206. El Radón-222 tiene una vida media de 3,8 días y emite radiación alfa en su descomposición a Polonio-218. Esta vida media hace que en sí mismo el Radón-222 no sea peligroso para la salud, pues la fracción que se transforma (y emite partículas alfa) en el árbol bronquial es mínima. Los elementos verdaderamente dañinos son los denominados descendientes de vida media corta del Radón-222; el Polonio-218 y el Polonio-214, que tienen una vida media mucho menor y que al ser inhalados se depositan en el tracto respiratorio y emiten radiación alfa en cantidades comparativamente mucho más elevadas que el Radón-222 (12). Debe destacarse que la radiación alfa es mucho más energética que las radiaciones beta y gamma y que, al ser menos penetrante, libera toda su energía en un recorrido mucho menor. El impacto continuado de radiación alfa en las células del epitelio pulmonar puede producir cáncer de pulmón. A partir de aquí, este documento se referirá genéricamente a radón cuando se hable de Radón-222.

Son dos los factores que influirán de forma más relevante en la concentración de radón en una vivienda: el contenido en Radio-226 de las rocas del subsuelo y el grado de aislamiento de esa vivienda de ese subsuelo (9). El radón penetra en los edificios por difusión o advección, desde el subsuelo (don-

de se encuentra en concentraciones típicamente de varios miles de Bq/m³). En general, las plantas bajas, sótanos o primeros pisos tienen concentraciones de radón más elevadas que las viviendas situadas en pisos superiores. Esto no significa que en alturas superiores no se puedan encontrar concentraciones de radón más elevadas que en plantas inferiores debido a la dinámica particular que puede tener este gas en ocasiones. Otras fuentes de radón en el aire interior de un edificio, aunque de menor relevancia, son los materiales de construcción y el radón que pueda venir disuelto en el agua corriente.

1.4.1. Medición de radón

La concentración de gas radón en aire se puede medir de diversas formas, pero la más frecuente y recomendada por las agencias internacionales y también por el Consejo de Seguridad Nuclear, es la medición integrada o de trazas con período largo de exposición. Ésta consiste en medir la concentración de radón colocando uno o varios detectores en el domicilio durante al menos tres meses, para posteriormente calcular el promedio anual de concentración de radón (9,13,14). Los detectores deben estar expuestos al menos 3 meses, tratando de evitar el período estival, o bien un año completo, en sótanos o lugares subterráneos, según las recomendaciones del Consejo de Seguridad Nuclear (Guía de Seguridad GS 11.4). En la actualidad, los laboratorios que midan radón en aire en España deben estar acreditados por ENAC (Entidad Nacional de Acreditación) o por otra agencia equivalente europea.

1.4.2. Radón y cáncer de pulmón

El radón ha sido declarado carcinógeno humano por la IARC en 1988 y por la Agencia de Protección Ambiental Norteamericana (EPA por sus siglas en inglés) en 1987 (15,16). Los primeros estudios sobre el efecto del radón sobre la salud se hicieron en cohortes de mineros de diferentes países. En general, en estos estudios se observó que aquellos mineros expuestos a concentraciones de radón más elevadas tenían más riesgo de cáncer de pulmón y que el radón sólo aumentaba el riesgo de cáncer de pulmón y no de otras patologías (17-20).

En la década de los 90 del pasado siglo se hicieron más estudios en población general sobre radón y cáncer de pulmón, fundamentalmente en Norteamérica y Europa. En estos estudios, que tenían una metodología de

casos y controles, se medía la concentración de radón en el domicilio de los casos de cáncer de pulmón y se comparaba con la concentración de radón en el domicilio de los controles. A partir de sus resultados se observó que la concentración de radón en los domicilios de los casos era sistemáticamente más elevada que la obtenida en los domicilios de los controles. Destacan las investigaciones realizadas en Iowa (USA) (21), en Suecia (22), en Alemania (23) y en Finlandia (24). Estos estudios culminaron con la publicación en el año 2005 de un *pooling study* (25) en el que se incluyeron los resultados individuales de los participantes de 13 estudios de casos y controles realizados en Europa, con unos 21.000 sujetos, 7.000 casos y 14.000 controles. Este estudio, que se publicó en el *British Medical Journal*, es el más citado sobre radón residencial. En él se concluyó que el riesgo de cáncer de pulmón debido a la exposición a radón aumenta de manera lineal y estadísticamente significativa en un 16% por cada 100 Bq/m³ de concentración de radón. Ese mismo año se publican los resultados de otro *pooling study* pero que incluye estudios realizados en Estados Unidos, pero de menor tamaño muestral que el pooling europeo. Los resultados son muy parecidos a los del estudio europeo, con un aumento lineal y estadísticamente significativo de un 11% por cada 100 Bq/m³ de aumento en la concentración de radón (26). Los resultados de estos estudios impulsaron a la OMS a iniciar el International Radon Project que, tras el trabajo de un grupo de expertos y varias reuniones, culminó en la publicación del informe “WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective” en el año 2009 (9). En este manual se abordan múltiples aspectos relacionados con la exposición a radón, desde métodos de medida, comunicación de riesgos y soluciones constructivas. Lo más destacable, sin embargo, es que establece, apoyándose en la publicación de Darby et al en 2005 (25), que el nivel ideal de concentración de radón en los domicilios no debería sobrepasar los 100 Bq/m³ y que en ningún caso debería sobrepasar los 300 Bq/m³. Estos 300 Bq/m³ serán los que emplee la Directiva Europea frente a radiaciones ionizantes que se publica en 2014 (27) y que establece que dicha concentración no debe sobrepasarse, ni en viviendas ni en puestos de trabajo, en ninguno de los estados de la Unión dejando libertad a que cada país proponga niveles límite inferiores, como ya han hecho muchos de ellos.

1.4.3. Estudios en España

En España hay numerosos estudios realizados sobre radón y cáncer de pulmón. Todos ellos, excepto uno, han sido realizados por la Universidad de Santiago de Compostela, en donde se sitúa el Laboratorio de Radón de Galicia

(www.radon.gal). Los resultados de los estudios realizados en España se resumen en la Tabla 1. El primero de ellos se realizó entre 1992 y 1994 en el área sanitaria de Santiago de Compostela (A Coruña) y consistió en un estudio de casos y controles de base poblacional que incluyó 404 participantes. Esta investigación, publicada en el año 2002, concluyó que el radón podía producir cáncer de pulmón a concentraciones por debajo de los 148 Bq/m³ y que existía una fuerte interacción con el consumo de tabaco (28). En el año 2007, se publica un estudio de casos y controles, que incluía unos 230 participantes, realizado en Cantabria. En este estudio no se encuentra relación entre el radón y el cáncer de pulmón, pero debe destacarse que sólo 5 casos y 7 controles tuvieron exposiciones que superaban los 100 Bq/m³, ya que se realizó en una zona de baja exposición a radón (29). El tercer estudio tuvo un diseño de casos y controles de base hospitalaria y se ejecutó entre 2004 y 2008 en las áreas sanitarias de Santiago de Compostela y Ourense e incluyó 990 sujetos, 450 casos y 550 controles. Este estudio, de nuevo, observa que el radón puede producir cáncer de pulmón a concentraciones más bajas de las recomendadas por los organismos internacionales y que existe una interacción submultiplicativa entre la exposición a radón y el consumo de tabaco. Frente a nunca fumadores expuestos a menos de 50 Bq/m³ en su domicilio, las personas grandes fumadoras con concentración de radón superior a 148 Bq/m³ presentaban un riesgo de cáncer de pulmón 73 veces más elevado (30). En el año 2011 da comienzo el estudio LCRINS (Lung Cancer Risk in Never Smokers), con el objetivo de analizar la asociación entre radón y cáncer de pulmón en personas nunca fumadoras. Este estudio reclutó casos de cáncer de pulmón procedentes de 11 hospitales españoles de 4 Comunidades Autónomas y tuvo un diseño de casos y controles. El reclutamiento finalizó en 2019. Los resultados preliminares se publicaron en 2014 (31) y los definitivos en 2019 (que incluyen también sujetos nunca fumadores de otros estudios previos). Este último estudio es una de las investigaciones publicadas que incluye mayor número de sujetos nunca fumadores a los que se les ha medido radón residencial (523 casos y 892 controles). Los resultados del estudio LCRINS muestran asociación significativa entre radón y cáncer de pulmón y debe destacarse que, en el estudio publicado en 2019, se observa además que dicha asociación es lineal (32).

Finalmente, en julio de 2020 se publica uno de los estudios más importantes, combinando los datos de todas las investigaciones realizadas por la Universidad de Santiago de Compostela. En este estudio, en el que se incluyen más de 3.700 participantes (1.842 casos y 1.862 controles), se observa un riesgo estadísticamente significativo (OR 2,06, IC95% 1,61-2,64) a partir de los 200 Bq/m³ frente a sujetos expuestos a menos de 50 Bq/m³, y una modificación de efecto importante debida al consumo de tabaco (33). Los resultados de estos estudios pueden verse resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Estudios sobre radón y cáncer de pulmón realizados en España				
Autores, año y revista	Financiación	Tamaño muestral	Período de reclutamiento	Resultado
Barros-Dios JM, Barreiro MA, Ruano-Ravina A, et al. 2002. American Journal of Epidemiology.	Fondo de investigaciones sanitarias (FIS 92/0176) y Xunta de Galicia XUGA 91010	404 sujetos, 163 casos y 241 controles	1992 a 1994	Concentración de radón y OR (IC95%) 0 a 37 Bq/m ³ 1 38 a 55 Bq/m ³ 2,73 (1,12-5,48) 56 a 147 Bq/m ³ 2,48 (1,29-6,79) Más de 147 Bq/m ³ 2,96 (1,29-6,79)
Llorca J, Bringas-Bollada M, Quindós-Poncela LS. 2007. Archivos de Bronconeumología.	Fundación Marqués de Valdecilla	258 sujetos: 86 casos y 172 controles	2002 a 2003	Concentración de radón y OR (IC95%) 0 a 30 Bq/m ³ 1 Más de 30 Bq/m ³ 0,95 (0,33-2,65)
Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A, Pérez-Ríos M, et al. 2012. Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention.	Instituto de Salud Carlos III PI031248.	990 sujetos: 442 casos y 548 controles	2004 a 2008	Concentración de radón y OR (IC95%) Menos de 50 Bq/m ³ 1 De 51 a 100 Bq/m ³ 1,87 (1,21-2,88) De 101 a 147 Bq/m ³ 2,25 (1,32-3,84) Más de 147 Bq/m ³ 2,21 (1,33-3,69)
Lorenzo González M, Ruano-Ravina A, Torres-Durán et al. 2020. Environmental Research.	Xunta de Galicia 10CSA208057PR Instituto de Salud Carlos III PI03/1248. Instituto de Salud Carlos III FIS 92/0176 y Xunta de Galicia XUGA 91010. Xunta de Galicia. XUGA 208001B93. Instituto de Salud Carlos III PI13/01765. Instituto de Salud Carlos III PI15/01211.	3.704 sujetos 1,842 casos y 1.862 controles	2002 a 2019	Concentración de radón y OR (IC95%) Menos de 50 Bq/m ³ 1 De 51 a 100 Bq/m ³ 1,61 (1,25-2,08) De 101 a 147 Bq/m ³ 1,64 (1,25-2,15) De 148 a 199 Bq/m ³ 1,81 (1,34-2,45) Más de 199 Bq/m ³ 2,06 (1,61-2,64)

