

03-027

METHODOLOGY FOR RADON EXHALATION MEASUREMENT USING ALPHA TRACK DETECTORS

Acosta Sabater, Marta ⁽¹⁾; Noverques Medina, Aina ⁽¹⁾; Juste Vidal, Belén Jeanne ⁽¹⁾; Sancho Fernández, María ⁽¹⁾; Verdú Martín, Gumersindo ⁽¹⁾

⁽¹⁾ ISIRYM, Universitat Politècnica de València

Radon is a natural radioactive gas that is considered as the second reason of lung cancer worldwide. Due to the problem that entitles its exposition, control and regulation, legislation about radon levels in the air is established, as the RD 1029/2022, recently incorporated to the Spanish regulations. The attainment of the reference levels stated in the current legislation is sustained in action plans. There, methodologies, and protocols regarding radon measurement should be included, where processes as radon exhalation are evaluated. Among radon measurement techniques, there are the trace detectors, which are integrated reliable low-cost measuring devices, that until now were not used in radon exhalation measurements. Hence, a methodology to apply trace detectors in exhalation measurements in active soils environments is presented. The results after applying this methodology are compared with the ones coming from other measurement exhalation techniques. Also, the influence that humidity and the particle size of the medium would have on the measurement process is studied. All this to define the radon exhalation process in an optimum and accurate manner, contributing to control and limit the levels to which the public is exposed to.

Keywords: radon; measurement; alpha track detector; exhalation

METODOLOGÍA PARA LA MEDIDA DE LA EXHALACIÓN DE RADÓN UTILIZANDO DETECTORES DE TRAZAS

El radón es un gas radiactivo natural, que constituye la segunda causa de cáncer de pulmón entre la población. A raíz de la problemática asociada a su exposición surge normativa en materia de control y regulación de los niveles de radón en aire, habiéndose incorporado recientemente al reglamento español el Real Decreto 1029/2022. El cumplimiento de los niveles de referencia expuestos en la normativa vigente se apoya en la aplicación de planes de acción, dentro de los que se deben aplicar protocolos para la medición de radón, evaluándose procesos como la exhalación. Entre las técnicas de medición de radón, los detectores de trazas son dispositivos de medida integrada fiables y de bajo coste que, hasta la fecha, no se han utilizado en exhalación. En este trabajo se presenta una metodología que utiliza los detectores de trazas para medir exhalación de radón en entornos de suelos activos y se contrastan los resultados obtenidos con los de otras técnicas. Además, se estudia la posible influencia de la humedad y el tamaño de grano sobre el proceso de medición. Todo ello para definir de forma óptima y precisa la exhalación de radón, contribuyendo a controlar y limitar los niveles de exposición del público.

Palabras clave: radón; medida; trazas; exhalación

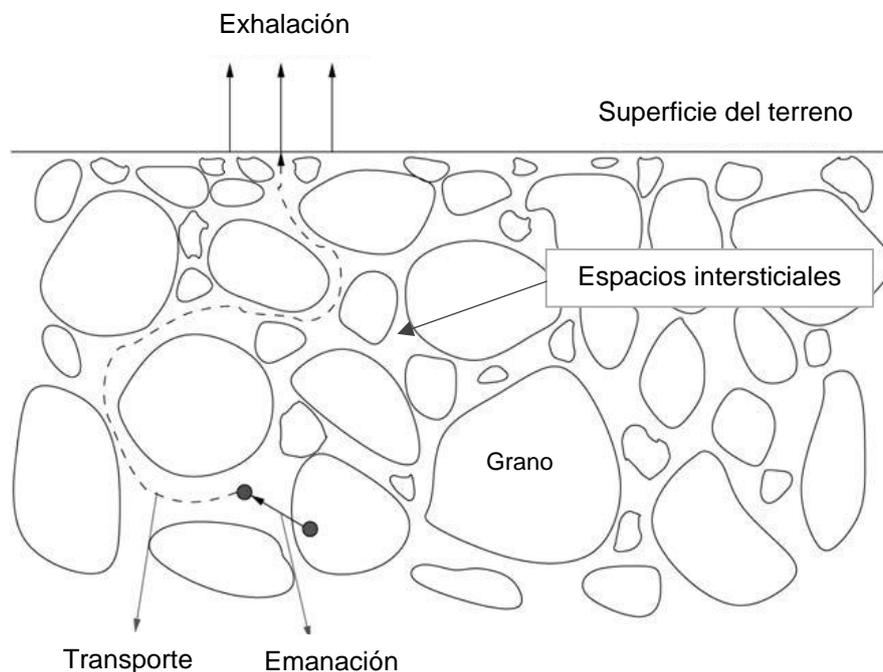


© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El radón es un gas natural radiactivo procedente de la desintegración del uranio. Dada su naturaleza gaseosa es capaz de escapar de suelos y rocas, donde se origina, y transportarse a través de los terrenos hasta alcanzar la superficie. Al liberarse en espacios abiertos se diluye en la atmósfera, no obstante, en recintos cerrados tiende a acumularse, derivando en un riesgo por exposición para la población. El riesgo por exposición principal asociado al radón y sus descendientes, también radiactivos, se debe a que, por sus cortos periodos de semidesintegración, decaen mientras se encuentran en el interior del organismo emitiendo partículas energéticas que ionizan la materia a su paso (INSHT, 1999). La interacción de las partículas cargadas con el organismo deriva en daños celulares y alteraciones en el ADN que se manifiestan principalmente en afecciones pulmonares, estando por ello el radón reconocido como la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón en el mundo (OMS, 2015). Es por ello por lo que el riesgo principal de la exposición al radón y su progenie se debe a su inhalación, lo que pone de manifiesto la necesidad de controlar y regular los niveles de radón a los que se expone la población. En consecuencia, recientemente se ha incorporado al reglamento español el Real Decreto 1029/2022, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. El Reglamento fija niveles de referencia de radón y pone de manifiesto la necesidad de establecer y aplicar planes de acción y protocolos en lo relativo a medir y mitigar la presencia de radón. Con ello, se evidencia la necesidad de conocer y controlar los procesos involucrados en el transporte del radón, así como los factores que favorezcan su acumulación en espacios que los miembros del público ocupan.

