

Exposición laboral a radón: Aspectos básicos y efectos para la salud.

*Occupational exposure to radon: basic aspects and health effects.
Exposition professionnelle au radon: principes de base et effets sur la santé.*

Autor:

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo
(INSST), O.A., M.P.

Elaborado por:

Dolors Giménez Montero.
Miguel Ángel Alba Hidalgo.
Sonia Mollar Bonilla.
Sara Patricia González Hurst.
CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO (INSST)

Marta García de Herreros.
Teresa Gorría.
Laura Mezquita.
HOSPITAL CLÍNIC DE BARCELONA

La presente Nota Técnica de Prevención (NTP) actualiza las NTP 440 y NTP 553. Es la primera de las dos NTP dirigidas a proporcionar información para una gestión adecuada del riesgo de la exposición laboral a radón.

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

El radón es un gas radioactivo de origen natural procedente de la corteza terrestre. Se trata de una sustancia incolora, inodora e insípida, por lo que no es posible la percepción directa por parte del ser humano. Pertenecer a la familia de los gases nobles, que no reaccionan químicamente en condiciones normales de temperatura y presión. Dada su presencia en mayor o menor cantidad en toda la corteza terrestre, el radón constituye la principal fuente de exposición a radiación ionizante del conjunto de la radiación de origen natural.

Dadas las características del radón, la vía principal de entrada en el organismo es la inhalatoria. Como radionucleido, el radón emite radiación ionizante que, en el caso de los seres vivos, puede afectar a la estructura y dinámica celular aumentando la probabilidad de que aparezca el cáncer. Los primeros casos de cáncer de pulmón derivados de la exposición a radón aparecieron en personas trabajadoras de las minas de uranio, radionucleido cuya desintegración genera, entre otros elementos, el radón. En 1988, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) clasificó al radón como cancerígeno del grupo 1, donde se incluyen aquellos carcinógenos sobre los que hay pruebas suficientes que confirman su capacidad de causar cáncer a los humanos.

La protección radiológica frente a la exposición a radón se basa en los criterios específicos recogidos en el Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (RPSI) y en el Real Decreto 1217/2024, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento

sobre instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes (RINR). En la NTP 1228 se aporta la información relevante para llevar a cabo una gestión adecuada del riesgo de exposición al radón en los lugares de trabajo.

2. ORIGEN Y NATURALEZA DEL RADÓN

Existen en la naturaleza tres isótopos principales de radón (Rn), es decir, átomos del mismo elemento con el mismo número de protones y diferente número de neutrones en el núcleo: Rn-219, Rn-220, y Rn-222. Proceden de tres grandes cadenas de desintegración radiactiva: la del uranio-238, la del uranio-235 y la del torio-232. Se llama cadena de desintegración al conjunto de los radioisótopos que se generan durante el proceso mediante el cual un isótopo radiactivo decae en otro isótopo (llamado hijo), y este a su vez decae o se desintegra en otro isótopo y así sucesivamente hasta alcanzar un isótopo estable.

Durante el proceso de decaimiento se desprende radiación ionizante, que puede ser corpuscular (partículas alfa (α) o beta (β)) o electromagnética (radiación gamma (γ)). La energía que emiten depende del isótopo radiactivo del que se originan, si bien sus características son muy distintas. La radiación α deposita mayor cantidad de energía por unidad de distancia, dado su mayor tamaño (dos protones y dos neutrones del núcleo del átomo), siendo absorbida por el primer tejido biológico con el que entra en contacto. Sin embargo, este tipo de radiación, al ser más pesada tiene menor poder de penetración, puede ser blindada por materiales ligeros, como el papel. Es la radiación que se

tiene en cuenta para desarrollar los criterios de protección radiológica en relación con la exposición a radón.

