

EXPOSICIÓN A RADÓN EN VIVIENDAS: INFLUENCIA DE HÁBITOS DE OCUPACIÓN



CRISTINA TRULL HERNANDIS

Personal en investigación
INSTITUTO UNIVERSITARIO
DE SEGURIDAD INDUSTRIAL,
RADIOFÍSICA Y MEDIOAMBIENTAL



JOSÉ MIGUEL ARNAL ARNAL

Catedrático de Universidad PDI
INSTITUTO UNIVERSITARIO
DE SEGURIDAD INDUSTRIAL,
RADIOFÍSICA Y MEDIOAMBIENTAL



MARÍA PINO SANCHO FERNÁNDEZ

Subd. ETSII/ Innovación y Mejora Educativa
INSTITUTO UNIVERSITARIO
DE SEGURIDAD INDUSTRIAL,
RADIOFÍSICA Y MEDIOAMBIENTAL



GUMERSINDO JESÚS VERDÚ MARTÍN

Director
INSTITUTO UNIVERSITARIO
DE SEGURIDAD INDUSTRIAL,
RADIOFÍSICA Y MEDIOAMBIENTAL

La exposición a radiaciones ionizantes que la población recibe anualmente proviene en un 80 % de la naturaleza. Un 16 % deriva de los suelos, 13 % de los rayos cósmicos, 9 % de la ingesta de alimentos, siendo el radón el mayor contribuyente con un 42 % [1]. El gas radón surge de la desintegración del uranio de suelos y rocas, desde donde emana, llegando a alcanzar la superficie del terreno y penetrando en espacios cerrados, donde se acumula. Su inhalación constituye un riesgo para la salud del público, dado que mientras permanece en el interior del organismo decae, generando radionucleidos sólidos que tienden a depositarse sobre las vías aéreas. Durante las desintegraciones se emiten partículas cargadas que interaccionan directamente con el organismo, causando daño celular. Este se traduce en alteraciones en el ADN de los tejidos que derivan en la aparición de problemas cancerígenos. Por todo ello, se identifica el radón como la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón en el mundo, precedida únicamente por el tabaquismo [2].

Dado el riesgo asociado al radón se precisa que se controle su exposición. La Directiva 2019/59/EURATOM establece las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. Esta regulación fija un nivel de referencia de concentración anual media de radón en aire de 300 Bq/m³ [3]. Cuando se excede este valor se requiere emprender políticas de remediación que, junto con guías y recomendaciones, sirven para proteger al público de los efectos adversos de la exposición al radón.

El nivel de exposición y la radiación absorbida por los ocupantes de un inmueble puede variar notablemente. Las concentraciones de radón en cada vivienda dependerán de

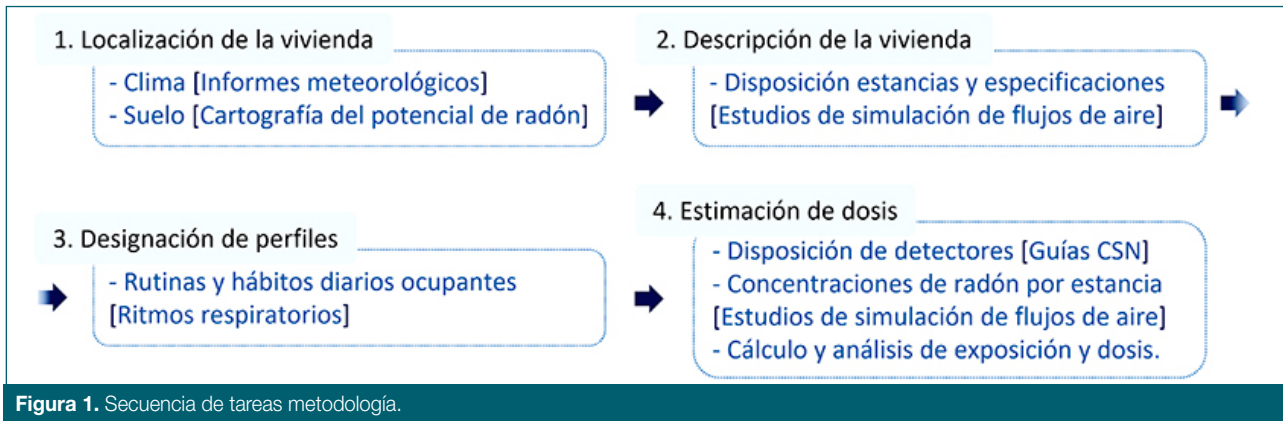
factores como la composición del suelo, el material de construcción empleado y la presencia de grietas en la construcción, entre otros. A su vez las concentraciones variarán con la ventilación y los flujos de concentración de radón en aire. Asimismo, la dosis recibida por los ocupantes dependerá de sus hábitos y rutinas diarias [2], de ahí la importancia de caracterizar diferentes exposiciones que tendrían lugar en una misma vivienda. Se busca así delimitar las situaciones de exposición, previo a establecer medidas de corrección, y proteger así la integridad de la salud de los ocupantes.