Tabla 1. Estudios sobre radón y cáncer de pulmón realizados en España (Continuación)				
Autores, año y revista	Financiación	Tamaño muestral	Período de reclutamiento	Resultado
Estudios realizados en nunca fumadores				
Torres-Durán M, Ruano-Ravina A, Parente-Lamelas I, et al. 2014. European Respiratory Journal.	Xunta de Galicia: 10CSA208057PR	521 sujetos: 192 casos y 329 controles	2011 a 2014	Concentración de radón y OR (IC95%) Menos de 100 Bq/m ³ 1 De 101 a 147 Bq/m ³ 0,80 (0,43-1,50) De 148 a 199 Bq/m ³ 1,16 (0,64-2,11) 200 o más Bq/m ³ 2,42 (1,45-4,06)
Lorenzo-González M, Ruano-Ravina A, Torres-Durán M, et al. 2019. Environmental Research.	Xunta de Galicia 10CSA208057PR Instituto de Salud Carlos III PI03/1248. Instituto de Salud Carlos III FIS 92/0176 y Xunta de Galicia XUGA 91010. Xunta de Galicia. XUGA 208001B93. Instituto de Salud Carlos III PI13/01765. Instituto de Salud Carlos III PI15/01211.	1.415 sujetos: 523 casos 892 controles	1992 a 2018	Concentración de radón y OR (IC95%) Menos de 100 Bq/m ³ 1 De 101 a 147 Bq/m ³ 1,14 (0,80-1,64) De 148 a 199 Bq/m ³ 1,25 (0,85-1,85) 200 o más Bq/m ³ 1,73 (1,27-2,35)

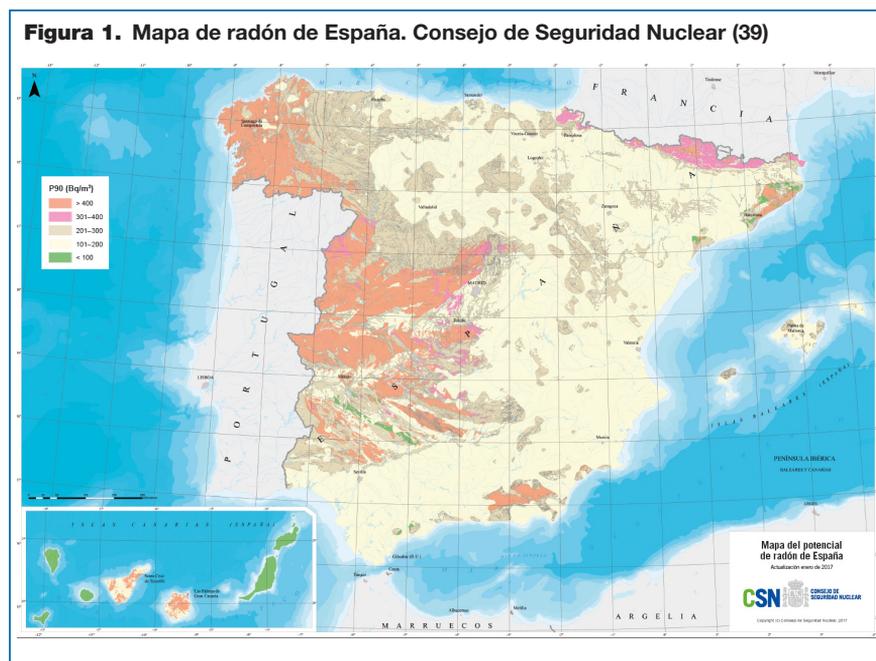
1.4.4. Fumadores vs. nunca fumadores

La exposición a radón residencial aumenta el riesgo de cáncer de pulmón tanto en fumadores como en nunca fumadores. Así lo indican numerosos estudios realizados en los que se estiman riesgos más elevados de cáncer de pulmón en ambos subgrupos poblacionales (25,34). No obstante, varias investigaciones han indicado que existe interacción entre la exposición a radón residencial y el consumo de tabaco (28,30). Esto es lógico ya que nos hallamos ante dos carcinógenos reconocidos que actúan probablemente por vías moleculares diferentes y que pueden potenciar su efecto perjudicial si están presentes conjuntamente. Estudios realizados en España han indicado que aquellas personas grandes fumadoras con elevada exposición a radón podrían tener un riesgo de cáncer de pulmón 29 veces superior (o incluso más) al de aquellas nunca fumadoras expuestas a concentraciones de radón por debajo de 50 Bq/m^3 (30, 33). Sin embargo, el estudio *pooling* europeo de Darby y cols no encontró diferencias apreciables en el riesgo de cáncer de pulmón de fumadores frente a nunca fumadores (25). En cualquier caso, es necesario que los estudios que analicen el efecto del radón frente al cáncer de pulmón tengan en cuenta el consumo de tabaco de la población para poder estimar adecuadamente la carga de cáncer de pulmón debida al radón residencial en los nunca fumadores.

1.4.5. Distribución de radón en España

La concentración de radón en España es muy heterogénea, como es de esperar en un país de tamaño relativamente grande que tiene una geología muy diversa. Los primeros datos sobre exposición a radón en España fueron obtenidos por el Laboratorio de Radiación Natural de la Universidad de Cantabria en los años 90 (35). Posteriormente, el Consejo de Seguridad Nuclear patrocinó diversas campañas de medición de radón en viviendas para mejorar la caracterización de la exposición en la población, publicando diversos informes (36,37). En la última campaña de mediciones, que se realizó entre 2009 y 2012, se dividió el territorio en cuadrículas para la obtención de mediciones en cada una de las cuadrículas. No en todas las cuadrículas fue posible obtener una medición, y éstas tenían una superficie de $10 \times 10 \text{ km}$. En estas campañas participaron varias Universidades españolas (Universidad de Cantabria, Universidad de Santiago de Compostela-Laboratorio de Radón de Galicia, Universidad Autónoma de Barcelona, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Universidad de Valencia, Universidad de La Laguna y Universidad de Extremadura) que realizaron miles de mediciones en viviendas de provincias

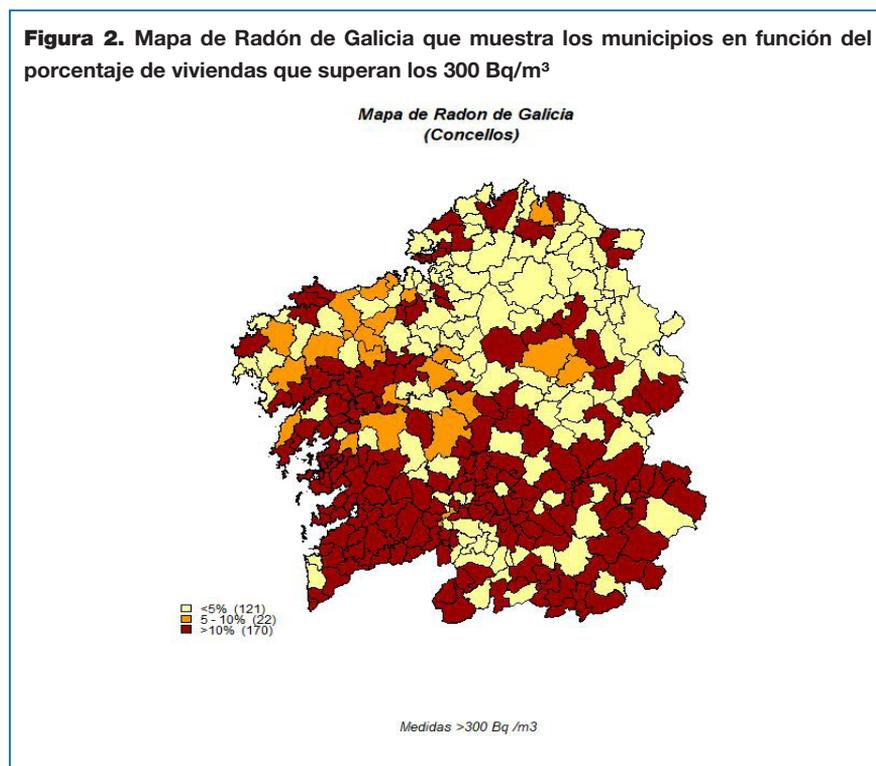
españolas para tener una estimación adecuada de la concentración de radón interior. En el año 2017, y para dar cumplimiento a los datos necesarios para la implantación de la Directiva Europea sobre protección de radiaciones ionizantes se publica el Mapa de potencial de radón de España, que integra en un único documento las 12.000 mediciones realizadas (38), junto con información del MARN (mapa de radiación gamma natural de España) y litoestratigráfica. Este Mapa de potencial de radón se puede observar en la figura 1. Según el Consejo de Seguridad Nuclear, las zonas de actuación prioritaria (definidas como aquellas en las que más de un 10% de los edificios presentan concentraciones de radón superiores a 300 Bq/m³ en planta baja) comprenderían el 17% del territorio nacional. Por Comunidades Autónomas (CCAA) las más afectadas serían, por este orden: Galicia (70%), Extremadura (47%), Comunidad de Madrid (36%) y Castilla y León y Canarias (19% en ambos casos). Puede observarse que la concentración de radón más elevada corresponde al Noroeste de España, Norte y Centro de Extremadura, Sur y Oeste de Castilla y León y zona Norte de la Comunidad de Madrid. Zonas de los Pirineos y de la Costa Brava también presentan concentraciones elevadas. El Mapa de radón de España incluye exclusivamente viviendas situadas en planta baja y primera planta en las que se ha medido radón residencial, representando por tanto geográficamente aquellas zonas en función de la concentración de radón que emana del subsuelo.



En Galicia se dispone de otro mapa de exposición a radón, también con mediciones en viviendas. El Mapa de Radón de Galicia (www.radon.gal) está realizado por el Laboratorio de Radón de Galicia, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Santiago de Compostela, e incluye en la actualidad 4.330 mediciones de radón residencial. A diferencia del Mapa de Radón de España, el Mapa de Radón de Galicia es representativo a nivel poblacional por lo que: 1) aquellos municipios con más población disponen de más mediciones y, 2) se hacen mediciones en altura, para representar la exposición a radón de las personas que residan en alturas superiores a un primer piso. Parte de las mediciones del Mapa de Radón de Galicia en bajos y primeros pisos forman parte del Mapa de Radón de España y las mediciones de ambos mapas se han realizado empleando la misma técnica de medición. Según el Mapa de Radón de Galicia, el 15,6% de las viviendas gallegas superarían los 300 Bq/m³, siendo esta cifra del 20 y 23% en las provincias de Pontevedra y Ourense, respectivamente.

En la figura 2 se puede ver la versión actual del Mapa de Radón de Galicia, donde figuran en color rojo aquellos municipios en los que un 10% de las viviendas superan los 300 Bq/m³.

