

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ANTI-RADÓN DE RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES PULVERULENTOS PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS BARRERAS PARA LA REDUCCIÓN NIVELES DE RADÓN EN INTERIORES

Juan José Tejado Ramos¹, Aitor Álvarez Toral²,
Javier Guillén Gerada³

¹ INTROMAC (Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción), Cáceres, España, juanjose.tejado@org.juntaex.es

² INTROMAC (Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción), Cáceres, España, aitor.alvarez@org.juntaex.es

³ LARUEX (Environmental Radioactivity Laboratory), Cáceres, España, fguillen@unex.es

Resumen

El radón es un gas radiactivo natural con riesgo para la salud, originado en determinados tipos de terrenos, que tras atravesar cimentaciones y muros, puede acumularse en el interior de los edificios. Normativas europeas y el CTE, contemplan el uso de barreras anti-radón para mitigar la entrada y acumulación del gas radón en interiores. El proyecto AislaRn (Proyecto IB24121-Junta de Extremadura) investiga la utilización de materiales pulverulentos procedentes de residuos o subproductos industriales, como aditivos para la fabricación de estas barreras. El uso de materiales con alta superficie específica incorporados en barreras anti-radón, busca la adsorción del gas, retrasando su difusión a través de la barrera. Paralelamente, el proyecto desarrolla un nuevo método para la determinación del coeficiente de difusión del radón en membranas, con el objetivo de comprobar las exigencias del CTE, la eficacia de la solución y las especificaciones técnicas de estas barreras desarrolladas con los aditivos investigados.

Palabras Clave: radón, edificios, barreras.

1 Introducción

El gas radón es un gas inodoro, incoloro e insípido que puede resultar peligroso debido a su radioactividad. Dicha radioactividad y su naturaleza gaseosa son la causa de que sea la causa de cáncer de pulmón más importante tras el tabaco [1]. Si bien la exposición al radón en sitios especiales como minas de uranio o centrales nucleares es importantísima (y por eso existe una estricta legislación al respecto), la mayoría de la población está expuesta al radón porque este gas está presente en sus hogares y/o en sus centros de trabajo. En los últimos años se está legislando con el fin de legislar sobre la exposición al radón en interiores (tanto en edificios residenciales como en lugares de trabajo), aprobándose un nuevo Código Técnico de la Edificación con una sección dedicada al radón, un Plan Nacional del Radón y una ley que obliga a medir los niveles de radón en lugares de trabajo situados en los municipios considerados de riesgo.

La causa de la exposición al radón en el interior de los edificios tiene lugar de la siguiente manera. El gas radón se produce por la desintegración radiactiva del radio, presente en forma de impurezas en ciertos minerales como, por ejemplo, el zircón. Al contrario que el resto de sustancias radiactivas, el radón es un gas, por lo que al formarse, éste intenta pasar del suelo a la atmósfera. La porosidad y la compactación de los suelos tienen una gran influencia a la hora de permitir o no la liberación del gas radón, lo que unido a la composición química de los mismos hace que ciertos tipos de suelos sean más propensos a liberar radón que otros (por ejemplo, generalmente es más probable que los suelos graníticos emitan radón que los suelos calizos). Cuando el radón llega al aire libre, este gas se disipa inmediatamente y no supone ningún problema, pero también puede colarse en el interior de los edificios, acumulándose en espacios poco ventilados y alcanzando niveles que suponen un riesgo significativo para la salud. Dado que el radón es un gas más pesado que el aire y además se genera en el terreno, los sótanos y las plantas bajas son más propensas a presentar elevados niveles de radón que las plantas superiores. En la Unión Europea se ha establecido 300 Bq m^{-3} como nivel de referencia, aunque los países pueden establecer niveles más bajos si así lo prefieren. Estos niveles de referencia no deben tomarse como niveles “seguros”, ya que la aparición de un cáncer de pulmón debido a la exposición al radón no es un proceso determinista, sino estocástico (el cáncer de pulmón puede aparecer en cualquier nivel de radón, aunque es más probable cuanto mayor sea la concentración de radón en el aire).