Así pues, este trabajo plantea la estimación de la exposición a radón y de la dosis potencial asociada para los habitantes de una vivienda localizada en una zona de alta exposición a radón, teniendo en cuenta diferentes perfiles y hábitos de ocupación.

METODOLOGÍA

El trabajo integra la consecución de las tareas de localización y descripción de la vivienda, designación de los perfiles de los ocupantes y estimación de dosis (Figura 1).

1. **Localización de la vivienda:** el emplazamiento se ubica en una zona que, según el suelo sobre el que se asienta y las condiciones climáticas del entorno, propiciaría elevadas concentraciones potenciales de radón en aire. Para ello se revisan cartografías del potencial de radón en España y por municipio [4, 5], junto con informes meteorológicos del área [6].
2. **Descripción de la vivienda:** se definen las especificaciones y se distribuyen los espacios interiores de la vivienda. Las características del emplazamiento que tienen un



efecto sobre la situación radiológica del emplazamiento se identifican a partir de estudios de simulación de flujos de aire [7, 8, 9].

3. **Designación de perfiles:** se designan los perfiles de los ocupantes, especificando las rutinas y hábitos diarios que alteran los ritmos respiratorios de los inquilinos. Así, según las frecuencias respiratorias de cada individuo [10, 11, 12], bajo las distintas condiciones de actividad física consideradas, se cuantifica el volumen inhalado por cada ocupante tras ocupar cada estancia.

4. **Estimación de dosis:** Para realizar una estimación de dosis se precisa disponer de un valor de concentración de radón de cada espacio de la vivienda, para lo que se dotaría ésta de detectores a disponer según directrices de Guías de Seguridad del CSN [13]. Considerando nuevamente los estudios de simulación de flujos de aire se facilita una estimación de las concentraciones de radón por estancia, que se utiliza posteriormente en el cálculo y análisis de la exposición y dosis que recibirían los ocupantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Localización de la vivienda

La concentración de radón en aire varía a lo largo del territorio español. Las cartografías de niveles potenciales de radón en aire precisan las zonas geográficas en que se espera que al menos un 10 % de las viviendas superen los 400 Bq/m³ [4]. Así pues, se ubica la vivienda en una de las comunidades con mayores niveles potenciales de radón, Galicia.

Factores ambientales como la humedad y las precipitaciones tienen un impacto notable sobre las concentraciones de radón en aire, dado que la permeabilidad de los suelos decrece en entornos húmedos y lluviosos [14]. Así pues, el radón disuelto en los suelos tiende a alcanzar la superficie por el tramo seco del terreno situado bajo la vivienda. Se recopilan los informes de precipitaciones de estudios meteorológicos de cinco años [6] y se determina sobre estos la zona que acumularía más precipitaciones, propiciando la entrada de radón. Esta corresponde a la zona oeste del territorio gallego.

El municipio en particular donde se sitúa la vivienda se escoge de entre las localidades al oeste en que se identifica al menos un 10 % de las edificaciones alcanzan los 300 Bq/m³

[5]. Se ubica finalmente la vivienda en el pueblo de Outes, provincia de A Coruña.