El tiempo en el que la mitad de los átomos de un radionucleido se desintegran en otro se denomina periodo de semidesintegración. Se trata de un parámetro relevante en cuanto a la presencia del radionucleido. Los radionucleidos padres de las cadenas y que dan origen

a los tres isótopos del radón tienen un periodo de semidesintegración del orden de millones de años, por lo que su presencia es continua en la corteza terrestre y seguirán actuando como fuentes de radón. En la tabla 1 se indican los periodos de semidesintegración de los isótopos del radón:

El radón-222 es el isótopo más relevante de los tres,

Radionucleido inicial	Isótopo radioactivo de radón	Denominación	Periodo de semidesintegración
U-235	Rn-219	Actinón	4,0 segundos
Th-232	Rn-220	Torón	56 segundos
U-238	Rn-222	Radón	3,8 días

Tabla 1. Origen de los isótopos radiactivos del elemento radón, denominación y periodo de semidesintegración.

desde el punto de vista de la protección radiológica, dada su elevada presencia en la corteza terrestre y su mayor periodo de semidesintegración.

En la figura 1 se muestra la cadena de desintegración en la que se genera el radón-222, que se desintegra dando lugar a su progenie (hijos). El único elemento de la cadena en estado gaseoso en condiciones ambientales es el radón, el resto son elementos sólidos. La progenie de corto periodo de semidesintegración está formada por metales pesados (polonio-218, plomo-214, bismuto-214 y polonio-214), los cuales tienen tendencia a adherirse a

las partículas de los aerosoles presentes en el ambiente. El RPSI define la exposición a radón como “exposición al radionucleido Rn-222 y su progenie de corto periodo de semidesintegración”. La exposición a torón, también un gas con progenie de corto periodo de semidesintegración, se encuentra incluida en el RPSI, si bien no se establecen pautas específicas de actuación dado que no se han detectado situaciones que puedan generar un riesgo significativo desde el punto de vista de la protección radiológica.