El CTE contempla 3 tipos de medidas anti-radón: las barreras anti-radón, los sistemas de despresurización del terreno y los espacios de contención ventilados. Asimismo, el CTE clasifica a los municipios según el riesgo de radón, basándose en el mapa del potencial de radón en España elaborado por el Consejo de Seguridad Nuclear. Los municipios clasificados como zona 1 tienen un riesgo de radón moderado, mientras que los clasificados como zona 2 tienen un riesgo de radón alto. Al respecto, el CTE establece una serie de obligaciones con respecto a las medidas anti-radón tanto a los edificios de nueva construcción como a las rehabilitaciones: los municipios de zona 1 deben de contar con al menos 1 de las 3 soluciones mencionadas, mientras que los de zona 2 deben de contar con una barrera anti-radón junto con otra medida a elegir entre el espacio de contención o la despresurización del terreno. La obligatoriedad de las medidas que se deben incorporar a los edificios viene determinada por la clasificación del municipio en el que se encuentren, no por la naturaleza del terreno sobre el que se encuentren ni por la cantidad de radón que éste libere realmente. Es posible y habitual que un edificio situado en un municipio clasificado como zona 2 se encuentre construido sobre un terreno que no libera radón, por lo que la instalación de las medidas anti-radón obligatorias es un gasto innecesario que no supone una disminución real de la exposición del radón de las personas que utilizan el edificio.

El proyecto MitigaRn (Proyecto IB20051-Junta de Extremadura) y posteriormente el proyecto AislaRn, que continúa las líneas de investigación del primero, fueron planteados para resolver diversas cuestiones con la mitigación del radón en los edificios: mapeo del radón en un municipio clasificado como zona 2, formulación de pinturas con aditivos anti-radón y realización de ejercicios de intercomparación para ensayos relacionados con el radón.

2 Trabajos realizados

2.1 Mapeo de radón en el municipio de Cáceres

Una de las tareas principales llevadas a cabo en el marco del proyecto MitigaRn fue la de la creación de un mapa de radón del municipio de Cáceres. Para ello se realizaron medidas de los

niveles de radón en el interior de edificios seleccionados. La selección de dichos edificios se llevó a cabo de manera aleatoria, pero asegurándose de la representatividad de los edificios seleccionados con respecto a la zona donde se encuentran (representativos en cuanto a la zona geológica en la que se encuentran como en cuanto a la tipología del edificio presente en el barrio/urbanización en cuestión). Las medidas se llevaron a cabo en edificios de los 4 núcleos de población del municipio de Cáceres: la Ciudad de Cáceres, Valdesalor, Rincón de Ballesteros y Estación de Arroyo-Malpartida, estando este último núcleo situado en un terreno cuya litología sería potencialmente propicia para causar altos niveles de radón en interiores.