Figura 2. Mapa de Radón de Galicia que muestra los municipios en función del porcentaje de viviendas que superan los 300 Bq/m³



1.5. Mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición a radón residencial

Dada la elevada letalidad del cáncer pulmonar, la atribución de mortalidad es muy similar a la atribución de incidencia, sobre todo en aquellos países, como España, donde no existen registros de cáncer a nivel nacional. A pesar de esto, incluso en los países que disponen de registro de cáncer, se ha estimado mortalidad atribuible a radón residencial en lugar de incidencia atribuible. Una revisión reciente sobre mortalidad atribuible a radón por cáncer de pulmón en 66 países indica que el riesgo atribuible poblacional tenía un rango del 4,2% para Japón hasta un 29,3% para Armenia, con una mediana para los países analizados del 16,5% (40). Los datos difieren en función de si los estudios se realizan en zonas de elevada exposición a radón o en zonas de baja exposición. Esta investigación estimó que un 3,8% de las muertes por cáncer de pulmón en España se debían a la exposición a radón, y que España ocupaba una posición intermedia en cuanto a exposición poblacional. Sin embargo, las fuentes de información utilizadas no estaban actualizadas.

El único estudio realizado sobre mortalidad atribuible a radón en España se realizó en Galicia y se publicó en el año 2010, con estimaciones de cáncer de pulmón obtenidas en el año 2001 (41). Los datos de riesgo de cáncer pulmonar fueron obtenidos de la misma zona, del estudio publicado por Barros-Dios et al (28). Los resultados indicaron que la mortalidad atribuible a radón era mayor (en números absolutos) cuanto más bajo era el punto de corte de exposición a radón y que el mayor número de muertes atribuidas ocurría cuando se combinan el consumo de tabaco y la exposición a radón. No obstante, los datos de riesgo utilizados procedían de un estudio con un bajo tamaño muestral, con solo 404 participantes, aunque contaba con la ventaja de emplear datos detallados de la exposición a radón y consumo de tabaco de todos los participantes incluidos.

1.6. Mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición a radón residencial en España

Como se ha puesto de manifiesto, la exposición a radón residencial es en fumadores el segundo factor de riesgo de cáncer de pulmón tras el consumo de tabaco. Es por esta razón por lo que es necesario que las administraciones

dispongan de indicadores acerca de la importancia que supone la exposición a este carcinógeno humano en el contexto nacional, para planificar y establecer acciones de salud pública encaminadas a reducir su exposición y la morbilidad que causa. Por otra parte, la directiva europea para la protección contra la exposición a las radiaciones ionizantes establece en su artículo 103 que los estados miembros de la Unión deben diseñar un plan nacional de radón (27). En el anexo XVIII, punto 13, se establece específicamente que el plan nacional de acción debe fijar “Objetivos a largo plazo para reducir el riesgo de cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón (para fumadores y no fumadores)”. Este informe da por tanto cumplimiento a una parte de este plan nacional de acción frente al radón.

En este informe se considerará el impacto de la exposición a radón sobre el cáncer de pulmón por Comunidades Autónomas (CC.AA.) y diferenciando la carga de mortalidad en hombres y mujeres por separado. También tendrá en cuenta en las estimaciones que se obtengan el consumo de tabaco, debido a su importancia como factor de riesgo del cáncer de pulmón, tal y como se ha comentado en apartados anteriores.

Un último punto es que el método que se presenta en los resultados emplea, que sepamos por primera vez, una corrección de la exposición a radón por la altura de la vivienda. Esto implica que los datos de exposición poblacional, obtenidos en las distintas CC.AA., han sido corregidos en función de los datos disponibles de la distribución de las viviendas en altura, lo que atenúa y hace mucho más preciso el cálculo del impacto de la exposición a radón respecto a los resultados obtenidos en estudios anteriores.

2. Objetivos

Objetivo principal

Estimar la mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición a radón residencial en España.

Objetivos secundarios

Estimar la mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición a radón residencial en diferentes Comunidades Autónomas y por sexo.

3. Metodología

Para estimar la mortalidad por cáncer de pulmón atribuida a la exposición a radón residencial se ha aplicado un método convencional de estimación dependiente de prevalencias de exposición. Debe destacarse que no hay un método único o recomendado, pero que el método utilizado es el que se ha aplicado más frecuentemente para cuantificar el impacto del radón en la mortalidad atribuible.

3.1. Información utilizada

Mortalidad observada

Los datos proceden de la estadística de defunciones por causa de muerte del Instituto Nacional de Estadística (INE). Se usaron los microdatos del año 2017, y las defunciones por cáncer de tráquea, pulmón, y bronquios (rúbricas C33-34 en la CIE-10) en población de 35 años y más que se agruparon por Comunidad Autónoma (CA), sexo y grupo de edad.

Prevalencias de exposición a radón

Las prevalencias de exposición a radón, por Comunidad Autónoma, en tres categorías ($0-100 \text{ Bq/m}^3$, $101-300 \text{ Bq/m}^3$ y $>300 \text{ Bq/m}^3$), se calcularon a partir de la siguiente cartografía:

- Los contornos de celdas de 1 km^2 de difusión de información establecida por Eurostat, con indicadores de población total, masculina y femenina, editado por el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011).
- El mapa de potencial de radón de España (CSN, 2017).
- Los límites administrativos a nivel de provincia, generados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

A partir de esta información se obtuvo, para cada provincia, la distribución de población por unidad de potencial de radón. Posteriormente, y puesto que las medidas de concentración de radón en cada una de estas unidades siguen una distribución log-normal, se estimaron para cada unidad las siguientes probabilidades: $P(x < 100 \text{ Bq/m}^3)$; $P(100 \text{ Bq/m}^3 < x < 300 \text{ Bq/m}^3)$

y $P(x \geq 300 \text{ Bq/m}^3)$. Combinando estos datos con la información anterior se obtuvieron las prevalencias por CC. AA.

Se aplicó una corrección por altura de la vivienda que se explica en el ANEXO I. La corrección implica fundamentalmente tener en cuenta que la exposición a radón descende con la altura de la vivienda y que por tanto las personas que puedan residir en pisos más altos de un bloque de viviendas realmente estarán menos expuestas a pesar de poder residir en una zona de elevada exhalación de radón. Esta corrección fue específica por Comunidad Autónoma.

Poblaciones

Se usaron las cifras de población residente a 1 de julio de 2017, por CA, sexo y grupo de edad, disponibles en la página web del INE.

Prevalencias de consumo de tabaco

Se calcularon prevalencias de fumadores, exfumadores y nunca fumadores en población ≥ 35 años, por CA, sexo y grupo de edad, a partir de los microdatos agrupados de tres encuestas: Encuesta Nacionales de Salud de España de 2011 (ENSE2011) y de 2017 (ENSE2017) (42,43), y de la Encuesta Europea de Salud en España del año 2014 (EES2014)(44). Los microdatos están disponibles en la página web del Instituto Nacional de Estadística (INE).

Riesgos de cáncer de pulmón asociados a exposición a radón

Se obtuvieron Odds Ratios de un estudio epidemiológico de casos y controles realizado en España y que incluyó 3.704 participantes en total. Para este estudio se usaron los datos de 1.625 casos y 1.597 controles de 35 años o más. Los datos de este estudio han sido publicados en detalle en julio de 2020 (33).

Riesgos de cáncer de pulmón asociados al consumo de tabaco

Se obtuvieron los riesgos relativos (RR) del análisis conjunto del seguimiento de 956.756 sujetos en el periodo 2000-2010 incluidos en el Cancer Pre-

vention Study fase 2 (CPS-II) realizado en Estados Unidos. Estos RR están disponibles por grupo de edad y sexo (45).

3.2. Método de cálculo

La estimación de la mortalidad atribuible por cáncer de pulmón a la exposición a radón residencial se realizó de la siguiente manera:

En un primer paso se calculó, para cada CA j , la fracción atribuida poblacional (FAP) de exposición a radón considerando 3 categorías de exposición:

- 0: Radón ≤ 100 Bq/m³.
- 1: Radón 101-300 Bq/m³,
- 2: Radón > 300 Bq/m³.

La FAP se obtuvo a partir de la siguiente fórmula:

$$FAP_j = \frac{RP_j - 1}{RP_j}$$

Donde:

- $RP_j = p_{0,j} + p_{1,j}RR_1 + p_{2,j}RR_2$
- $p_{0,j}$, $p_{1,j}$, $p_{2,j}$ son, respectivamente, las prevalencias de expuestos a radón en cada categoría en la CA j .

RR_1 es el riesgo de morir por cáncer de pulmón en los expuestos a la categoría 1 de radón comparados con los no expuestos (categoría 0), ajustado por sexo, edad y consumo de tabaco.

RR_2 es el riesgo de morir por cáncer de pulmón en los expuestos a la categoría 2 de radón comparados con los no expuestos (categoría 0), ajustado por sexo, edad y consumo de tabaco.

A continuación, se estimó la MA multiplicando la FAP por la mortalidad observada (MO):

$$MA_{s,ij} = FAP_j \times MO_{s,ij}$$

Donde s denota el sexo, i el grupo de edad y j la CA. Para este método se consideraron 4 grupos de edad: 35-54, 55-64, 65-74, 75 y más.

El número de muertes atribuidas a radón para cada combinación de sexo, grupo de edad y CA se distribuyó en función del consumo de tabaco aplicando las siguientes fórmulas (se omiten los subíndices s, i, j):

$$\text{Nunca fumadores: } MA_{nf} = \frac{MA p_{nf}}{p_{nf} + p_{exf} RR_{exf} + p_f RR_f}$$

$$\text{Exfumadores: } MA_{exf} = \frac{MA p_{exf} RR_{exf}}{p_{nf} + p_{exf} RR_{exf} + p_f RR_f}$$

$$\text{Fumadores: } MA_f = \frac{MA p_f RR_f}{p_{nf} + p_f RR_f + p_f RR_f}$$

Donde p_{nf} , p_{exf} y p_f son las prevalencias de nunca fumadores, exfumadores y fumadores, respectivamente, y varían por sexo, grupo de edad y CA; RR_{exf} y RR_f son los riesgos relativos de mortalidad por cáncer de pulmón en exfumadores y fumadores comparados con nunca fumadores, y varían por sexo y grupo de edad.

Las muertes atribuidas a radón se sumaron para cada CA y sexo, y se calcularon tasas de mortalidad por cáncer de pulmón atribuidas a la exposición a radón por 100.000 habitantes.

Para las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla no fue posible considerar la prevalencia de consumo de tabaco por falta de precisión en las estimaciones de consumo de tabaco por su bajo tamaño muestral.