Figura 1: Procesos de liberación de radón en la atmósfera (Modificado de Ishimori et al., 2013)



El radón se origina en terrenos en presencia de rocas que contienen ^{238}U o ^{226}Ra . Tras decaer el precursor del radón (^{226}Ra), se genera energía suficiente para lanzar los átomos de radón desde el interior del grano de mineral y que éstos escapen de éste, alcanzando los espacios intersticiales del terreno, proceso denominado emanación (Thu et al., 2020). De aquí, como se muestra en la Figura 1, el radón se transporta hasta la superficie desde donde se libera a la atmósfera, proceso conocido como exhalación. Esta última etapa del transporte se

encuentra condicionada por factores como la difusión y advección del radón en el propio suelo, su composición geológica, el grado de saturación en agua y las condiciones meteorológicas que influyan sobre el paso de los átomos de radón que han alcanzado la superficie terrestre (Ishimori et al., 2013).

La presencia de radón exhalado de los terrenos y su tendencia a acumularse en el interior de recintos cerrados evidencia la necesidad de realizar mediciones de radón que permitan estimar los niveles que se alcanzan y, en consecuencia, estar en posición de intervenir ante las situaciones que supongan un riesgo para la salud de los ocupantes. Según sea el objetivo de cada medición se escoge el tipo de detector a utilizar, siendo comúnmente utilizados en medidas del promedio anual de concentración de radón detectores que utilizan un método de medida integrado como las trazas, carbón activo y electretes, así como métodos de medición en continuo. Estos últimos a su vez proporcionan la evolución de las concentraciones en el tiempo, pudiendo analizarse la influencia de variables que intervienen en el transporte de radón. Una ventaja principal de los métodos de medición integrados frente a la detección en continuo es la combinación de bajo coste y fiabilidad en las medidas (OMS, 2015). Sin embargo, hasta la fecha se utilizan para medidas en periodos largos como las concentraciones de radón en aire, pero no en mediciones de tasas de exhalación de radón.

Por ello el presente proyecto plantea un escenario en donde se estima, por medio de diferentes ensayos, tanto las concentraciones de radón en aire como la tasa de exhalación, haciendo uso para ello de la técnica de detección de trazas.

2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es desarrollar una metodología que, dado su bajo coste y fiabilidad, utilice detectores de trazas en mediciones de exhalación de radón. Los objetivos específicos que se integran dentro de este objetivo general son los siguientes:

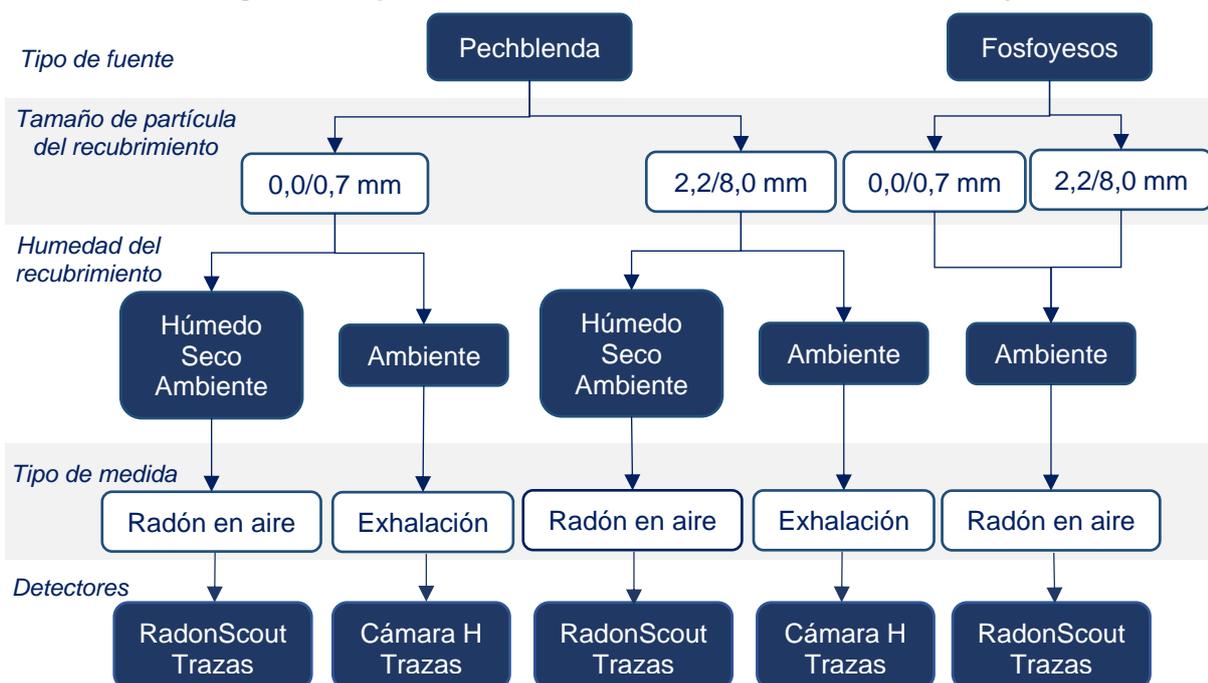
- Comparar las medidas de concentración de radón en aire determinadas por la técnica de trazas con las estimadas a partir de datos recopilados de medidas en continuo.
- Estudiar la influencia que tienen la humedad y el tamaño de partícula sobre el proceso de exhalación de radón a través de un medio poroso.
- Verificar la técnica de trazas en medidas de exhalación de radón.