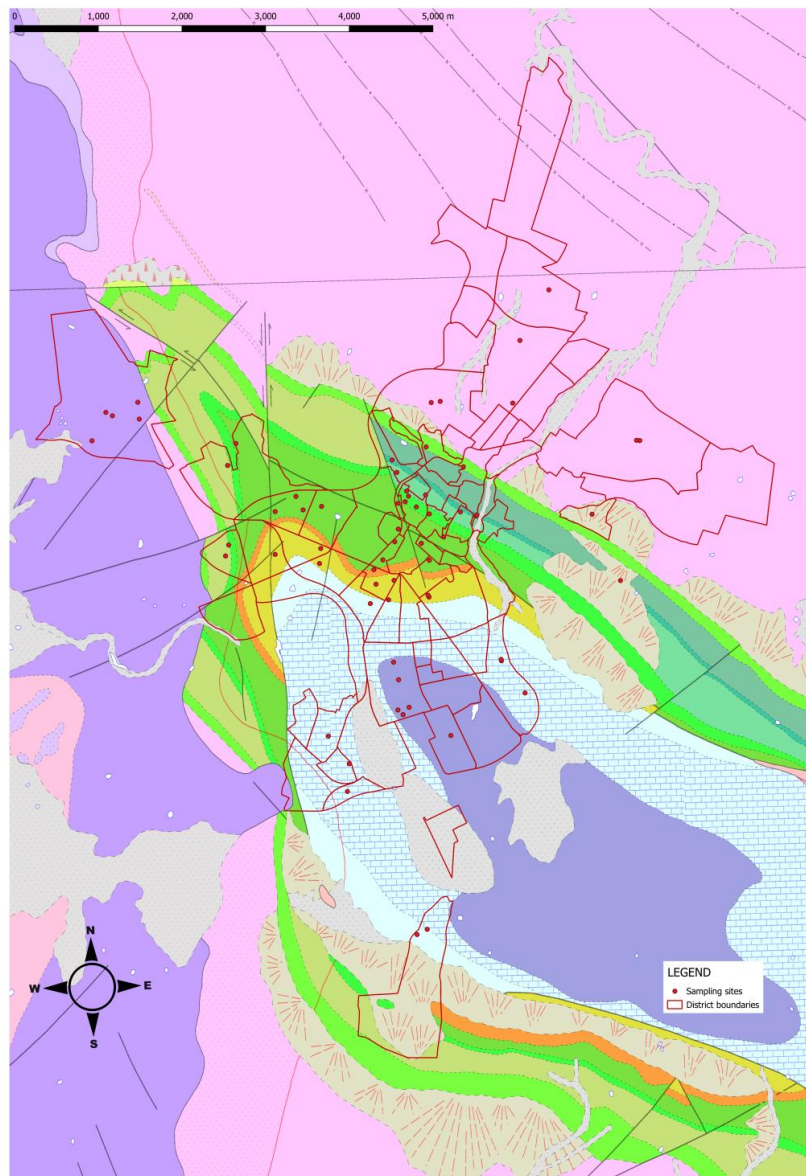


Figura 1. Mapa geológico de la ciudad de Cáceres, mostrando en rojo los límites de los distintos distritos de la ciudad y como puntos rojos la localización de los edificios en los que se hicieron las medidas.

Los mapas del muestreo en los otros núcleos de población del municipio, así como los resultados más detallados pueden encontrarse en [2].

2.2 Ejercicio de intercomparación de medidas de radón en interiores

En comparación con otros ensayos en los que se puede disponer de una muestra de referencia, la realización de ejercicios de intercomparación de medidas de radón en interiores presenta una serie de dificultades únicas. En primer lugar, la no existencia de un patrón, ya que no existe ningún edificio que presente niveles de radón constantes, homogéneos y conocidos. Algunos laboratorios han optado por realizar ejercicios de intercomparación utilizando fuentes de radón conocidas y manteniendo a los instrumentos de medición del radón en condiciones controladas en un laboratorio, pero utilizando esa metodología se pierde la oportunidad de realizar las mediciones en condiciones semejantes a las de un edificio real. En el ejercicio de intercomparación organizado en el marco del proyecto MitigaRn se buscó y se localizó un edificio con niveles altos de radón en el que se pudiesen realizar las medidas de radón de manera simultánea por parte de todos los laboratorios participantes. Los niveles de radón en dicho edificio oscilaban entre los 600 Bq m^{-3} y los 800 Bq m^{-3} , con picos de hasta 2000 Bq m^{-3} , lo que las hacía idóneos por ser lo suficientemente altos como para minimizar los efectos debidos a la naturaleza aleatoria de la desintegración del radón y lo suficientemente bajos como para resultar realistas y plausibles en un edificio con problemas de radón. Este ejercicio de intercomparación ha sido el primero de estas características realizado en España.

En este ejercicio de intercomparación participaron 12 laboratorios de toda España, tanto con detectores de radón de tipo pasivo (3 semanas de exposición) como de tipo activo (1 semana de exposición). La construcción, situada en el municipio de Hoyos (Cáceres), se encontraba en condiciones de habitabilidad, con el mobiliario e instalaciones necesarios para ello (véase Figura 2).



Figura 2. Fotos del edificio (izquierda) y la estancia (derecha) donde se realizaron las mediciones correspondientes al ejercicio de intercomparación.

La inmensa mayoría de ellos reportaron valores muy próximos entre sí, tanto para detectores activos como para detectores pasivos. Esto implica, además, un alto grado de compatibilidad de los resultados proporcionados por todos los participantes.