4. Resultados

4.1. Mortalidad por cáncer de pulmón en España

En España en 2017 se produjeron 424.523 defunciones, de las cuales el 5,1% (22.121) se codificaron como cáncer de tráquea, pulmón y bronquios; de éstas 22.063 sucedieron en población de 35 años y más, 17.234 fallecimientos ocurrieron en varones y 4.829 en mujeres. La distribución de las muertes por Comunidad Autónoma (CA) se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Mortalidad por cáncer de tráquea, pulmón y bronquios en España en 2017 por Comunidades Autónomas y sexo. Población de 35 años y más

Comunidad Autónoma	Total	Hombres		Mujeres	
		Nº	%	Nº	%
1 Andalucía	3.582	2.939	82,0	643	18,0
2 Aragón	774	625	80,7	149	19,3
3 Asturias, Principado de	706	531	75,2	175	24,8
4 Balears, Illes	529	396	74,9	133	25,1
5 Canarias	907	667	73,5	240	26,5
6 Cantabria	355	266	74,9	89	25,1
7 Castilla y León	1.330	1.048	78,8	282	21,2
8 Castilla-La Mancha	1.004	842	83,9	162	16,1
9 Cataluña	3.366	2.585	76,8	781	23,2
10 Comunitat Valenciana	2.464	1.932	78,4	532	21,6
11 Extremadura	636	544	85,5	92	14,5
12 Galicia	1.561	1.224	78,4	337	21,6
13 Madrid, Comunidad de	2.555	1.864	73,0	691	27,0
14 Murcia, Región de	580	466	80,3	114	19,7
15 Navarra, Comunidad Foral de	314	249	79,3	65	20,7
16 País Vasco	1.214	906	74,6	308	25,4
17 Rioja, La	123	96	78,0	27	22,0
18 Ceuta	30	26	86,7	4	13,3
19 Melilla	33	28	84,8	5	15,2
ESPAÑA	22.063	17.234	78,1	4.829	21,9

4.2. Prevalencia de exposición a radón por Comunidades Autónomas

En la tabla 3 se puede observar la prevalencia de exposición a radón por CA y también el efecto que tiene la corrección por altura en dicha exposición. Las CC.AA. con mayor porcentaje de población expuesta a concentraciones superiores a 300 Bq/m³ son Galicia (14,08%), Canarias (8,12%) y Extremadura (7,99%), por este orden. Una vez aplicada la corrección por altura de las viviendas, este orden se invierte ligeramente, pasando a ser Galicia, Extremadura y Canarias las Comunidades Autónomas con mayor porcentaje de población expuesta a más de 300 Bq/m³, reduciéndose de forma apreciable el porcentaje de población expuesta (8,22%, 6,12% y 5,27%, respectivamente).

Si empleamos como punto de corte la exposición a más de 100 Bq/m³, las CC.AA. con mayor porcentaje de población expuesta son, por este orden, Galicia, Extremadura y Canarias, con el 37,86%, 28,68% y 26,54%. Al corregir por altura de las viviendas, estos porcentajes pasan a ser del 22,92%, 22,37% y 17,57% para estas CC.AA., respectivamente.

El impacto de la corrección por altura en la población expuesta es muy importante en algunas CC.AA., lo cual se reflejará en las estimaciones de mortalidad atribuible. La CA donde más se observa este impacto es la Comunidad de Madrid, que pasa de un 78% de la población expuesta a menos de 100 Bq/m³ a un 92% tras aplicar la corrección por altura utilizada.

Tabla 3. Prevalencia de exposición a radón interior por Comunidad Autónoma corregida y sin corregir por altura de la vivienda

Comunidad Autónoma	Prevalencias sin corregir (%)			Prevalencias corregidas (%)		
	<100 Bq/m ³	101 - 300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³	<100 Bq/m ³	101 - 300 Bq/m ³	>300 Bq/m ³
1 Andalucía	80,48	17,24	2,28	88,19	10,52	1,30
2 Aragón	80,29	17,41	2,31	90,86	8,18	0,96
3 Asturias, Principado de	79,02	18,08	2,89	91,19	7,71	1,10
4 Balears, Illes	80,68	17,19	2,14	88,52	10,30	1,17
5 Canarias	73,46	18,42	8,12	82,43	12,30	5,27
6 Cantabria	77,35	19,00	3,65	89,17	9,23	1,60
7 Castilla y León	76,05	19,21	4,74	85,09	12,05	2,86
8 Castilla-La Mancha	77,84	18,56	3,60	83,42	13,95	2,62
9 Cataluña	75,46	19,67	4,87	88,78	9,17	2,05
10 Comunitat Valenciana	81,46	16,76	1,78	91,72	7,58	0,71
11 Extremadura	71,32	20,69	7,99	77,63	16,26	6,12
12 Galicia	62,14	23,78	14,08	77,08	14,70	8,22
13 Madrid, Comunidad de	78,65	18,12	3,23	92,75	6,26	0,99
14 Murcia, Región de	81,14	16,93	1,93	88,26	10,62	1,12
15 Navarra, CF	80,48	17,31	2,20	91,06	8,05	0,90
16 País Vasco	79,47	17,84	2,69	94,32	5,06	0,62
17 Rioja, La	80,09	17,51	2,40	91,36	7,71	0,92
18 Ceuta	80,51	17,08	2,41	92,05	7,05	0,91
19 Melilla	81,48	16,75	1,77	91,35	7,94	0,71

4.3. Mortalidad atribuible a radón residencial en España y por Comunidades Autónomas

a) Mortalidad atribuible sin corregir por la altura de la vivienda

Sin corregir por la altura de la vivienda, en 2017 se atribuyeron a la exposición a radón residencial 1.533 defunciones en población de 35 y más años, 1.197 en varones y 336 en mujeres. Esto supone el 6,9% de todos los falleci-

mientos por cáncer de pulmón. Hay que tener en cuenta que la fracción atribuible poblacional a radón por sexo es la misma ya que no hay diferencias en la prevalencia de exposición ni en el riesgo de muerte entre hombres y mujeres. Por Comunidades Autónomas, Galicia es la que presenta un mayor porcentaje de fallecimientos, seguida de Extremadura y Canarias. Galicia y Canarias son las que presentan mayores tasas de mortalidad por exposición a radón en varones. Hay que destacar que el grueso de la mortalidad atribuida a radón residencial ocurre entre personas fumadoras y exfumadoras (95,6% en los varones y el 68,8% en las mujeres). Estos resultados detallados, por Comunidad Autónoma, junto con las tasas de mortalidad y la fracción atribuible poblacional se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4. Fracciones atribuidas poblacionales (FAP) en porcentaje, mortalidad atribuida (MA) a radón por cáncer de pulmón para cada Comunidad Autónoma y sexo en el año 2017, en global y en función del consumo de tabaco, en población ≥ 35 años y tasa de mortalidad atribuida por 100.000 habitantes. Datos sin corregir por altura de la vivienda

Comunidad Autónoma	FAP(%)	Hombres					Mujeres				
		MA	MA - NF	MA - ExF	MA - F	Tasax10 ⁵	MA	MA - NF	MA - ExF	MA - F	Tasax10 ⁵
1 Andalucía	6,1	178	7	76	95	7,21	39	12	7	20	1,47
2 Aragón	6,1	38	2	19	18	9,11	9	3	2	4	2,04
3 Asturias, Principado de	6,5	34	2	15	17	9,99	11	4	3	5	2,87
4 Balears, Illes	6,0	24	1	10	13	6,77	8	2	2	4	2,22
5 Canarias	8,0	54	2	23	29	8,02	19	5	4	11	2,79
6 Cantabria	7,0	18	1	9	8	9,88	6	2	1	3	3,00
7 Castilla y León	7,3	77	3	40	34	9,43	21	8	4	9	2,39
8 Castilla-La Mancha	6,8	57	3	26	28	9,15	11	5	1	5	1,72
9 Cataluña	7,5	194	8	91	94	8,62	58	21	15	23	2,38
10 Comunitat Valenciana	5,8	111	5	44	62	7,31	31	9	6	16	1,88
11 Extremadura	8,6	47	1	21	24	14,13	8	3	1	3	2,27
12 Galicia	11,1	136	8	63	65	15,32	37	15	8	15	3,75
13 Madrid, Comunidad de	6,6	123	5	62	56	6,48	45	9	11	25	2,09
14 Murcia, Región de	5,9	27	1	11	15	6,35	7	3	1	3	1,51
15 Navarra, Comunidad Foral de	6,1	15	1	6	8	7,59	4	1	1	2	1,88
16 País Vasco	6,3	58	3	28	27	8,33	20	5	4	11	2,54
17 Rioja, La	6,2	6	0	3	3	5,97	2	1	0	1	1,59

NF: nunca fumadores; ExF: exfumadores; F: fumadores.

b) Mortalidad atribuible corregida por la altura de la vivienda

Tras corregir por la altura de la vivienda, en España en 2017 se atribuyeron a la exposición a radón 838 muertes (3,8% del total). En hombres, la CA con la tasa de mortalidad más alta es Extremadura (11,24 casos por 100.000 habitantes), seguida de Galicia, y la más baja es la Comunidad de Madrid (2,30 casos por 100.000 habitantes). En mujeres, la CA con la tasa más alta es Galicia (2,37 casos por 100.000 habitantes) y la más baja La Rioja (0,7 casos por 100.000 habitantes). Las FAP varían entre el 7,0% y el 1,8% (Galicia y País Vasco, respectivamente) (Tabla 5). Como se puede observar, esta fracción atribuible poblacional se multiplica por cuatro en la CA con mayor FAP (Galicia) comparada con la CA con menor FAP (País Vasco). De nuevo se puede observar que la mayor parte de la mortalidad atribuible ocurre en fumadores y exfumadores, tanto en hombres como en mujeres (95,5% y 74,2% del total, respectivamente). La mortalidad atribuible en Ceuta y Melilla por cáncer de pulmón debido a la exposición a radón residencial fue de una persona en cada Ciudad Autónoma (sumando hombres y mujeres).

Tabla 5. Fracciones atribuidas poblacionales (FAP) en porcentaje, mortalidad atribuida (MA) a radón por cáncer de pulmón para cada Comunidad Autónoma y sexo en el año 2017, en global y en función del consumo de tabaco, en población ≥ 35 años y tasa de mortalidad atribuida por 100.000 habitantes. Datos corregidos por la altura de la vivienda