La densidad del gas radón a 0 °C y 1 atm es 9,73 g/L,

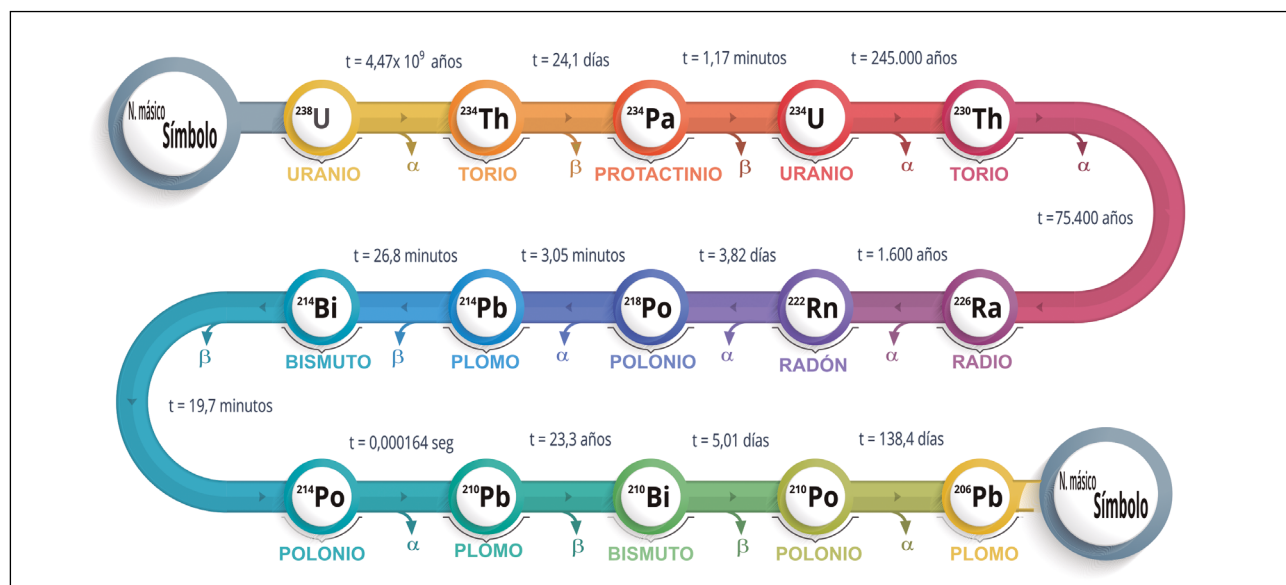


Figura 1. Cadena de desintegración del uranio-238 y sus descendientes principales junto con las radiaciones ionizantes emitidas y los periodos de semidesintegración de cada radionucleido.

significativamente superior a la del aire (7,5 veces). Esto hace que en recintos cerrados tienda a acumularse en las zonas inferiores, siendo aspectos como la ventilación y las variaciones en presión y temperatura los que regulen su circulación.

El radón es un gas soluble en agua y su solubilidad disminuye con el aumento de temperatura (a 30 °C es tres veces inferior a la correspondiente a 0 °C).

3. PARÁMETROS DE CUANTIFICACIÓN

Dada la relevancia de la presencia de radón en recintos ocupados por las personas se debe, por un lado, cuantifi-

car su nivel para poder valorar la situación de cada recinto, midiendo la concentración de radón y, por otro, como fuente de radiación ionizante, cuantificar su absorción y el efecto en el cuerpo humano, determinando la dosis efectiva anual en las personas trabajadoras.

La *concentración de actividad del radón en aire*, comúnmente abreviada como *concentración de radón*, se expresa, conforme al Sistema Internacional de unidades (SI), en becquerelios por metro cúbico (Bq/m³). Un becquerelio equivale a una desintegración nuclear por segundo, es decir, si la concentración de radón es de 50 Bq/m³, en un segundo se estarían desintegrando 50 átomos de radón por cada metro cúbico de aire.

Dado que la concentración de actividad del radón en aire

procede de la naturaleza, la normativa determina un nivel de referencia, como valor a tomar en consideración, que no se debe tratar como un límite ya que no es posible limitar la acción de la naturaleza. Sí que es viable llevar a cabo acciones para mejorar las situaciones de exposición, y ese nivel de referencia se ha de considerar con este objetivo. El valor de referencia de la concentración de radón en el aire, conforme a la normativa vigente (artículo 72 del RPSI), es 300 Bq/m³ y se establece para el promedio anual de dicha concentración.

La *dosis efectiva* expresa la cantidad de radiación absorbida por una persona, incluyendo la ponderación en cuanto al potencial de causa de daños del tipo de radiación ionizante y la sensibilidad de los diferentes tejidos y órganos a dicha radiación. Se expresa, conforme al SI, en sievert (Sv), 1 Sv es 1 julio por kilogramo (J/kg). En protección radiológica es más frecuente considerar la milésima parte de esta unidad, el miliSievert (1 mSv = 0,001 Sv).

En los lugares de trabajo, la adopción de medidas de protección radiológica vendrá condicionada por los valores de dosis efectiva derivada de la exposición a radón a los que puedan estar expuestas las personas trabajadoras. Para el cálculo de la dosis efectiva anual de una persona trabajadora se emplean: el promedio anual de concentración de radón, el tiempo de exposición anual y el coeficiente de dosis efectiva. Este coeficiente incluye la ponderación mencionada en el párrafo anterior y el factor de equilibrio del radón respecto a su progenie. Con el fin de facilitar la determinación de la dosis efectiva anual, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha publicado los valores de dichos coeficientes en su página web, basándose en los criterios de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP en inglés).