3. Metodología

El montaje experimental donde se realizan los ensayos consta de un bidón como recipiente hermético en el que se introduce una fuente de radón sobre la que se deposita una capa de material sólido poroso, que actúa de cobertura, y los detectores con los que se realizan las medidas. Cada análisis consta de diversos ensayos en los que, variando el tipo de fuente, las características del medio poroso y los detectores incluidos en el montaje experimental, se ajusta el experimento a cada caso de estudio particular. La Figura 2 resume las características de los ensayos, especificando el tipo de fuente de radón utilizada, el tamaño de partícula y humedad del recubrimiento, así como el tipo de medida a realizar y los detectores utilizados para ello.

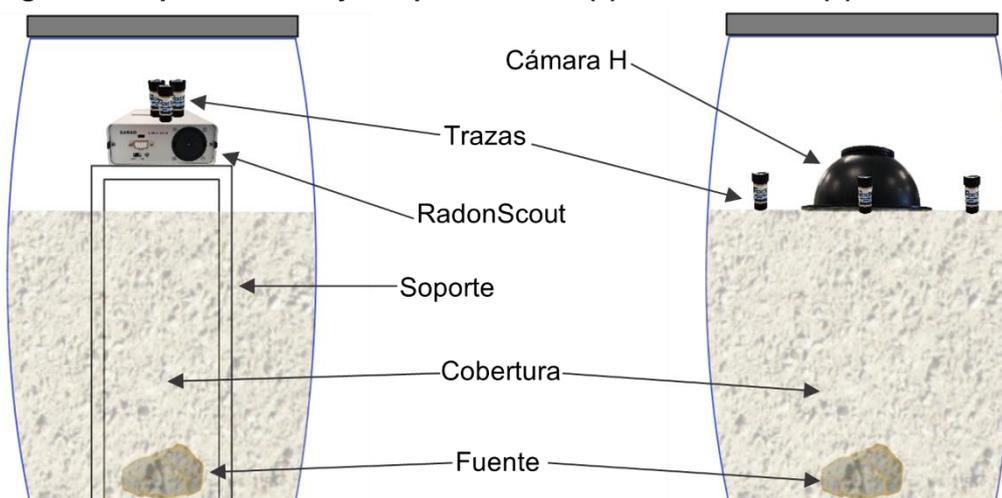
Se dispone de dos tipos de fuentes de radón, un mineral de uranio, pechblenda, con actividad de 1,83 kBq (131,6 kBq/kg), y fosfoyesos, que son residuos de la producción industrial de ácido fosfórico, con actividades de hasta 3,73 kBq/kg.

Figura 2: Esquema resumen de las características de los ensayos.



Se utilizan dos tipos de arenas como material de cobertura en los ensayos con ambas fuentes, unas con tamaño de partícula inferior a los 0,7 mm de diámetro y otras con diámetro comprendido entre 2,2 y 8,0 mm. El contenido en humedad se altera desde la situación inicial de las arenas, humedad ambiental, añadiendo agua o secándolas en estufa para obtener arenas mojadas y secas, respectivamente. En los ensayos se realizan dos tipos de medidas, análisis de la concentración de radón y medidas de exhalación de radón, en donde cada caso particular utiliza una técnica de detección junto con los detectores de trazas, para una posterior comparación.

Figura 3: Esquemas montajes experimentales (a) Radón en aire; (b) Exhalación



En el caso de los análisis de las concentraciones de radón en aire las medidas se realizan simultáneamente con el detector en continuo RadonScout y tres detectores de trazas. Los dispositivos se sitúan, tal y como se muestra en la Figura 3 (a), sobre un soporte que los mantiene elevados por encima de la cota superior de las arenas de recubrimiento. En las medidas de exhalación se disponen conjuntamente tres detectores de trazas y una cámara H

conectada a electrete sobre la cota superior de las arenas de recubrimiento, como indica la Figura 3 (b).

Las medidas de concentración de radón en aire se realizan durante periodos de tres días en los que se varía la humedad y el tamaño de partícula del recubrimiento, tal y como se resume en la Tabla 1. Se estudia también la influencia del tiempo de exposición en medidas de concentración de radón en aire utilizando detectores de trazas al variar la duración de los ensayos, para una misma fuente y medio, entre 1 y 5 días. Las medidas de exhalación tienen una duración de 6 horas, siendo los parámetros del medio de cobertura los que se indican en la Tabla 1.

La Tabla 1 resume las condiciones particulares de cada ensayo en donde se indica la información del tipo de análisis al que pertenece cada prueba, la fuente y los detectores utilizados, los parámetros cuya influencia es objeto de estudio en cada ensayo, así como el tamaño de partícula del medio ($\varnothing_{\text{medio}}$ en milímetros) y la presencia de humedad en el mismo.