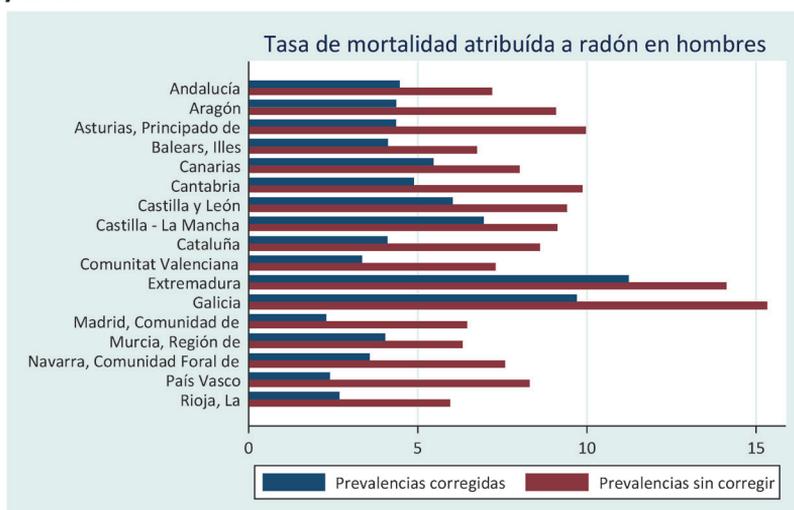
Comunidad Autónoma	FAP(%)	Hombres					Mujeres				
		MA	MA - NF	MA - ExF	MA - F	Tasax10 ⁵	MA	MA - NF	MA - ExF	MA - F	Tasax10 ⁵
1 Andalucía	3,8	110	4	47	59	4,47	24	7	5	12	0,91
2 Aragón	2,9	18	1	9	9	4,37	4	1	1	2	0,98
3 Asturias, Principado de	2,8	15	1	7	8	4,36	5	2	1	2	1,25
4 Balears, Illes	3,7	14	1	6	8	4,12	5	1	1	2	1,35
5 Canarias	5,5	36	1	15	20	5,46	13	3	3	7	1,90
6 Cantabria	3,4	9	0	5	4	4,90	3	1	0	2	1,49
7 Castilla y León	4,7	49	2	25	22	6,04	13	5	2	6	1,53
8 Castilla-La Mancha	5,2	44	2	20	21	6,96	8	3	1	4	1,31
9 Cataluña	3,6	92	4	43	45	4,11	28	10	7	11	1,14
10 Comunitat Valenciana	2,7	51	2	21	29	3,38	14	4	3	7	0,87
11 Extremadura	6,9	37	1	17	19	11,24	6	3	1	3	1,80
12 Galicia	7,0	86	5	40	41	9,70	24	9	5	9	2,37
13 Madrid, Comunidad de	2,3	44	2	22	20	2,30	16	3	4	9	0,74
14 Murcia, Región de	3,7	17	1	7	9	4,04	4	2	0	2	0,96
15 Navarra, Comunidad Foral de	2,9	7	0	3	4	3,60	2	0	0	1	0,89
16 País Vasco	1,8	17	1	8	8	2,42	6	1	1	3	0,74
17 Rioja, La	2,8	3	0	1	1	2,68	1	0	0	0	0,71

NF: nunca fumadores; ExF: exfumadores; F: fumadores.

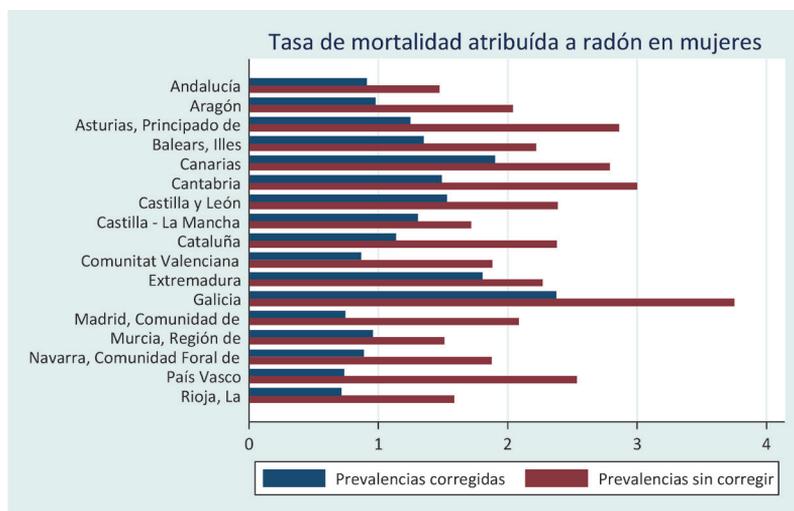
En la figura 3 (a y b), puede observarse el impacto que tiene la corrección por altura en las tasas de mortalidad por cáncer de pulmón debidas a la exposición a radón para hombres y mujeres, respectivamente. En algunos casos (como para la Comunidad de Madrid), estas tasas se reducen en más de la mitad tras ajustar por altura.

Figura 3. Tasa de mortalidad por cáncer de pulmón atribuida a la exposición a radón a partir de prevalencias de exposición corregidas y sin corregir en hombres (a) y en mujeres (b). Tasas por 100.000 habitantes

a) Hombres

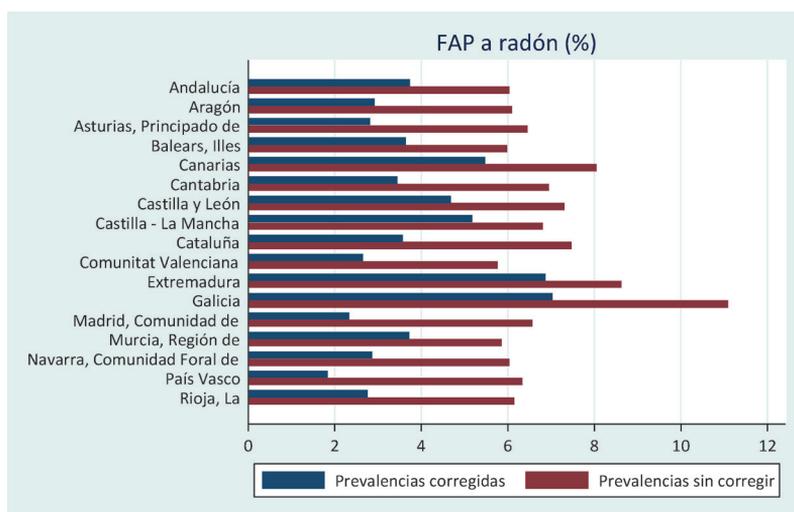


b) Mujeres



A continuación, en la figura 4, se presenta el impacto de la corrección por altura en la estimación de la fracción atribuible poblacional, donde se puede observar también que en muchas CC.AA. esta fracción se reduce en más de la mitad. El impacto es menor en aquellas CC.AA. donde las concentraciones de radón residencial son mayores (Galicia, Extremadura o Canarias).

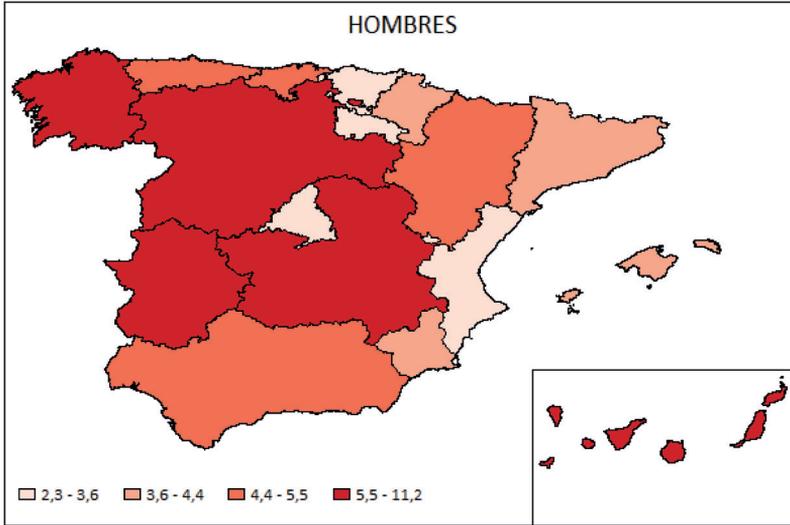
Figura 4. Fracción atribuida poblacional (FAP) de mortalidad por cáncer de pulmón por la exposición a radón residencial en función de la corrección por la altura de la vivienda



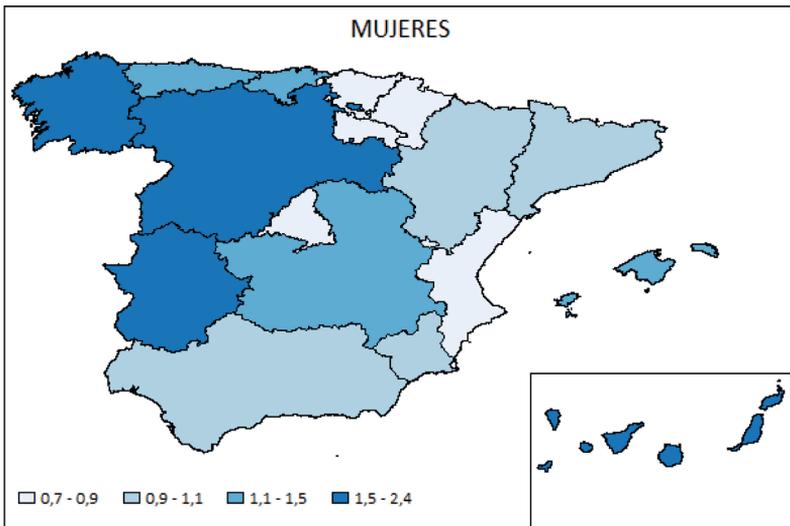
A partir del análisis de datos de prevalencia de exposición a radón, la mortalidad atribuible tiene un patrón espacial claro y se observa cómo en Andalucía (especialmente en mujeres) y en el área mediterránea la carga de MA por radón es más baja. En las dos Castillas, Galicia, Extremadura e Islas Canarias la carga es alta (Figura 5). Se observa este mismo patrón geográfico tanto para hombres como para mujeres.

Figura 5. Mapa por cuartiles de la tasa de mortalidad por cáncer de pulmón atribuida a radón en hombres (a) y mujeres (b). Tasas por 100.000 habitantes

a) Hombres



b) Mujeres



5. Discusión

Los resultados de este informe ponen de manifiesto que la exposición a radón residencial es una causa importante de mortalidad por cáncer de pulmón en España. En el año 2017 se estima que la exposición a radón corregida por altura causó 838 muertes (3,8% del total) y que el impacto de esta exposición es heterogéneo, siendo Galicia y Extremadura las CC.AA. más afectadas. En estas dos CC.AA., la exposición a radón causa el 7% de todos los cánceres pulmonares. Estos resultados están en línea con los observados en otros países y justifican la necesidad de iniciativas de mejora de la caracterización de la exposición a radón residencial y de reducción de esta exposición.

Hay que destacar que, por una parte, este estudio incluye una novedad importante en los cálculos realizados que no ha sido incluida previamente en otras estimaciones sobre mortalidad atribuible, y que es la corrección de la exposición a radón por la distribución de la población en función de la altura de la vivienda en la que residen para cada Comunidad Autónoma. El efecto de esta corrección es muy importante, pues la mortalidad atribuible se reduce en casi la mitad (pasando del 6,9% al 3,8%). El impacto de esta corrección es especialmente importante en Comunidades Autónomas como Madrid, que se caracteriza por aglutinar un elevado porcentaje de edificios en zona urbana, pasando la fracción atribuible poblacional de un 6,6% a un 2,3%.

Por otra parte, estos resultados reflejan en buena medida la distribución geográfica de radón y la distribución de las zonas más pobladas en nuestro país. En este caso, las zonas donde la exposición a radón interior es más elevada son Galicia, Extremadura, las dos Castillas y las islas de Gran Canaria y Tenerife. Sin embargo, las zonas más pobladas de España comprenden principalmente todo el arco mediterráneo, desde Andalucía a Cataluña incluyendo Baleares, y tienen aproximadamente la mitad de la población española. En estas Comunidades Autónomas, es Cataluña la que tiene mayor porcentaje de población expuesta a más de 300 Bq/m³ (corregida por altura), siendo sólo de un 2,05%. Esta distribución de radón y población, inversamente proporcional, se refleja en los resultados observados y refuerza la necesidad de aproximaciones más locales al control y reducción de la exposición a radón interior, sin excluir la necesidad de analizar zonas geográficas concretas dentro de las zonas consideradas de bajo riesgo.