2.3 Formulación de pinturas anti-radón mediante el uso de residuos y subproductos pulverulentos como aditivos

Si bien el mapeo de radón y la realización del ejercicio de intercomparación eran tareas importantes del proyecto MitigaRn, el núcleo del proyecto era el desarrollo de barreras anti-radón de tipo continuo basadas en pinturas con aditivos que les concediesen propiedades anti-radón. Debido a su uso extendido como base para membranas impermeabilizantes se decidió utilizar una pintura de poliuretano (PU) como base, centrándose la investigación en el efecto de los aditivos añadidos a la pintura. Siguiendo los principios de la Economía Circular, los aditivos anti-radón investigados eran residuos y subproductos industriales o, en su defecto, productos de origen natural y renovables, de manera que la huella de carbono resultante fuese lo más baja posible.

La efectividad de los aditivos anti-radón se comprobaría mediante la determinación del coeficiente de difusión del radón en la membrana resultante. La determinación de dicho coeficiente de difusión presentó una serie de retos técnicos, lo cual motivó la necesidad de desarrollar un nuevo método, lo cual se consideró lo suficientemente ambicioso como para considerarse una línea de investigación propia (véase sección 2.4) que no se había definido al principio del proyecto. Independientemente de la manera empleada para determinar el coeficiente de difusión, la formulación idónea sería aquella que diese como resultado las membranas con el menor coeficiente de difusión. Cuanto menor sea este coeficiente, menor es la cantidad de radón que atravesaría la membrana y, por tanto, mayor sería la protección frente al radón.

Los aditivos anti-radón causarían que el radón difundiese más lento a través de la membrana o se detuviesen por el camino mediante uno o varios de estos mecanismos (en los 3 casos, a mayor concentración de aditivo, mayor es el efecto):

1) Desvío. Al toparse con una partícula de aditivo, el átomo de radón se desvía y es obligado a tomar un camino más largo. La naturaleza química y la superficie específica de los aditivos no ejercerían ningún efecto en este mecanismo.

2) Difusión lenta. Al toparse con una partícula de aditivo, el átomo de radón penetra en ella y difundiría más lentamente mientras la atraviesa. El tamaño de partícula y su superficie específica no tendría efecto apreciable en este mecanismo, pero la naturaleza química del aditivo sí sería muy importante.

3) Fisisorción. Al toparse con una partícula de aditivo, el átomo de radón se adsorbe en la superficie de la partícula, quedándose pegada pero sin formar enlaces químicos con el aditivo (al fin y al cabo, el radón es inerte químicamente). El átomo de radón se detiene, al menos temporalmente. El tamaño de partícula y su superficie específica, así como la naturaleza química del aditivo tendrían un efecto muy pronunciado en la difusión del radón.

El desarrollo de la formulación de la pintura anti-radón constó de las siguientes tareas:

1) Determinación de la porosidad, tamaño de partícula y superficie específica de los aditivos pulverulentos.

2) Estudio de la compatibilidad entre los aditivos y la pintura de poliuretano (así como del disolvente utilizado para diluir a la hora de aplicar la pintura en una superficie real). La mayor parte de los aditivos se podían añadir a la pintura hasta obtener concentraciones superiores al 20% sin problemas, pero algunos de ellos no lo permitía, porque el aditivo pulverulento absorbía completamente la pintura y ésta formaba un mazacote espeso y pegajoso que no se podía extender para pintar una superficie.

3) Determinación del coeficiente de difusión del radón. Utilizando el método descrito en la sección 2.4, se comprueba qué mezcla pintura-aditivo produce membranas con el menor coeficiente de difusión del radón.

Los aditivos pulverulentos (muy diferentes entre sí para corroborar o no la influencia de la afinidad química por el radón) que se estudiaron fueron:

- Atapulgita. Sólido pulverulento muy poroso. Naturaleza inorgánica, polar. La mezcla con poliuretano admitía un 20% de este aditivo sin problema.
- Cal. Sólido pulverulento con un tamaño de partícula muy pequeño. Naturaleza inorgánica, iónica. La mezcla con poliuretano admitía un 20% de este aditivo sin problema.
- Lodos de cantera. Residuo pulverulento producido al cortar granito. Tamaño de partícula muy pequeño. Naturaleza inorgánica, polar. La mezcla con poliuretano admitía un 20% de este aditivo sin problema.
- Negro de carbón. Subproducto pulverulento de la industria petrolífera, muy parecido al carbón activo. Tamaño de partícula muy pequeño y alta superficie específica. Naturaleza orgánica, apolar. La mezcla con poliuretano admitía como mucho un 10% de este aditivo.
- Cáscara de almendra triturada. Residuo agroindustrial pulverulento de aspecto fibroso y muy poroso. Naturaleza orgánica, polar. La mezcla con poliuretano admitía un 20% de este aditivo.
- Polvo de corcho. Residuo pulverulento producido al cortar corcho. Muy poroso. Naturaleza orgánica, polar. La mezcla con poliuretano admitía como mucho un 5% de este aditivo.