Tabla 1. Esquema resumen ensayos experimentales

Análisis	Fuente	Detectores	Estudio influencia	$\varnothing_{\text{medio}}$ (mm)	Humedad
Radón en aire	Pechblenda	RadonSocut y trazas	Tamaño de partícula y humedad del medio de cobertura	0,0 – 0,7	Seco
				0,0 – 0,7	Mojado
				2,2 – 8,0	Seco
				2,2 – 8,0	Mojado
		Trazas	Tiempo de exposición	0,0 – 0,7	Ambiente
	Fosfoyesos	RadonSocut y trazas	Tamaño de partícula del medio de cobertura	0,0 – 0,7	Ambiente
Exhalación de radón	Pechblenda	Cámara H y trazas	Tamaño de partícula del medio de cobertura	0,0 – 0,7	Ambiente
				2,2 – 8,0	Ambiente

Por último, a partir de las concentraciones de radón en aire estimadas con los detectores de trazas, se calculan las tasas de exhalación que se darían, según tamaño de partícula y el contenido en humedad del medio de cobertura.

4. Resultados

4.1 Medidas de concentración de radón en aire

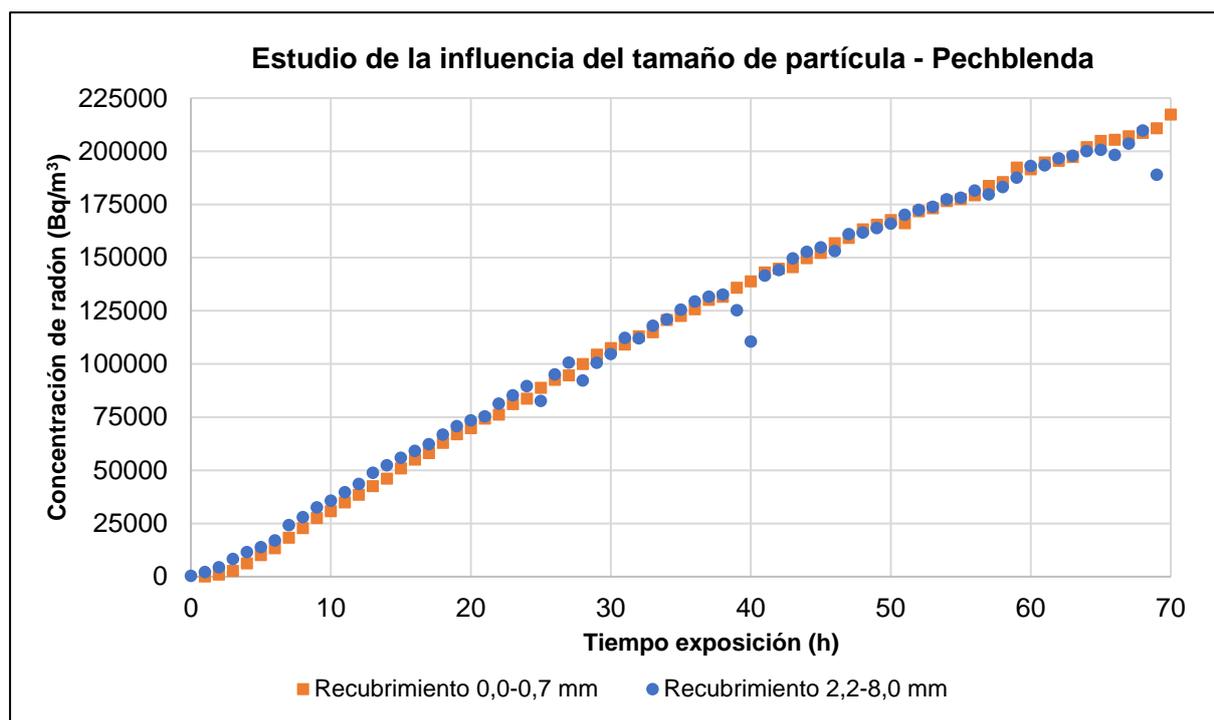
En los análisis de concentraciones de radón en aire se mide simultáneamente con el detector en continuo RadonScout y los detectores de trazas. El RadonScout devuelve un valor de concentración de radón en aire por hora transcurrida del periodo de exposición, mientras que con los detectores de trazas se estima el promedio de concentración de radón a lo largo todo el periodo. Es por ello por lo que para cada ensayo se ha registrado la evolución de concentraciones de radón con el RadonScout, la cual se ajusta a una función, sobre la que se calcula el área acumulada para su comparación con los resultados de los detectores de trazas.

Primeramente, se presenta la evolución de cada uno de los ensayos registrados por el RadonScout, que sirven de herramienta para examinar la influencia de los factores objeto de estudio. La Figura 4 presenta los resultados de los ensayos que utilizan la fuente natural de uranio, variando el tamaño de partícula de las arenas que actúan de medio de cobertura.

Como se observa, los valores de concentración de radón en aire registrados para ambas experiencias siguen la misma tendencia, no registrándose por lo tanto una diferencia significativa que derive del tamaño de partícula de las arenas.

Se compara el efecto de apantallamiento de las arenas por incorporación según su tamaño de partícula, analizándolas para ello en un detector de yoduro antes y después de la exposición. Se comprueba que en ambos casos las áreas de ^{214}Pb y ^{214}Bi registradas en el espectro de las arenas no presentan diferencias significativas atribuibles a la adsorción de radón en el medio, con lo que no actuarían de barrera al radón por incorporación de éste.