Descripción de la vivienda

Para enmarcar la vivienda en condiciones que impliquen una situación lo más adversa posible, se han tenido en cuenta los factores que favorecen la acumulación de radón en espacios interiores. El radón tiende a concentrarse en espacios pequeños, según se encuentren interpuestos los obstáculos que impiden el paso de corrientes de aire y los elementos de ventilación. A su vez, el radón tiende a acumularse en zonas húmedas, puesto que condicionan su transporte, y en plantas bajas [14].

Teniendo en cuenta todo lo anterior se precisa que la vivienda correspondería con un bajo unifamiliar, cuya disposición de habitaciones condicionaría el paso natural de corrientes de aire debido a la interposición de muros y paredes que delimitan las distintas estancias de la vivienda. Así, se sitúa la residencia al nivel del suelo y, de acuerdo con estudios de Dinámica de Fluidos Computacional [7, 8, 9], se formula la distribución de estancias (Figura 2) a fin de reproducir una situación en que el aire interior no fuese homogéneo y, por lo tanto, los niveles de exposición varíen según la estancia.

Perfiles de ocupación

Se designan los perfiles de ocupación atendiendo a cubrir los diferentes tipos de exposición que podrían darse en un domicilio. Los ocupantes de la vivienda corresponden con

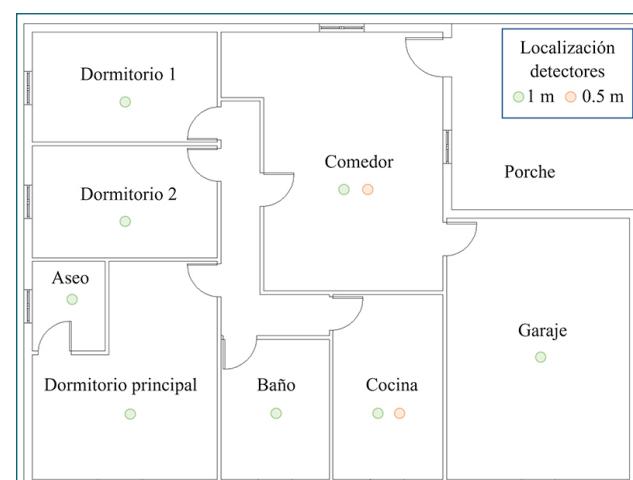


Figura 2. Distribución de la vivienda y provisión de detectores.

		Reposo		Intermedio		Esfuerzo
Adulto	Frecuencia/min	15		30		60
	Volumen (L/min)	12,00		60,00		100,00
Niño	Frecuencia/min	21		30		60
	Volumen (L/min)	5,28		7,54		15,08
			Calma/Reposo		Agitación	
Bebé	Frecuencia/min		31		47	
	Volumen (L/min)		1,96		2,93	

Tabla 1. Ritmos respiratorios según condiciones de actividad.

un grupo de cinco integrantes entre los que hay dos adultos, un niño, un bebé y un anciano con movilidad reducida.

La rutina diaria de cada inquilino delimita el tiempo transcurrido en cada estancia y la actividad realizada, ya que afecta a los ritmos respiratorios. A su vez, la capacidad pulmonar varía con la edad. Se conoce los rangos de frecuencia respiratoria y el volumen inhalado por minuto por un adulto en condiciones de reposo y esfuerzo prolongado [10, 11], a partir de lo que se establecen valores para esfuerzos intermedios, recogiendo todos estos valores en la Tabla 1. Asimismo, conocida la frecuencia de inhalación que presentan niños y bebés [10], así como la tasa de inhalación en función el peso de los menores [12], la Tabla 1 recoge la frecuencia respiratoria y el volumen inhalado para condiciones de reposo, intermedias y esfuerzo en el caso del niño y periodos de calma y agitación en el caso del bebé.

Para poder estimar las dosis recibidas por los ocupantes, es necesario definir los hábitos diarios de ocupación y actividad en las distintas estancias, por lo que se precisan las rutinas diarias por estancia de los ocupantes [15] y se resumen a continuación.