5.1. Comparación con otros países y otros estudios

Otros países, tanto europeos como de otros continentes, han realizado estimaciones de mortalidad atribuible a radón por cáncer de pulmón. En general, la fracción atribuible poblacional oscila entre un 0,15% a un 25% de todas las muertes por cáncer de pulmón. Existe una gran variabilidad entre los resultados observados, como se puede comprobar en la Tabla 6.

A nivel nacional, son pocos los países que han realizado estudios de atribución de mortalidad y otras investigaciones han analizado mortalidad atribuible en regiones concretas dentro de un país determinado. Los métodos de atribución de mortalidad utilizados son variables, pero en general se observa que aquellos países o regiones con una mayor mortalidad atribuida tienen mayores concentraciones medias de radón residencial. Probablemente tenga que ver el nivel de radón por término medio en las regiones o países analizados. Por ejemplo, se puede observar que el estudio de Grundy et al (46), realizado en Alberta, Canadá, obtiene una fracción atribuible poblacional elevada (16,6%). Esta región presenta una media geométrica de 71 Bq/m³. Al desglosar los resultados de mortalidad atribuible por el consumo de tabaco se observa de manera consistente que si nos referimos al total de muertes, la mayor parte en las que participa el radón ocurren en fumadores o exfumadores, ya que existe una interacción fuerte entre el consumo de tabaco y la exposición a radón, al igual que lo que ocurre en el presente estudio. En cualquier caso, podemos afirmar que las estimaciones disponibles de mortalidad atribuible a radón en otros países están sobreestimadas al no corregir la exposición a radón por la altura de la vivienda.

Tabla 6. Estudios realizados sobre mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a radón residencial

Autor y año	País o región	Método empleado	Concentración de radón (Bq/m³)	Mortalidad atribuible a radón	Mortalidad atribuible a radón por consumo de tabaco
Peterson et al, 2013	Ontario, Canadá	Brand et al	43 (media geométrica)	13,6%	Nunca fumadores: 21,9% Fumadores: 12,3%
Wang JB, 2011	China	Levin	nd	0,15%	nd
Gray et al, 2009	Reino Unido	Levin	21 (media geométrica)	3,3%	Nunca fumadores: 0,5% Exfumadores: 1,6% Fumadores: 1,2%
Gaskin et al, 2018	Estimaciones por países	Varios métodos	53 (media geométrica)	17,8% a 18,7% dependiendo del método	nd
Grundy et al, 2017	Alberta, Canadá	Brand et al	71 (media geométrica)	16,6%	Nunca fumadores: 24,8% Fumadores: 15,6%
Catelinois et al, 2006	Francia	Varios métodos	53 (media geométrica)	2 a 12% dependiendo del método	Nunca fumadores: del 36 al 50% dependiendo del método Fumadores: 8 al 11% dependiendo del método
Leenhouts et al, 2001	Holanda y Suecia	Modelo mutagénico	nd	Holanda: Hombres: 2% Mujeres: 6% Suecia Hombres: 17% Mujeres: 24%	Radón y tabaco causan en torno al 80% de todas las muertes por cáncer de pulmón
Lubin and Boice, 1898	USA	Levin	35,5 (media geométrica)	Del 7 al 25% de todas las muertes por cáncer de pulmón	nd
Ajrrouche et al, 2018	Francia	OMS (Prüss-Ustün 2003)	nd	9,62%	Nunca fumadores: 5% Exfumadores: 20% Fumadores: 75%

Tabla 6. Estudios realizados sobre mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a radón residencial (Continuación)					
Autor y año	País o región	Método empleado	Concentración de radón (Bq/m³)	Mortalidad atribuible a radón	Mortalidad atribuible a radón por consumo de tabaco
Menzler et al, 2008	Suiza y Alemania	OMS (Prüss-Ustün 2003)	51 (media geométrica en Suiza) 37 (media geométrica en Alemania)	8,3% Suiza 5% Alemania	8,2 al 8,8% en nunca fumadores y del 8,2 al 8,6% en fumadores en Suiza. 5,2% en nunca fumadores y del 5,0 al 5,2% en fumadores en Alemania
Steindorf et al, 1995	Alemania	Varios métodos	40 (media geométrica)	Mujeres: 5,8 al 7,3% Hombres: 5,6 al 7%	Mujeres no fumadoras: del 7,3 al 18,8% Mujeres fumadoras: del 4 al 7,2% Hombres no fumadores: del 7,3 al 22,3% Hombres fumadores: del 5,5, al 6,8%
Al-arydah, 2017	Canadá	Varios métodos	42 (media geométrica)	nd	Se dan resultados para fumadores y nunca fumadores por sexo. Gran variabilidad en función del modelo usado
Axelsson et al, 2015	Suecia	Método propio	61 (media geométrica)	Se podrían prevenir del 35 al 40% de las muertes atribuidas a radón si se bajasen las concentraciones a menos de 100 Bq/m ³	nd

nd: dato no disponible.

5.2. Efecto del consumo de tabaco en la mortalidad atribuible a radón

El impacto del radón en la mortalidad atribuible por cáncer de pulmón es mayor en los fumadores que en los nunca fumadores. Estos datos se observan en los resultados disponibles, donde la mayor parte de esta mortalidad corresponde a fumadores, seguidos de los nunca fumadores. Si bien el radón produce un exceso de mortalidad en nunca fumadores, cuantitativamente éste es menor que el producido en las personas que han fumado alguna vez. En otros países se ha propuesto como estrategia de salud pública la medición de radón para conseguir un mayor impacto del mensaje antitabaco en los fumadores para que dejen de fumar si en su domicilio hay concentraciones elevadas de radón.

La distinta distribución del consumo de tabaco por Comunidades Autónomas también puede influir en la mortalidad atribuida a radón. Según la Encuesta Nacional de Salud de 2017, Galicia es la Comunidad Autónoma con una prevalencia de consumo de tabaco más baja (18%), mientras que Asturias alcanza prevalencias del 27,7% en población de 16 y más años (42). Estas diferencias pueden afectar al cálculo de la estimación conjunta de mortalidad atribuible a radón y a tabaco, ya que puede reducir el impacto del radón en aquellas Comunidades Autónomas donde el tabaquismo es menos prevalente al haber menos población en la que se combine la exposición a ambos factores de riesgo. Por tanto, en las Comunidades Autónomas donde exista más radón y haya menos prevalencia de fumadores, el impacto conjunto de radón y tabaco será menor del esperado. Esta reflexión también es aplicable a zonas concretas de cada Comunidad Autónoma en las que puede haber distintas concentraciones de radón y diferentes prevalencias de tabaquismo, suponiendo variaciones en la estimación de mortalidad atribuible a radón en áreas pequeñas.

5.3. Aspectos metodológicos. Ventajas y limitaciones

El presente informe tiene limitaciones, que se pueden clasificar en: 1) las limitaciones propias de los métodos de atribución de mortalidad y, 2) calidad y precisión de las fuentes de información.

Métodos de atribución utilizados. Se han localizado más de 10 métodos diferentes de atribución de mortalidad por cáncer de pulmón a la exposición a radón residencial. Estos métodos incluyen adaptaciones del método estándar de atribución de mortalidad basado en prevalencias de exposición hasta

sofisticados cálculos intensivos de modelización matemática. Esta diversidad supuso que se valorase en un principio emplear dos métodos diferentes de estimación de mortalidad atribuible, basándose uno de ellos en medias geométricas de exposición a radón por CC.AA. Sin embargo, en este último método no se habría podido corregir la mortalidad atribuible por altura y por ello no se ha ejecutado finalmente. A estas diferencias en los métodos de atribución existentes se une el hecho de que debe tenerse en cuenta el consumo de tabaco de la población, ya que éste es el principal factor de riesgo del cáncer de pulmón y además se ha indicado que existe sinergia en cuanto a la exposición a radón. Esto complica aún más las estimaciones, pues mientras cuando se estima mortalidad por cáncer de pulmón exclusivamente a consumo de tabaco (41) no se tienen en cuenta otras posibles covariables, al estimar mortalidad atribuida a radón necesitamos incluir el consumo de tabaco junto con la exposición a radón para poder identificar y distinguir el peso que tiene en la atribución cada uno de estos factores de riesgo. A continuación se realizan comentarios para cada una de ellas.

Calidad de las fuentes de información utilizadas. Los datos empleados para la estimación de mortalidad atribuible a radón residencial por cáncer de pulmón han precisado de la siguiente información: prevalencia de consumo de tabaco, prevalencia/concentración de radón a nivel de Comunidad Autónoma, fuerza de asociación entre tabaco y cáncer de pulmón y fuerza de asociación entre radón y cáncer de pulmón. A continuación se realizan comentarios para cada una de ellas.

La prevalencia de consumo de tabaco es representativa de cada Comunidad Autónoma, por sexo y grupo de edad ya que se ha obtenido de la unión de tres encuestas representativas de la población española. Las prevalencias derivan de la unión de 3 encuestas realizadas en años diferentes. Esta unión se hizo para disponer de estimaciones precisas de prevalencia por CC.AA. en función del sexo y grupo de edad, ya que de forma independiente las encuestas empleadas disponen de un bajo tamaño de la muestra para las CC.AA. en función de sexo y grupo de edad. Los datos de prevalencia de exposición a radón proceden del Consejo de Seguridad Nuclear, y concretamente del Mapa de Potencial de Radón de España (39). Estos datos corresponden a un muestreo de conveniencia realizado en todas las provincias y ciudades autónomas españolas en las que se ha medido la concentración de radón en viviendas localizadas en planta baja y primer piso. Se considera que estos datos son representativos de la concentración de radón a nivel nacional. Para corregir la prevalencia de exposición de la población por altura se ha acudido a información del Censo de Viviendas del Ministerio de Fomento, lo que ha permitido conocer el grado real de exposición poblacional a radón residencial, teniendo en cuenta que no toda la población

vive en plantas bajas o primeros, y se han aplicado factores de reducción de la concentración de radón por altura. Los datos de fuerza de asociación entre consumo de tabaco y cáncer de pulmón se han obtenido del Cáncer Prevention Study II, que es el estudio de mayor tamaño muestral y tiempo de seguimiento publicado hasta la fecha sobre consumo de tabaco y riesgo de cáncer de pulmón (45). Estos riesgos proceden de un estudio de cohortes realizado en población estadounidense, donde la evolución tabáquica es diferente a la de España. Sin embargo, son la mejor evidencia disponible cuando se valora el exceso de riesgo de muerte asociado al consumo de tabaco debido a que derivan del seguimiento de un número elevado de personas durante periodos prolongados de tiempo. Para el riesgo de cáncer de pulmón debido a radón residencial se ha utilizado uno de los mayores estudios con datos procedentes de un mismo país sobre radón y cáncer de pulmón, publicado en 2020 y realizado en el Noroeste de España (33). Este estudio ha incluido cerca de 4.000 participantes y puede representar correctamente los hábitos residenciales de la población española. El hecho de haberlo ejecutado fundamentalmente en zonas de riesgo facilita la obtención de asociaciones dosis-respuesta que pueden ser aplicadas a aquellas zonas/viviendas que tengan también esas concentraciones elevadas de radón.