Figura 4: Influencia del tamaño de partícula sobre la concentración de radón en aire con pechblenda como fuente. (Acosta-Sabater, 2021)



La Figura 5 presenta la comparación de concentraciones de radón en aire, utilizándose en este caso los fosfoyesos como fuente de radón y variando el tamaño de partícula de las arenas que se encuentran a humedad ambiente. Los valores registrados inicialmente muestran un aumento en la concentración de radón, puesto que el radón tras ser exhalado se acumula en el aire interior del bidón. A medida que el ensayo transcurre el radón confinado en el bidón decae, llegando a superar las desintegraciones a la emanación de radón procedente de los fosfoyesos. En consecuencia, las evoluciones de concentración, tras alcanzar un valor máximo, empiezan a mostrar concentraciones de radón más bajas. Al igual que en el ensayo que utiliza la fuente de uranio natural, no se observan desviaciones significativas en las concentraciones de radón que puedan atribuirse al cambio de tamaño de partícula del recubrimiento. En ambos casos los errores asociados entre medidas se encuentran dentro del rango admisible de valores que establece el laboratorio.

La influencia de la humedad sobre las concentraciones de radón registradas cuando el medio de cobertura lo constituyen partículas de entre 2,2 y 8,0 mm y por debajo de los 0,7 mm se presenta en las Figuras 6 y 7, respectivamente.

Figura 5: Influencia del tamaño de partícula sobre la concentración de radón en aire con fosfoyesos como fuente. (Acosta-Sabater, 2021)