A pesar de que la mezcla con negro de carbón sólo tenía un 10% de aditivo, el negro de carbón fue el que produjo los resultados más prometedores con el radón, lo cual es indicativo que la apolaridad del aditivo adsorbente, que aumenta la afinidad química por el radón, tiene una gran influencia, por lo que el mecanismo de reducción del coeficiente de difusión mediante la adsorción del gas es un mecanismo muy relevante, así como también la superficie específica, aunque los otros 2 mecanismos propuestos es posible que también contribuyan significativamente.

2.4 Desarrollo de un nuevo método de difusión del radón

La norma ISO/TS 11665-13:2017 indica cómo realizar el ensayo de determinación del coeficiente de difusión del radón en membranas midiendo las concentraciones de radón a ambas caras de la membrana. No obstante los métodos descritos en la norma requieren un montaje experimental complejo y requieren del uso de detectores de radón que son monitores continuos de radón, los cuales son voluminosos y tienen un coste elevado. Con el fin de utilizar detectores de radón AlphaE (Bertin Technologies, Montigny-le-Bretonneux, France), que en vez de ser de tipo monitor continuo de radón son de tipo dispositivo de integración electrónico, mucho más baratos y compactos. El hecho de que fuesen mucho más pequeños hizo posible que en vez de tener que llevar el radón desde las cámaras de difusión hacia los detectores, se pudiesen introducir los detectores directamente en las cámaras, simplificando enormemente el montaje experimental. Como consecuencia secundaria, el diseño de las cámaras donde ocurre la difusión hubo de modificarse para acomodar los detectores.

Para comprobar la validez de los resultados obtenidos mediante este nuevo método de determinación del coeficiente de difusión del radón (basado en el de la norma ISO/TS 11665-

13:2017, pero con cambios significativos en el montaje experimental), se determinó el coeficiente de difusión de barreras anti-radón cuyo coeficiente de difusión fuese conocido (ya sea por los certificados de fabricante o por la bibliografía). Los resultados obtenidos presentaron gran concordancia con los esperados. Estos resultados se recogieron en un artículo publicado en la revista *Construction and Building Materials* [3].

2.5 Aplicación de la solución desarrollada en condiciones reales

La mezcla pintura-aditivo que presentaba los resultados más prometedores (PU + 10% de negro de carbón) se probó *in situ* en un edificio real con problemas de altos niveles de radón. Dicha vivienda tenía un hueco debajo de una escalera que habitualmente se encontraba cerrado y se solía usar como trastero o despensa. En este hueco de la escalera se habían encontrado niveles de radón de hasta 2500 Bq m^{-3} . La verificación *in situ* de la eficacia de la barrera anti-radón se realizó midiendo los niveles de radón en la zona intervenida una semana antes y una semana después de aplicar la pintura anti-radón. La aplicación de la pintura anti-radón requirió de la utilización de la cantidad de disolvente especificada por el fabricante, empleando una mezcladora. El pintado se llevó a cabo utilizando un rodillo y brocha, tal y como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Fotos de la aplicación de la pintura anti-radón con brocha y rodillo en el hueco de la escalera intervenido.

Los resultados resultaron muy positivos: antes de la aplicación de la pintura los niveles de radón en el hueco de la escalera estaban por encima de 1900 Bq m^{-3} y después de la aplicación quedaron por debajo de 700 Bq m^{-3} , llegando a la conclusión de que dicha pintura es capaz de reducir los niveles de radón en al menos un 50%.