4. PRESENCIA DEL RADÓN EN LUGARES DE TRABAJO

En los lugares de trabajo exteriores la liberación de radón procedente del terreno, mediante el proceso de exhalación, da lugar a una baja concentración de este, dado el gran volumen de aire en el que el radón se diluye en los espacios abiertos. Aunque haya influencia de los factores que se van a mencionar a continuación, la concentración media de radón-222 en el exterior es del orden de 10 - 20 Bq/m³ y, por tanto, desde el punto de protección radiológica, se considera que el riesgo para las personas trabajadoras es despreciable.

Los lugares de trabajo donde la presencia de radón es relevante son aquellos que ocupan recintos cerrados, es decir, espacios a los que puedan acceder las personas trabajadoras y que están delimitados por elementos arquitectónicos o estructuras artificiales o naturales que los separan del ambiente exterior o de otros espacios interiores. La concentración de radón en recintos cerrados está determinada por los factores geogénicos, climáticos y antropogénicos, que se describen a continuación.

Factores geogénicos y climáticos

Las características geológicas constituyen el principal factor que incide en la cantidad de radón que puede liberar un terreno. Por ello, el terreno donde se ubica un recinto cerrado influye de forma determinante en la concentración de radón que puede existir en el mismo, habitualmente constituye la fuente de radón más relevante.

Tras la desintegración del Ra-226 (padre del radón) en el terreno, los átomos de radón producidos, para poder llegar a la atmósfera, deben escapar de las partículas del suelo y pasar a los poros llenos de aire y de estos a desplazarse

hasta la atmósfera. El paso desde las partículas del suelo al aire de los poros (emanación) se debe principalmente al movimiento de retroceso de los átomos de radón al desintegrarse el radio. El paso del radón desde los poros a la atmósfera se llama exhalación. El transporte de radón se produce por difusión y por convección:

- La difusión es el flujo que depende de la diferencia de concentraciones del gas existente entre un espacio y otro, desplazándose desde el espacio con mayor concentración al de menor concentración. Las concentraciones de radón en el aire que se encuentran bajo el suelo, de acuerdo con estudios realizados en diferentes tipos de terrenos suelen oscilar entre 5 y 100 kBq/m³, por tanto, existe una clara difusión desde el terreno hacia el ambiente exterior, o bien al interior de un recinto, lugares donde las concentraciones son habitualmente inferiores.
- La convección es el flujo que depende de la diferencia de presión entre los dos espacios, desplazándose de mayor a menor presión.

Tanto la difusión como la convección están influidas por características del terreno como su porosidad y su permeabilidad.

La cantidad de radón exhalada vendrá determinada por los siguientes factores geogénicos y climáticos:

- Composición del terreno.
Los suelos con un elevado contenido en uranio son los que generan mayor exhalación de radón. En función de su origen las rocas se clasifican en sedimentarias, metamórficas y magmáticas, siendo, en general, las concentraciones medias de uranio más bajas en las sedimentarias, como la caliza o arenisca, y las más altas en las magmáticas, como el granito. Sin embargo, pueden encontrarse concentraciones elevadas de uranio en todos los tipos de rocas en forma de impregnaciones en depósitos sedimentarios, como es el caso de las arcillas, o en forma de vetas en rocas metamórficas o magmáticas.
- Humedad del terreno.
La concentración de radón en el agua depende de la presión parcial del gas en contacto con el líquido y, dicha presión suele ser elevada en los poros del terreno, por lo que se alcanzan concentraciones de radón altas en las aguas subterráneas. Por tanto, un contenido elevado de agua en un terreno, que puede ser provocado por la lluvia, implica una mayor retención del radón y, por otro lado, el movimiento del agua en las capas freáticas favorece el desplazamiento del radón al ser disuelto por el agua subterránea. En las aguas superficiales no se mantienen altas concentraciones ya que, en la atmósfera, la presión parcial del radón es mucho más baja.
- Permeabilidad del terreno.
Es la propiedad que indica la capacidad de que los gases o líquidos fluyan a través de él. Depende de la porosidad, así como de las formas de los poros y su nivel de conexión, influyendo en la difusión y convección del radón. La permeabilidad del terreno está relacionada además con su humedad, a mayor humedad menor permeabilidad para el radón. Los suelos compactos o arcillosos tienen menor porosidad y permeabilidad y, por lo tanto, retienen más el radón, mientras que los suelos fragmentados y permeables, como las rocas calcáreas, facilitan el desplazamiento del radón.
- Presión atmosférica, temperatura y viento.
Cuando disminuye la presión atmosférica de una zona, aumenta el flujo de radón por convección desde el terreno hacia la misma. Por otro lado, en un edificio las diferencias de temperaturas entre el exterior y el