- La persona de la tercera edad con movilidad reducida pasaría la mayor parte del día en el inmueble, ocupando comedor, baño y el dormitorio 1. La mayor parte del tiempo se encontraría en reposo, excepto durante prácticas de ejercicios de movilidad en el comedor a frecuencia respiratoria media.
- El adulto 1 es el que menor tiempo transcurre en la vivienda. Frecuenta todas las estancias en estado de reposo, exceptuando los dormitorios individuales. En el garaje lleva a cabo tareas de mantenimiento a ritmo moderado, mientras que alcanza ritmos respiratorios elevados tras desempeñar entrenamientos físicos en el comedor.
- El adulto 2 frecuenta todas las estancias menos el garaje. Realiza las tareas domésticas en la mayoría de las habitaciones, lo que lleva a ritmos respiratorios intermedios. A su vez practica ejercicio en el comedor, alcanzando frecuencias altas.
- El bebé permanece durante el día en todas las estancias, excepto el garaje y las habitaciones individuales. La frecuencia respiratoria alterna entre reposo y llanto prolongado, que aumenta el ritmo respiratorio. Se diferencian los tiempos que pasaría en una hamaca de suelo del resto.
- El niño ocuparía el dormitorio 2, baño, comedor y garaje. Las actividades alternan del estado de reposo a niveles de agitación en el comedor o garaje, con valores intermedios en el baño y el comedor.

Estimación de dosis

La evaluación de la situación radiológica se realizaría con detectores pasivos de largo plazo, instalados durante tres meses en que la vivienda permanecería cerrada [16]. Para la selección de los dispositivos se evalúan varios detectores, escogiéndose finalmente los electretes de cámara de ionización, dado su moderado coste y la incertidumbre asociada entre el 8 al 15 % para 200 Bq/m³ de exposición [2].

Se distribuyen los detectores en la vivienda como indica la Figura 2. Se sitúan según recomendaciones a 1 metro del suelo, lejos de elementos de ventilación y manteniendo 30 cm de distancia a las paredes y 10 cm a objetos [13]. Se sitúa un detector en cada espacio considerado homogéneo y, dada la tendencia del radón de acumularse cerca del suelo, otro adicional en las dos estancias en que se coloca la hamaca de suelo del bebé. Estos detectores adicionales se sitúan a 0.5 m del suelo, distancia mínima recomendada en guías [13]. Tras las mediciones, los dispositivos se recogerían para su lectura, obteniéndose la concentración correspondiente a cada detector.

Las concentraciones de radón por estancia, que presenta la Figura 3, se asignan con el propósito de reproducir una vivienda cuya situación excedería el nivel de referencia de 300 Bq/m³ [3]. Se emplean estudios de Dinámica de Fluidos Computacional [7, 8, 9] para evaluar como tiende a difundir el radón en espacios interiores. Así pues, se atribuyen mayores valores a los espacios de menor tamaño y, adicionalmente, a aquellos que cuentan con humedad en el ambiente. Puesto que el radón es más denso que el aire, a los dispositivos situados a 0.5 m del suelo se les atribuyen valores más altos.

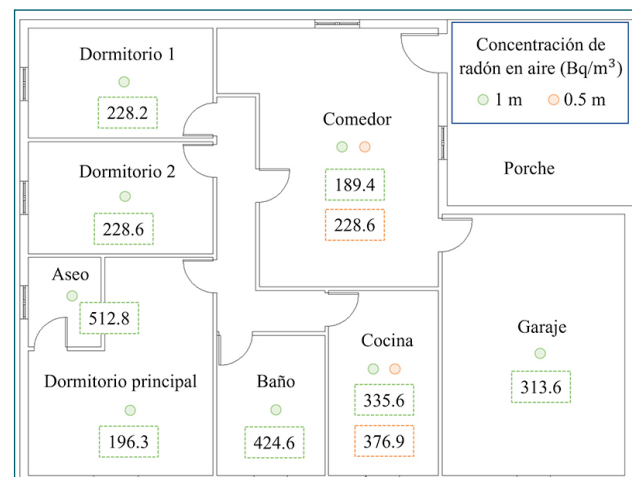


Figura 3. Concentraciones de radón por estancia.