Este estudio ha calculado la mortalidad atribuible a radón por cáncer de pulmón. Podría pensarse que hubiese sido mejor estimar el impacto en la incidencia por cáncer de pulmón. Sin embargo, los estudios disponibles indican que la supervivencia por cáncer de pulmón a los cinco años del diagnóstico se sitúa en torno al 15% en nuestro país (6), con lo que existe una correlación elevada entre incidencia y mortalidad por cáncer de pulmón. Por otra parte, a falta de un registro nacional de cáncer, la mortalidad por cáncer de pulmón es hoy por hoy un dato más fiable que el de la incidencia a nivel nacional, con lo que el impacto en mortalidad refleja de un modo bastante exacto el impacto del radón en la incidencia por cáncer de pulmón.

6. Conclusiones

- El radón participa en el 3,8% de todas las muertes por cáncer de pulmón a nivel nacional. Sin embargo, el impacto en la mortalidad es muy desigual en función de la Comunidad Autónoma de residencia.
- Las Comunidades Autónomas con mayor mortalidad por cáncer de pulmón atribuida a radón son Galicia y Extremadura, con el 7% de todos los fallecimientos por cáncer de pulmón.
- La mayor parte de los fallecimientos por cáncer de pulmón debidos a la exposición a radón ocurren en fumadores y exfumadores.
- La corrección de la exposición a radón por la altura de la vivienda atenúa de forma importante la mortalidad atribuible a radón y debería ser considerada en todo estudio que pretenda cuantificar el impacto de la exposición a radón en la mortalidad atribuible por cáncer de pulmón.

7. Implicaciones

La mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a radón residencial en España es globalmente baja. Esto se debe a la distribución desigual de la población, que se concentra fundamentalmente en zonas en las que la concentración de radón es baja (todo el arco Mediterráneo incluyendo Andalucía). Por otra parte, si bien Madrid es una Comunidad que presenta el 36% de su superficie afectada por concentraciones elevadas de radón, según el Mapa de Potencial de Radón de España, una buena parte reside en altura según los datos del censo de edificios del Ministerio de Fomento, con lo que este efecto se atenúa en buena medida.

Los resultados observados ponen también de manifiesto que el impacto en la mortalidad por exposición a radón puede ser tremendamente desigual, y que el factor determinante es la concentración de radón subyacente en el área a estudio. Es probable que un país del tamaño de España presente una gran heterogeneidad en la exposición a radón y por tanto sea más que razonable calcular mortalidad atribuible en zonas más pequeñas como las Comunidades Autónomas o provincias. Incluso en este caso puede seguir habiendo una heterogeneidad importante en la exposición a radón residencial por lo que puede ser más que razonable calcularla a nivel municipal. En este caso debe tenerse en cuenta tanto la altura media de las viviendas de este municipio como la prevalencia de consumo de tabaco, que pueden tener un efecto importante en la modulación de la mortalidad atribuible, como se ha comprobado.

Debe tenerse en cuenta que en esta investigación no se ha considerado la exposición a radón en el ámbito laboral, que sin duda contribuye a la exposición global de la población y que estos resultados suponen una infraestimación de la exposición real, particularmente en aquellas Comunidades Autónomas en las que el radón tiene una mayor presencia.

Cabe reseñar que las estimaciones obtenidas representan mortalidad evitable por cáncer de pulmón y que políticas activas de reducción de la exposición significarían una reducción importante del impacto de su exposición en la mortalidad global por cáncer de pulmón.

Estudios como el que se ha realizado en el presente informe son muy útiles para que las administraciones públicas pongan en contexto el impacto del radón en la salud y establezcan políticas de prevención encaminadas en primer lugar a cuantificar su relevancia y en segundo lugar a promover iniciativas efectivas para la reducción de la exposición a este carcinógeno humano de la población española.

8. Bibliografía

1. International Agency for Research on Cancer. Globocan 2018 [Internet]. [citado 10 Dic 2019]. Disponible en: <https://gco.iarc.fr/>
2. Red Española de Registros de Cáncer. Estimaciones de la incidencia del cáncer en España, 2019 [Internet]. [citado 10 Dic 2019]. Disponible en: http://redecan.org/es/download_file.cfm?file=837&area=210
3. Instituto Nacional de Estadística. Defunciones según la causa de muerte. 2017 [Internet]. [citado 23 Sep 2019]. Disponible en: http://www.ine.es/prensa/edcm_2017.pdf
4. Instituto Nacional de Estadística. Defunciones según la causa de muerte. 2018 [Internet]. Disponible en: https://www.ine.es/prensa/edcm_2018.pdf
5. SEER database, Surveillance, Epidemiology and End Results database. Cancer Stats Facts: Lung and Bronchus Cancer. [Internet]. [citado 13 Oct 2019]. Disponible en: <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/lungb.html>
6. Allemani C, Matsuda T, Di Carlo V, Harewood R, Matz M, Nikšić M, et al. Global surveillance of trends in cancer survival 2000-14 (CONCORD-3): analysis of individual records for 37 513 025 patients diagnosed with one of 18 cancers from 322 population-based registries in 71 countries. *Lancet Lond Engl*. 2018 17;391(10125):1023-75.
7. Asociación Española Contra el Cáncer. 2019. Disponible en: <http://observatorio.aecc.es/es/node/21>
8. Centers for Disease Control and Prevention. What Are the Risk Factors for Lung Cancer? [Internet]. [citado 20 Oct 2019]. Disponible en: https://www.cdc.gov/cancer/lung/basic_info/risk_factors.htm
9. World Health Organization, editor. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva, Switzerland: World Health Organization; 2009. 94 p.
10. Environmental Protection Agency. Basic Radon Facts [Internet]. 2013. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-08/documents/july_2016_radon_factsheet.pdf
11. Ruano-Ravina A, Figueiras A, Barros-Dios JM. Lung cancer and related risk factors: an update of the literature. *Public Health*. 2003 May;117(3):149-56.
12. Porstendörfer J. Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products. *Radiat Prot Dosimetry*. 2001;94(4):365-73.
13. Consejo de Seguridad Nuclear. Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo [Internet]. 2012 p. 34. Disponible en: <https://www.csn.es/documentos/10182/896572/GS+11-04+Metodolog%C3%ADa+para+la+evaluaci%C3%B3n+de+la+exposici%C3%B3n+al+rad%C3%B3n+en+los+lugares+de+trabajo/b75eb9c8-6b89-432e-ac6f-1e48698e8338?version=1.2&download=true>
14. Public Health England. Order a measurement pack [Internet]. 2019. Disponible en: <https://www.ukradon.org/services/orderdomestic>
15. Radon. In: IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 1988. p. 43: 173-259. (Monographies Evaluating Carcinogenic Risks to Humans).

16. Environmental Protection Agency. Radon Reference Manual. 1987. Report No.: EPA 520/1-87-20.
17. Darby SC, Whitley E, Howe GR, Hutchings SJ, Kusiak RA, Lubin JH, et al. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Natl Cancer Inst.* 1995 Mar 1;87(5):378-84.
18. Kreuzer M, Fenske N, Schnelzer M, Walsh L. Lung cancer risk at low radon exposure rates in German uranium miners. *Br J Cancer.* 2015 Nov 3;113(9):1367-9.
19. Hunter N, Muirhead CR, Tomasek L, Kreuzer M, Laurier D, Leuraud K, et al. Joint analysis of three European nested case-control studies of lung cancer among radon exposed miners: exposure restricted to below 300 WLM. *Health Phys.* 2013 Mar;104(3):282-92.
20. Rage E, Caër-Lorho S, Laurier D. Low radon exposure and mortality among Jouac uranium miners: an update of the French cohort (1946-2007). *J Radiol Prot Off J Soc Radiol Prot.* 2018;38(1):92-108.
21. Field RW, Steck DJ, Smith BJ, Brus CP, Fisher EL, Neuberger JS, et al. Residential radon gas exposure and lung cancer: the Iowa Radon Lung Cancer Study. *Am J Epidemiol.* 2000 Jun 1;151(11):1091-102.
22. Pershagen G, Akerblom G, Axelson O, Clavensjö B, Damber L, Desai G, et al. Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *N Engl J Med.* 1994 Jan 20;330(3):159-64.
23. Wichmann H-E, Rosario AS, Heid IM, Kreuzer M, Heinrich J, Kreienbrock L. Increased lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany. *Health Phys.* 2005 Jan;88(1):71-9.
24. Auvinen A, Mäkeläinen I, Hakama M, Castrén O, Pukkala E, Reisbacka H, et al. Indoor radon exposure and risk of lung cancer: a nested case-control study in Finland. *J Natl Cancer Inst.* 1996 Jul 17;88(14):966-72.
25. Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ.* 2005 Jan 29;330(7485):223.
26. Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW, et al. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiol Camb Mass.* 2005 Mar;16(2):137-45.
27. Unión Europea. COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation [Internet]. Jan 17, 2014. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF>
28. 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 Sep 15;156(6):548-55.
29. Llorca J, Bringas-Bollada M, Quindós-Ponceta LS. [No evidence of a link between household radon concentrations and lung cancer in Cantabria, Spain]. *Arch Bronconeumol.* 2007 Dec;43(12):696.
30. Barros-Dios JM, Ruano-Ravina A, Pérez-Ríos M, Castro-Bernárdez M, Abal-Arca J, Tojo-Castro M. Residential radon exposure, histologic types, and lung cancer risk. A case-control study in Galicia, Spain. *Cancer Epidemiol Biomark Prev Publ Am Assoc Cancer Res Cosponsored Am Soc Prev Oncol.* 2012 Jun;21(6):951-8.