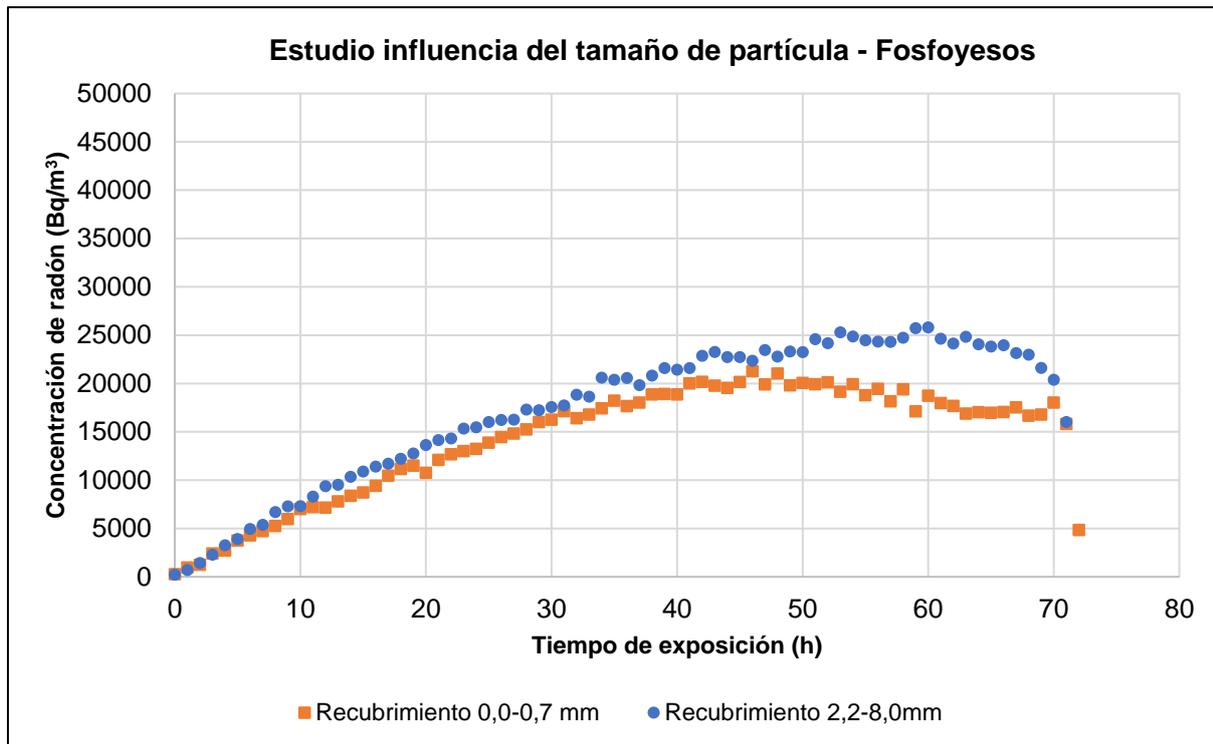
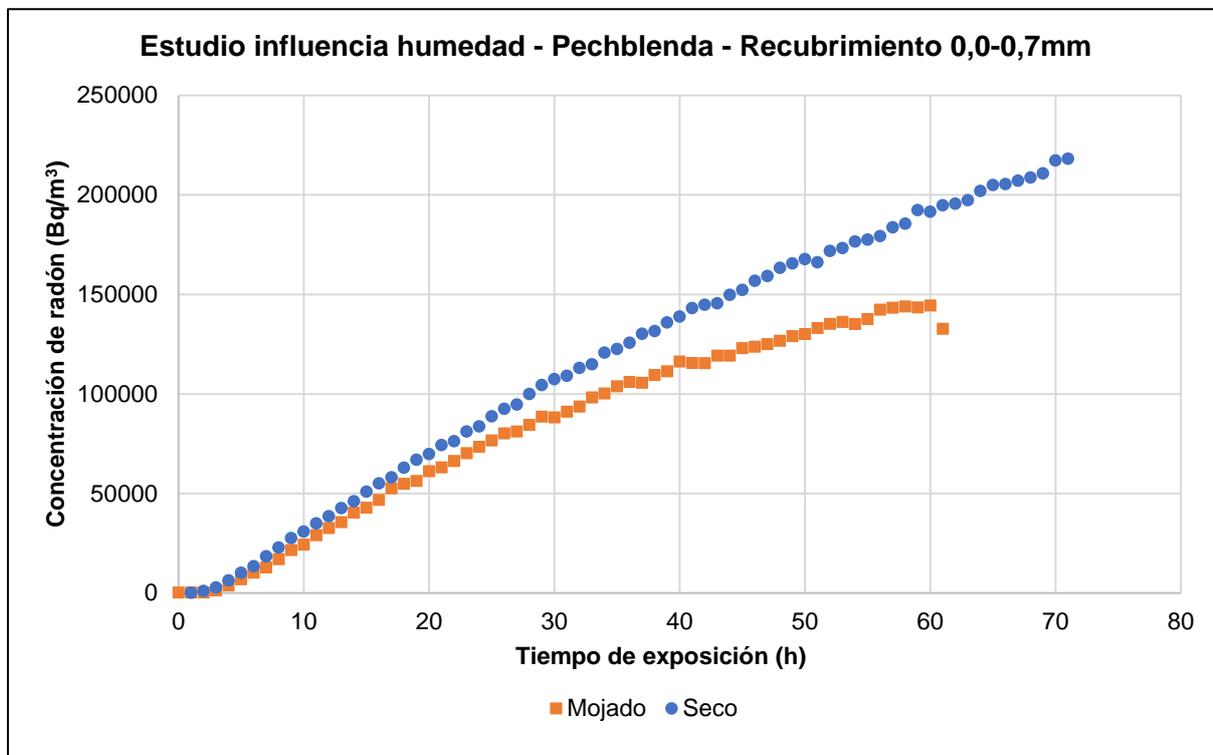
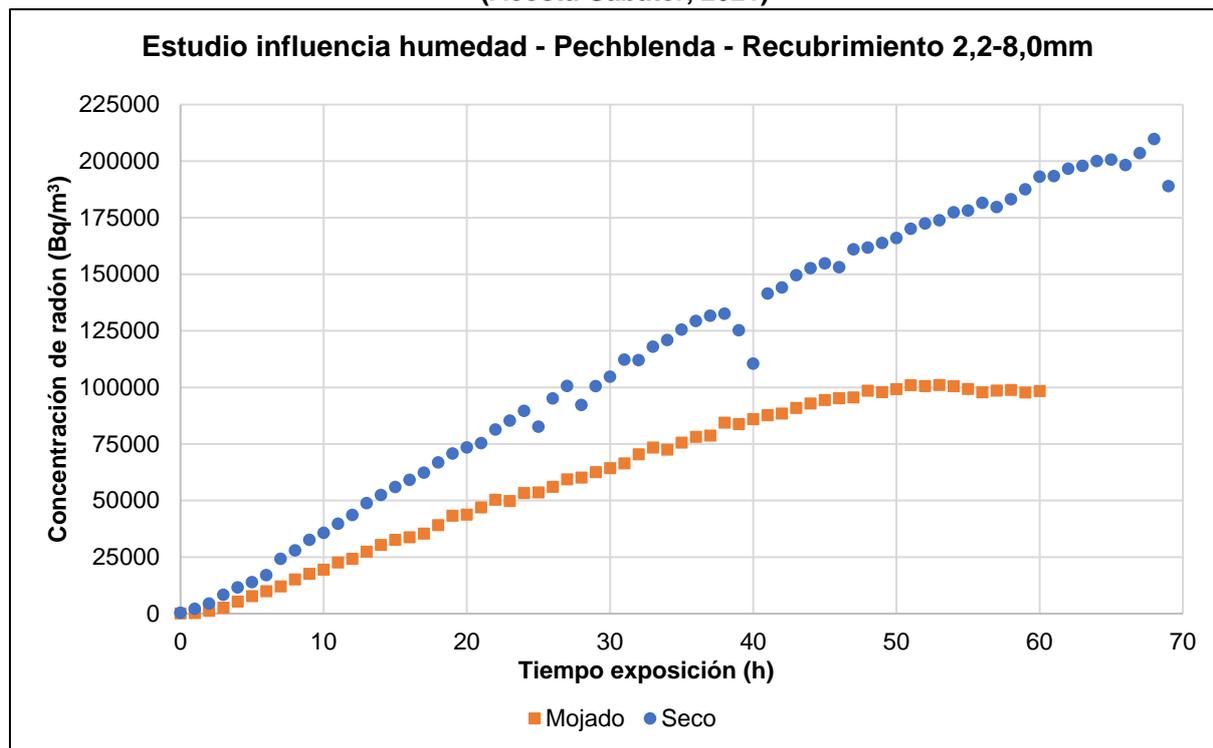


Figura 6: Influencia de la humedad en las arenas de tamaño de 0,0 a 0,7 mm de diámetro. (Acosta-Sabater, 2021)



**Figura 7: Influencia de la humedad en las arenas de tamaño de 2,2 a 8,0 mm de diámetro.
(Acosta-Sabater, 2021)**



La humedad de las arenas afecta sobre las concentraciones de radón en aire detectadas por el RadonScout. Para ambos tamaños de partícula la concentración de radón en aire observada es mayor cuando las arenas que actúan de recubrimiento se encuentran secas. Esto se debe a que el coeficiente de difusión del gas radón en aire es mayor que en agua (Ishimori et al., 2013). Por ello, los ensayos que presentan menores concentraciones en aire corresponden con los realizados con las arenas cuando éstas tienen un mayor grado de saturación en agua, ya que la presencia de ésta ralentiza la velocidad de difusión del radón al aire. A su vez, se observa que la diferenciación entre concentraciones de radón en aire es más pronunciada en el caso de las partículas de mayor diámetro. Esto se debe a que en este medio el agua se distribuye de manera menos homogénea, generándose zonas de acumulación en donde el gas radón quedaría retenido, impidiendo que se transporte y alcance la fase aire del radón.