Todas las estancias superarían los 100 Bq/m³, excediéndose en el caso particular del aseo los 500 Bq/m³, puesto que se trata de un espacio pequeño con humedad en el ambiente, lo que propicia que se alcancen mayores niveles de radón [14]. Así se sobrepasaría el nivel de referencia establecido en la legislación, que deriva en un riesgo para la salud de los individuos. Por este motivo, a partir de las concentraciones de radón, se estiman los niveles de exposición que sufriría cada ocupante.

El nivel de actividad al que se exponen los ocupantes (A_{exp}) se obtiene, siguiendo la Ecuación 1, a partir del sumatorio del producto de las concentraciones de radón atribuidas ($[Rn]_{hab}$), del tiempo que cada ocupante pasa en la estancia en cuestión (t_r) y de la cantidad de aire inhalado V_{air} , que depende de las frecuencias respiratorias. Conocido el tiempo diario que pasa cada ocupante en la vivienda ($t_{día}$), se estima la actividad media a la que se expondrían por hora transcurrida en el inmueble ($A_{media-exp}$), Ecuación 2.

$$A_{exp} = \sum [Rn]_{hab} \cdot t_r \cdot V_{air} \quad (1)$$

$$A_{media-exp} = A_{exp} / t_{día} \quad (2)$$

Si bien no se dispone de niveles de referencia que refieran a las tasas de actividad a las que se exponen los individuos, estarían relacionadas con los niveles de concentración de radón en aire. Así pues, se determina que la situación radiológica de la vivienda entraña un riesgo para la salud de sus ocupantes. Las actividades a las que se exponen los ocupantes tanto diariamente como por hora transcurrida en la vivienda se presentan en la Figura 4.

Se observa de la Figura 4(A) que el adulto 2, tras pasar gran parte del día en la vivienda y realizar actividades físicas en ella, es el ocupante más expuesto. El anciano es el siguiente ocupante que se expone a más actividad dado que pasa una parte sustancial del día en el inmueble. El adulto 1 presenta un valor similar al del anciano puesto que, aunque pasa menos parte del día, realiza actividades físicas en la vivienda. Las actividades a las que se exponen el niño y el bebé serían menores por la diferencia entre sus capacidades pulmonares y las de un adulto. No obstante, como señala la OMS, no existe un nivel de exposición por debajo del cual la exposición a radón pueda considerarse segura.

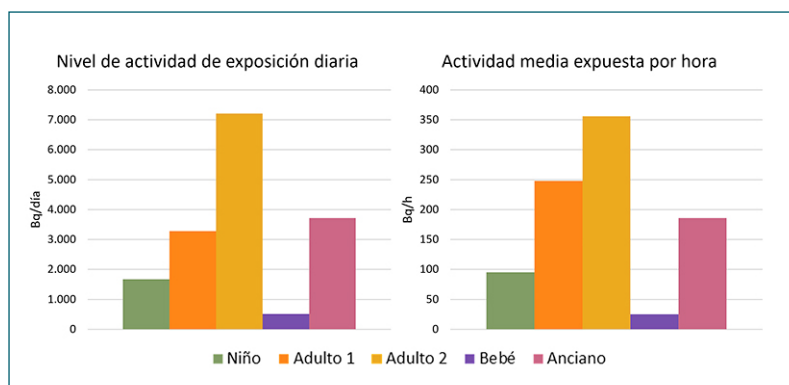


Figura 4. (A) Nivel de actividad de exposición diaria; (B) Actividad media de exposición por hora en la vivienda.

Al considerar el tiempo diario que pasa cada ocupante, Figura 4(B), el adulto 2 continúa teniendo el mayor valor, no obstante, el adulto 1 pasa a ser el segundo ocupante que se expone a más actividad por hora transcurrida en la vivienda. Esto se debería a las diferencias de exposición entre calma y esfuerzos físicos.

El nivel de exposición varía con las concentraciones de radón, los tiempos de exposición, y las actividades desempeñadas en la vivienda. En consecuencia, la exposición a la que se somete un individuo que realiza actividades puntuales de elevada frecuencia respiratoria, puede superar los niveles de actividad de otro que se aloje durante periodos de tiempo más largos en el inmueble.