31. Torres-Durán M, Ruano-Ravina A, Parente-Lamelas I, Leiro-Fernández V, Abal-Arca J, Montero-Martínez C, et al. Lung cancer in never-smokers: a case-control study in a radon-prone area (Galicia, Spain). *Eur Respir J*. 2014 Oct;44(4):994-1001.
32. Lorenzo-González M, Ruano-Ravina A, Torres-Durán M, Kelsey KT, Provencio M, Parente-Lamelas I, et al. Lung cancer and residential radon in never-smokers: A pooling study in the Northwest of Spain. *Environ Res*. 2019 May;172:713-8.
33. Lorenzo-Gonzalez M, Ruano-Ravina A, Torres-Duran M, Kelsey KT, Provencio M, Parente-Lamelas I, et al. Lung cancer risk and residential radon exposure: A pooling of case-control studies in northwestern Spain. *Environ Res*. 2020 Jul 25;189:109968.
34. Torres-Durán M, Barros-Dios JM, Fernández-Villar A, Ruano-Ravina A. Residential radon and lung cancer in never smokers. A systematic review. *Cancer Lett*. 2014 Apr 1;345(1):21-6.
35. Quindós LS, Fernández PL, Soto J, Ródenas C, Gómez J. Natural radioactivity in Spanish soils. *Health Phys*. 1994 Feb;66(2):194-200.
36. José Luis Martín Matarranz. Concentración de Radón en viviendas españolas. Consejo de Seguridad Nuclear; 2004 p. 110. Report No.: INT-04-09.
37. Marta García-Talavera San Miguel, José Luis Martín Matarranz, Rodrigo Gil de Mingo, Juan Pedro García Cadierno, Enrique Suarez Mahou. El mapa predictivo de exposición al radón en España. Consejo de Seguridad Nuclear; 2013.
38. Consejo de Seguridad Nuclear. Cartografía del Potencial de Radón de España [Internet]. Madrid; p. 2. Report No.: FDE-02.17. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/914801/FDE-02.17%20Cartograf%C3%ADa%20del%20potencial%20de%20rad%C3%B3n%20de%20Espa%C3%B1a>
39. Consejo de Seguridad Nuclear. Cartografía del potencial de radón en España [Internet]. [citado 28 Oct 2019]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/914801/FDE-02.17%20Cartograf%C3%ADa%20del%20potencial%20de%20rad%C3%B3n%20de%20Espa%C3%B1a>
40. Gaskin J, Coyle D, Whyte J, Krewski D. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon. *Environ Health Perspect*. 2018;126(5):57009.
41. Pérez-Ríos M, Barros-Dios JM, Montes-Martínez A, Ruano-Ravina A. Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the face of this health problem? *BMC Public Health*. 2010 May 18;10:256.
42. Ministerio de Sanidad. Encuesta Nacional de Salud de España 2017 [Internet]. [citado 21 Nov 2019]. Disponible en: <https://www.msbs.gob.es/estadEstudios/estadisticas/encuestaNacional/encuesta2017.htm>
43. Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. 2011. Instituto Nacional de Estadística. Encuesta Nacional de Salud de España 2011. [Internet]. [citado 21 Nov 2019]. Disponible en: <https://www.msbs.gob.es/estadEstudios/estadisticas/encuestaNacional/encuesta2011.htm>
44. Ministerio de Sanidad Consumo y Bienestar Social. Encuesta Europea de Salud en España 2014.
45. National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion (US) Office on Smoking and Health. The Health Consequences of Smoking—50 Years of Progress: A Report of the Surgeon General [Internet]. Atlanta (GA): Centers for Disease Control

and Prevention (US); 2014 [citado 1 Nov 2021]. (Reports of the Surgeon General). Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK179276/>

46. Grundy A, Brand K, Khandwala F, Poirier A, Tamminen S, Friedenreich CM, et al. Lung cancer incidence attributable to residential radon exposure in Alberta in 2012. *CMAJ Open*. 2017 Jun 28;5(2):E529-34.

9. Anexo I

9.1. Obtención de la prevalencia de exposición a radón residencial por Comunidad Autónoma

La prevalencia de la exposición a radón residencial a nivel nacional y por Comunidades Autónomas ha sido cedida por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). El CSN ha elaborado el Mapa de radón de España, en el que se han utilizado más de 12.000 mediciones de radón en viviendas, agrupadas por unidad litoestratigráfica, según el mapa a escala 1:200.000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Las áreas establecidas según esos criterios primarios de agrupación se dividieron o combinaron posteriormente a fin de obtener (en la medida que la escala permite) unidades con niveles de radón espacialmente homogéneos y con un tamaño muestral adecuado. Como se puede ver en el documento Cartografía del potencial de Radón en España (39), se clasifican las diferentes Comunidades Autónomas en función de superficie afectada, definiendo dichas superficies como aquellas con potencial de exposición a radón superior a los 300 Bq/m³. El CSN ha clasificado el territorio nacional identificando aquellas zonas en las que el percentil 90 supera los 300 Bq/m³ (es decir, el 10% de las viviendas de planta baja o primera planta en esas zonas superaría los 300 Bq/m³). Sin embargo, como estas zonas no son ni mucho menos homogéneas dentro de una misma CA, es necesario extraer la superficie afectada de cada CA extrayendo contornos poligonales para poder estimar la población afectada expuesta a más de 100 Bq/m³ y a más de 300 Bq/m³. Para esta estimación, se ha hecho uso de la cartografía digital de:

- Los contornos de las celdas de 1 km² de difusión de información establecida por Eurostat, con la información actualizada a 1 de noviembre de 2011 de la población de España, con indicadores de la población total, población masculina y población femenina, publicado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).
- Relación de edificios destinados principal o exclusivamente a viviendas y número de inmuebles según número de plantas sobre rasante por instalaciones del edificio, proporcionados por el INE.
- Listado de medidas de radón georreferenciadas realizadas hasta 2017 (Figura 6).
- Las categorías del Mapa de Radón de España, con la información de la clasificación de percentil 90 de exposición a radón en España, datos suministrados por el CSN (Figura 7).
- Los límites administrativos a nivel de provincia, datos generados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Figura 6. Mediciones de radón en España

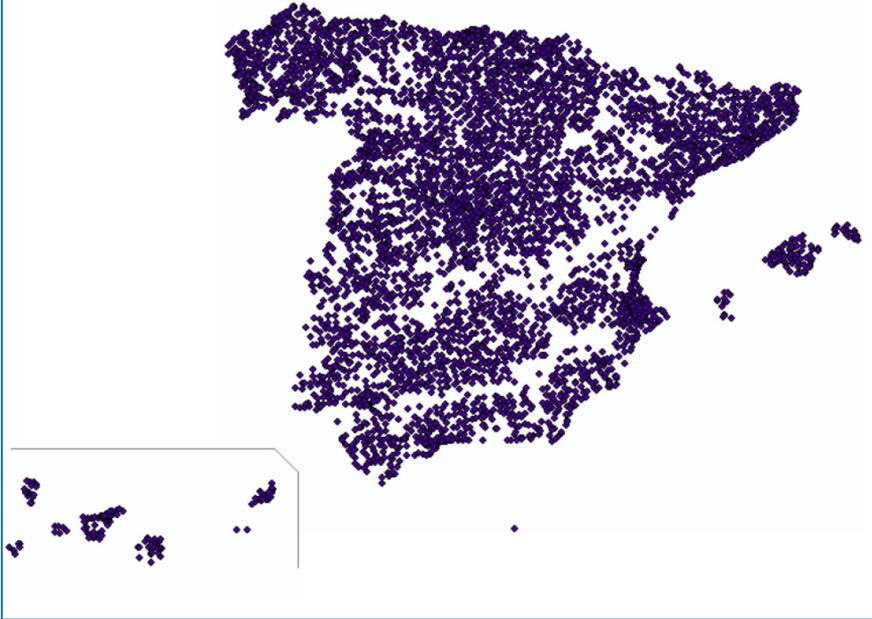
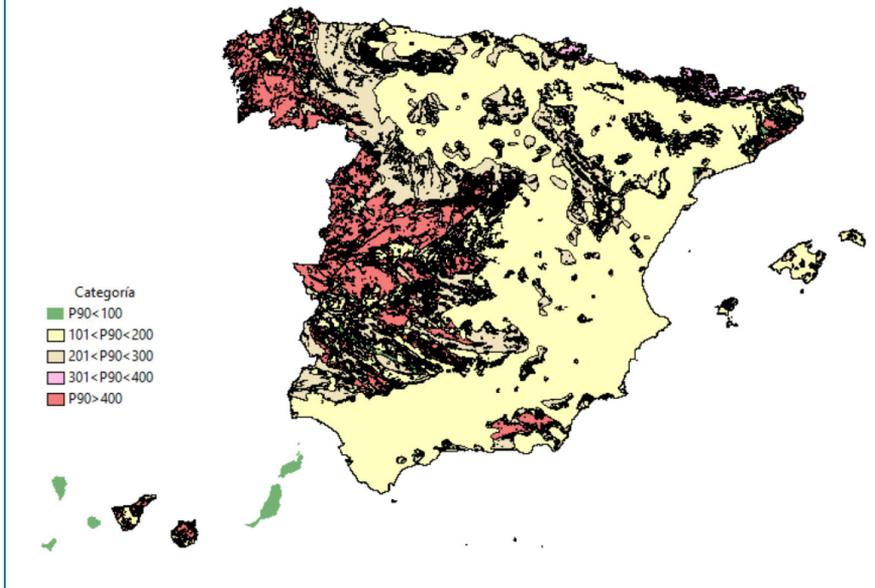


Figura 7. Cartografía digital del potencial de radón en España



9.2. Cálculo del número de personas expuestas según los umbrales de exposición a radón, considerando la altura de la vivienda en pisos

El Mapa de Radón de España del CSN está basado en medidas de radón en viviendas correspondientes a planta baja y primera planta. Es, por tanto, un mapa destinado a identificar zonas de riesgo, y no se ha diseñado para ser representativo de la exposición poblacional.

El porcentaje de población expuesta a radón se ha obtenido en función de la distribución de medidas de radón de cada una de las unidades del mapa. Para obtener una estimación más fiable de la exposición de la población a radón es necesario corregir por el efecto de la planta en la que se encuentra la vivienda. No es lo mismo un semisótano o planta baja, donde la probabilidad de tener una concentración elevada de radón será mayor que en un tercer piso o un ático, donde esa probabilidad será muy baja. Por ello, se ha considerado la tabla estadística de edificios destinados principal o exclusivamente a viviendas y el número de inmuebles según el número de plantas sobre rasante por instalaciones del edificio, tabla que incluye esta información a nivel provincial.

Para establecer las correcciones debidas al efecto de altura, se ha considerado lo siguiente:

- A las viviendas en edificios con una o dos plantas sobre rasante se les asigna directamente las distribuciones de probabilidad que aparecen en el Mapa de Radón de España.
- Para las viviendas en edificios de 3 plantas, se multiplican esas distribuciones por un factor de 0,7, teniendo en cuenta que si Y es una distribución log-normal, $C.Y \sim \ln N(\mu + \ln(C), \sigma^2)$.
- Para las viviendas en edificios de 4 o más plantas:
 - Al 70% de éstas se le asigna al intervalo $< 100 \text{ Bq/m}^3$, pues es raro encontrar en altura valores de radón superiores a 100 Bq/m^3 .
 - Al 30% restante se le aplica las distribuciones multiplicadas por el factor de 0,7.

En la medida en que estas correcciones por altura aproximadas puedan sustituirse por datos obtenidos estadísticamente a partir de un estudio ad-hoc, estos valores podrán ir siendo progresivamente sustituidos por valores reales de exposición a radón en altura.

La exposición a gas radón en el interior de las viviendas es el segundo factor de riesgo del cáncer de pulmón tras el tabaco y el primero en personas que nunca han fumado. Este gas radioactivo de origen natural se puede acumular en algunas viviendas alcanzando concentraciones que pueden ser peligrosas para la salud. En este informe se ha estimado la carga de mortalidad por cáncer de pulmón atribuible a la exposición a gas radón en España y por Comunidades Autónomas. Por primera vez se ha corregido su efecto teniendo en cuenta la altura de la vivienda, ya que las concentraciones son superiores en viviendas situadas a menor altura. En España, el 3,8% de todas las muertes por cáncer de pulmón se deben a la exposición a radón, pero hay una gran variabilidad entre Comunidades Autónomas. Galicia y Extremadura presentan la mayor carga de mortalidad atribuible, así un 7% y un 6,9% de las muertes por cáncer de pulmón, respectivamente, se atribuyen a la exposición a radón. La mayor parte de estas muertes ocurren en hombres y en personas fumadoras o exfumadoras. Es importante desarrollar políticas de prevención y de reducción de la exposición a este gas, particularmente en aquellas zonas más afectadas.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE SANIDAD