La evolución temporal de las concentraciones de radón de cada ensayo, registradas con el detector en continuo RadonScout, se ajusta a una función, cuya integral equivale a la cantidad de radón total contabilizada en el aire durante el periodo de medida. La concentración de radón se obtiene a partir del cociente entre el área bajo la curva obtenida y la duración de las medidas. Tras el revelado de las trazas, se calcula para cada ensayo el valor promedio de los tres detectores que se compara con la concentración en aire registrada a partir del método de medida en continuo. Los resultados por ambos métodos, junto con el error relativo entre ambas técnicas se recogen en la Tabla 2.

El criterio de aceptación se fija en un valor de error relativo inferior al 25%. Gran parte de las comparaciones entre técnicas cumplen este criterio, por lo que en estos casos se considerará que las medidas son aceptables. De los resultados presentados en la Tabla 2 se observa que el ensayo con mayor error relativo es el que tiene un tiempo de exposición de 5 días. Esto se explica puesto que, tras una sobreexposición, las trazas dejarían de contabilizarse al saturar la película, dando lugar a infraestimaciones de la concentración de radón.

Tabla 2. Resultados ensayos concentración de radón en aire. (Acosta-Sabater, 2021)

Ensayo (según el tamaño y la humedad del recubrimiento)	Fuente	Tiempo exposición (días)	C _{Rn} RadonScout (Bq/m ³)	C _{Rn-promedio} Trazas (Bq/m ³)	Error relativo RadonScout vs trazas (%)
0,0-0,7 mm (ambiente)	Pechblenda	1	3,92E+04	3,42E+04	12,76
0,0-0,7 mm (ambiente)	Pechblenda	5	2,06E+05	4,24E+04	79,42
0,0-0,7 mm (seco)	Pechblenda	3	1,19E+05	8,77E+04	26,30
0,0-0,7 mm (mojado)	Pechblenda	3	8,18E+04	3,42E+04	5,75
2,2-8,0 mm (seco)	Pechblenda	3	1,15E+05	8,62E+04	25,04
2,2-8,0 mm (mojado)	Pechblenda	3	6,06E+04	5,71E+04	5,78
0,0-0,7 mm (ambiente)	Fosfoyesos	3	1,43E+04	1,52E+04	6,29
2,2-8,0 mm (ambiente)	Fosfoyesos	3	1,73E+04	1,71E+04	1,16

Tras la comparación de los resultados de concentración de radón en aire se observa que, en todos los ensayos, los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud. Lo que indica que ambas técnicas son aptas para realizar dichas medidas, siempre y cuando se tenga en consideración los parámetros influyentes que puedan limitar el proceso de medida, como sería el tiempo de exposición.

4.2 Medidas de exhalación de radón

El presente apartado recoge primeramente los resultados de las medidas de exhalación de radón realizadas durante un periodo de 6 horas aplicando dos técnicas: cámara H conectada a electrete y detectores de trazas. La exhalación de radón se calcula a partir de la concentración de radón registrada en cada cámara, que en el caso de la cámara H se obtiene a partir de la caída de voltaje durante la exposición (Rad Elec Inc., 1991). La concentración estimada a partir de cada técnica se traduce a tasa de exhalación de radón al aplicar la Ecuación (1) (Noverques et al., 2019).

$$E = \frac{V \cdot \lambda \cdot (C_{Rn} - C_0^{-\lambda \cdot t})}{S \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t))} \quad (1)$$

Siendo V el volumen de la cámara (m³), λ la constante de desintegración del radón (h⁻¹), C_{Rn} la concentración final de radón (Bq/m³), C₀ la concentración inicial de radón (Bq/m³), S la superficie de la cámara (m²) y t el tiempo de exposición (h).

Aplicando la Ecuación (1), particularizada para las dimensiones de cada cámara (trazas o cámara H), se obtienen los valores de exhalación de radón. En el caso del ensayo con el recubrimiento de mayor tamaño (2,2-8,0 mm de diámetro) el error relativo entre los resultados obtenidos por ambas técnicas se encuentra por debajo del criterio de aceptación del 25 %, concretamente en un 7,88 %, habiéndose registrado con las trazas un valor de exhalación de 49,1 Bq/m²/s frente a los 53,3 Bq/m²/s obtenidos con la cámara H. Por ello, se considera adecuado el uso de las trazas en medidas de exhalación. No obstante, sería conveniente confirmar la validación de esta técnica ampliando el estudio a un mayor número de ensayos y en distintas condiciones.