Se calcula a su vez la dosis anual que recibiría el adulto 2, Ecuación 3, puesto que sería el individuo expuesto a mayores niveles de actividad. Para ello se estima la actividad total a la que se expone, equivalente al sumatorio del producto del tiempo que anualmente pasa en cada vivienda (t) y las concentraciones de radón por estancia ($[Rn]_{hab}$), y se convierte a dosis. El factor de dosis efectiva por unidad de exposición potencial de energía alfa es de 1.1 Sv por Jhm⁻³, $F_{Bq/J}$ corresponde con el factor de conversión de Bq/m³ a J/m³ [18], siendo 0.4 el factor de equilibrio secular de radón en viviendas (F_{eq-sec}) [2].

$$Dosis = \sum [Rn]_{hab} \cdot t \cdot F_{eq} \cdot F_{Bq/J} \cdot F_{D.ef} \quad (3)$$

La dosis efectiva estimada es de 4.24 mSv al año, valor que excede el límite de dosis establecido para los miembros del público, 1 mSv [17]. De acuerdo con la estimación realizada, se requeriría emprender medidas de mitigación sobre la edificación para proteger a los ocupantes de la exposición al radón [15].

CONCLUSIONES

Se ha evaluado la situación radiológica de una vivienda cuyas características propiciarían altas concentraciones de radón en aire. Con este propósito se han considerado tanto condiciones meteorológicas del área como la situación geográfica del emplazamiento. La exposición de los ocupantes a distintos niveles de actividad ha sido evaluada, considerando a su vez los hábitos y rutinas desempeñados en las estancias de la vivienda.

De acuerdo con la Directiva del Consejo Europeo y la OMS, al excederse en el emplazamiento los 300 Bq/m³, dicha exposición supondría un riesgo para la salud de sus ocupantes. Considerando las variaciones de exposición que pueden presentarse en un mismo inmueble, las concentraciones de radón deben evaluarse junto con los niveles de exposición y dosis efectiva. Todo ello a fin de delimitar el riesgo radiológico de cada ocupante por residir en la vivienda y, con ello, estar en posición de emprender las medidas necesarias para preservar la integridad de la salud de los ocupantes.

REFERENCIAS

- [1]. PNUMA, "Radiación. Efectos y fuentes," 2016.
- [2]. OMS, "Manual de la OMS sobre el radón en interiores," 2015.
- [3]. European Union, "Council Directive 2013/59/EURATOM," 2014.
- [4]. CSN, "Cartografía del POTENCIAL DE RADÓN en España," 2017.
- [5]. Universidad de Santiago de Compostela, "Porcentaje de medidas de más de 300 Bq/m³ por municipio," 2018.
- [6]. Xunta de Galicia, "Informe climatológico anual. Mapa de precipitación acumulada no anos 2013-2017,"
- [7]. K. Akbari, and J. Mahmoudi, "Numerical simulation of radon transports and indoor air conditions effects," IJ-SER, vol. 3(6), 2012.
- [8]. K. Akbari, J. Mahmoudi, and J. Ghanbari, "Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house," Journal of Environmental Radioactivity, vol. 116, pp. 166-173, 2013.
- [9]. R. Rabi, and L. Oufni, "Study of radon dispersion in typical dwelling using CFD modeling combined with passive-active measurements," Radiation Physics and Chemistry, vol. 139, pp. 40-48, 2017.
- [10]. J. López Chicharro, and A. Fernández Vaquero, "Fisiología del Ejercicio," 3e, V, 2006.
- [11]. Breathe (Sheff), "Your lungs and exercise," 12(1), pp. 97-100, 2016.
- [12]. J. López-Herce, M. Rupérez Lucas, C. García Sanz, and E. García Sánchez, "IV Curso sobre la Función Pulmonar en el Niño (Principios y Aplicaciones)," 2013.
- [13]. CSN, "Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire," 2010.
- [14]. CSN, "Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios," 2010.
- [15]. C. Trull Hernandis, "Desarrollo de las medidas necesarias para la reducción y el control de la concentración de radón en el aire interior de una vivienda unifamiliar localizada en la comunidad de Galicia," RiuNet UPV, 2018.
- [16]. CSN, "Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo," 2012.
- [17]. Ministerio de la Presidencia, "Real Decreto 783/2001," 2001.
- [18]. ICRP, "Protection Against Radon222.," Publication 65, 1990. ■