2.6 Del proyecto MitigaRn al proyecto AislaRn

Las líneas de investigación que ha abierto el proyecto MitigaRn resultaron ser lo suficientemente interesantes y prometedoras como para escribir un nuevo proyecto que continuase con las tareas realizadas en el proyecto anterior. A la hora de plantear el nuevo proyecto, llamado AislaRn, se tuvieron muy en cuenta los puntos críticos del MitigaRn y los aspectos del primer proyecto que tenían margen de mejora.

En primer lugar, resultando evidente que, tras haber realizado un Análisis de Ciclo de Vida muy básico, la mayor contribución a la huella de carbono de la pintura anti-radón se debía al poliuretano, se decidió que el nuevo proyecto investigaría el desarrollo de nuevas pinturas anti-radón basándose en pinturas ecológicas, pinturas al agua (que tienen un impacto ambiental mucho menor que las pinturas al disolvente como el poliuretano) y otros tipos de pinturas y barnices cuyo impacto ambiental sea reducido. Se decidió también que se seguirían

investigando nuevos aditivos anti-radón, también basados en residuos y subproductos industriales (o, en su defecto, en productos naturales de origen renovable), con la finalidad última de producir pinturas que brinden a los edificios la máxima protección frente al radón con unos impactos ambientales asociados lo más bajos que sea posible y razonable.

En segundo lugar, el método de determinación del coeficiente de difusión del radón desarrollado en el marco del proyecto MitigaRn tenía 2 aspectos de mejora evidentes. Por un lado, la sensibilidad era suficiente para determinar barreras con coeficientes de difusión iguales o superiores a los que indica el CTE ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), pero insuficiente para determinar con exactitud las barreras anti-radón más eficaces. Se han planteado varias estrategias a investigar para mejorar la sensibilidad y el límite de detección. Otro aspecto a mejorar es que el ensayo causa cierto deterioro de la señal registrada por los detectores, haciendo que, a lo largo del tiempo y tras realizar múltiples ensayos, la señal de fondo aumente significativamente, lo cual forzaba a realizar calibrados cada vez más frecuentes. Se investigarán diversas estrategias para reducir el deterioro de la señal controlando el cómo y el cuándo se realiza la exposición de los detectores a los niveles altos de radón. Por todo ello, se espera que, al finalizar el proyecto AislaRn, se disponga de un método mejorado.

En tercer lugar, los cálculos necesarios para la determinación del coeficiente de difusión resultan muy complejos y conllevaban la utilización de un software cuyo uso era poco intuitivo. Por ello, para el proyecto AislaRn se propuso que incorporase el desarrollo de un software de uso intuitivo para la realización de dichos cálculos.

En cuarto lugar, dado que hay pocos laboratorios en España (o incluso en toda Europa) que hagan los ensayos de determinación del coeficiente de difusión del radón en membranas y no hay constancia de que se haya hecho un ejercicio de intercomparación relacionado, se ha propuesto que el proyecto AislaRn haga un ejercicio de intercomparación, que a diferencia del realizado en el marco del proyecto MitigaRn, trate sobre los ensayos de determinación de dicho coeficiente de difusión.

En quinto lugar, se añadieron 2 nuevas líneas de investigación relacionadas con el radón. Por un lado, la creación de elementos BIM para la representación de barreras y otros elementos constructivos para la mitigación del radón. Por otro lado, las barreras desarrolladas se someterán a ensayos complementarios (resistencia al fuego, adherencia, etc.), así como otros estudios complementarios (posible marcado CE), que darán mucha información sobre la posible aplicabilidad de las barreras anti-radón, así como de la viabilidad técnica y económica de su fabricación a escala industrial y su entrada al mercado.

3 Bibliografía

- [1] World Health Organization. (2009). *WHO handbook on indoor radon: A public health perspective*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>
- [2] Tejado-Ramos, J.-J., Alvarez-Toral, A., Guillén, J., Carmona-Carmona, M., & Muñoz-Almaraz, F. J. (2024). Methodology for assessment of radon diffusion coefficients in membranes, used as radon barriers in construction and refurbishment. *Construction and Building Materials*, 414, 134967. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134967>
- [3] Tejado-Ramos, J.-J., Alvarez-Toral, A., & Guillén, J. (2026). Evaluating overestimated radon risk in predictive maps: A case study of cáceres municipality. *Journal of Environmental Radioactivity*, 291, 107846. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107846>