Tras comprobar que se pueden utilizar las trazas para la medida de exhalación de radón, se pasa a calcular la misma a partir de los resultados de concentración de radón en aire de los detectores de trazas comentados en el apartado anterior. La conversión se realiza aplicando

de nuevo la Ecuación 1 sobre los resultados de aquellos ensayos cuyo error relativo es inferior al criterio de aceptación del 25%. Los resultados de exhalación de radón estimados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de exhalación de radón a partir de los ensayos de concentración en aire. (Acosta-Sabater, 2021)

Ensayo (según el tamaño y la humedad del recubrimiento)	Fuente	Tiempo exposición (horas)	C _{Rn-promedio} Trazas (Bq/m ³)	Exhalación-Rn (Bq/m ² /s)
0,0-0,7 mm (ambiente)	Pechblenda	72	7,13E+04	8,75E+02
0,0-0,7 mm (ambiente)	Pechblenda	24	3,42E+04	1,06E+03
0,0-0,7 mm (mojada)	Pechblenda	72	7,71E+04	9,46E+02
2,2-8,0 mm (seca)	Pechblenda	72	8,62E+04	1,06E+03
2,2-8,0 mm (mojada)	Pechblenda	72	5,71E+04	7,00E+02
0,0-0,7 mm (ambiente)	Fosfoyesos	72	1,52E+04	1,86E+02
2,2-8,0 mm (ambiente)	Fosfoyesos	72	1,71E+04	2,10E+02

Al analizar los resultados de tasa de exhalación obtenidos, se observa la influencia de la tasa de emisión de la fuente, en donde una tasa mayor favorece notablemente la exhalación de radón (fuente pechblenda frente a fosfoyesos). Respecto al tamaño de partícula de las arenas, no se observan variaciones significativas atribuibles a este parámetro. La relación observada entre la tasa de exhalación y la humedad del medio coincide con el comportamiento observado para las concentraciones de radón en aire. La presencia de agua apantalla el transporte de radón a través de las arenas, disminuyendo en consecuencia la tasa de exhalación, lo que deriva posteriormente en concentraciones de radón en aire más bajas.

Con todo, los ensayos preliminares realizados muestran que los detectores de trazas pueden utilizarse para realizar medidas de exhalación de radón. No obstante, estos ensayos centran su análisis en suelos con altas tasas de exhalación que derivan en niveles altos de actividad. De cara a realizar medidas sobre suelos de baja actividad, en futuras líneas de investigación, la metodología propuesta debería aplicarse para su validación en este tipo de entornos.

5. Conclusiones

Los ensayos de concentración de radón evidencian que las arenas de recubrimiento no ejercen por sí mismas de barrera contra el radón, dado que no impiden el transporte del gas desde el fondo del bidón a la superficie. En lo referente al tamaño de partícula no se observan variaciones significativas atribuibles a este factor. Se observa que la humedad del medio poroso es un factor influyente sobre las medidas de concentración de radón, ya que el agua contenida en las arenas retiene parte de radón, apantallando en consecuencia su transporte por difusión y disminuyendo las concentraciones que se miden en aire.

Se ha verificado el uso de detectores de trazas en medidas de concentración de radón en aire para ensayos con fuentes con niveles de actividad significativos, comparándose los resultados con los de las mediciones en continuo del RadonScout. En este caso los resultados evidencian la influencia que el tiempo de medida y la tasa de actividad de la fuente tienen sobre las medidas. A su vez, se ha advertido que la comparación entre ensayos se ve favorecida durante periodos de exposición cortos, para fuentes con altas tasas, lo cual supone una característica a destacar dado que habitualmente las trazas suelen utilizarse en procesos de

medida de larga duración. Por otra parte, el uso de detectores de trazas en espacios con bajas tasas de exhalación quedaría pendiente de validación en investigaciones futuras.

Se ha formulado y aplicado una metodología que permite utilizar los detectores de trazas en medidas de exhalación, comparándose los resultados obtenidos con los de otra técnica de medida de exhalación habitual, la cámara H. Los resultados obtenidos indican que ambas técnicas serían comparables, siendo conveniente integrar en el futuro medidas bajo condiciones de ensayo más amplias que permitan validar este primer análisis.

Con los ensayos efectuados se ha validado el uso de detectores de trazas en medidas de exhalación de radón a escala de laboratorio. De cara a futuros trabajos de investigación, surge la motivación de adaptar la metodología de medida de exhalación por trazas a otros escenarios más complejos, como son, dada su gran variabilidad con respecto a condiciones atmosféricas, los suelos al aire libre. Esta aplicación de la metodología propuesta constituiría así una herramienta de detección que permitiría realizar medidas de manera rápida y con un bajo coste asociado. Así pues, el uso de esta herramienta de detección en suelos sobre los que se vaya a asentar una nueva construcción facilitaría el cumplimiento de las disposiciones de protección frente a la exposición al radón que exige tanto el Código Técnico de la Edificación como el reciente incorporado al reglamento español, el Real Decreto 1029/2022.

6. Referencias

- Acosta-Sabater, M. (2021). Desarrollo de una metodología para medir la exhalación de radón mediante la utilización de detectores de trazas. Trabajo de Fin de Máster, Universitat Politècnica de València.
- España. Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. *Boletín Oficial del Estado*, 21 de diciembre de 2022, núm. 224, pp. 178672-178732.
- INHST. (1999). *NTP 533. El radón y sus efectos sobre la salud*.
- Ishimori Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y. S., & Phaneuf, M. (2013). Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. *Technical Reports Series-IAEA no. 474*.
- Noverques, A., Verdú, G., Juste, B. & Sancho, M. (2019). Experimental radon exhalation measurements: Comparison of different techniques. *Radiation Physics and Chemistry*. 155, pp. 319-322.
- OMS. (2015). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*. (ISBN 978 92 4 354767 1) Organización Mundial de la Salud.
- Rad Elec Inc. (1991). *E-Perm System User's Manual*.5482, 1-45.
- Thu, H. N. P., Van Thang, N., & Hao, L. C. (2020). The effects of some soil characteristics on radon emanation and diffusion. *Journal of Environmental Radioactivity*. 216, 106189.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