interior y la incidencia del viento pueden provocar reducción de la presión atmosférica en las zonas inferiores, de manera que se facilite la entrada de radón en el mismo.

Factores antropogénicos

Las decisiones que se toman en cuanto al diseño, construcción y mantenimiento de los recintos cerrados y las actividades que se desarrollan en ellos influyen en la presencia y acumulación del radón en estos recintos, en los que, además del terreno como fuente de radón, pueden estar presentes las siguientes fuentes:

- **Materiales de construcción de la estructura del recinto.**
La mayor parte de los materiales de construcción son elaborados a partir de piedras, gravas, rocas o arcillas que contienen radionucleidos naturales. En general, se estima que su contribución a la concentración media de radón en el interior de los recintos está entre 10 y 20 Bq/m³, si bien en algunas situaciones excepcionales se puede llegar a los 1000 Bq/m³. Actualmente, el RPSI regula la emisión de radiaciones ionizantes en la comercialización de los materiales de construcción.

- **Agua de origen subterráneo utilizada en el lugar de trabajo.**

Su mayor movimiento en sistemas abiertos, como canales o bañeras de hidromasaje, o a mayor temperatura, incrementan la cantidad de radón que puede pasar al ambiente. El hecho de que el contenido en radón en las aguas para el consumo humano esté regulado supone que esta fuente no sea relevante, a excepción de recintos en los que la actividad principal consiste en el uso de aguas subterráneas, por ejemplo, para el tratamiento corporal y baño de personas con aguas termales.

- **Materiales radioactivos de origen natural que forman parte del proceso industrial o se almacenan en un recinto cerrado.**

En algunas instalaciones, como las de retirada de lodos en los procesos de extracción de gas y petróleo o los almacenes de fosfoyeso o de circón, los materiales presentes contienen radio-226 en su composición, dando lugar a la emisión de radón.

La presencia de las mencionadas fuentes y los aspectos que se indican a continuación generarán una mayor o menor concentración de radón en un recinto cerrado:



Figura 2. Rutas de entrada del radón en recintos cerrados.

- Proximidad al terreno: los espacios situados en el subsuelo o a nivel del suelo tendrán en general concentraciones más elevadas que los de mayor altura.
- Características constructivas que incidan en el aislamiento del suelo, muros o paredes respecto al terreno con el que están en contacto directo o respecto a zonas con probable acumulación de radón. Son relevantes la permeabilidad de los materiales frente al radón, la presencia de grietas y fisuras o cavidades en muros y paredes, así como la existencia de espacios alrededor de canalizaciones y líneas de servicio (figura 2).
- Sistemas de ventilación y acondicionamiento térmico. Una adecuada renovación del aire del recinto reducirá la acumulación de radón en el mismo. Cuando la presión atmosférica en el interior de un recinto en contacto con el terreno sea inferior a la del aire del terreno, se favorecerá la entrada del radón. Esta modificación de la presión puede ser generada tanto por los cambios de temperatura que originan estos sistemas, como los caudales de aire y su distribución durante su funcionamiento. Por otro lado, puede producirse un transporte del radón hacia las zonas superiores de un edificio debido al flujo convectivo que genera un aumento de la temperatura en zonas inferiores.

Distribución del radón en el territorio español

La cantidad de radón exhalada por los suelos es muy variable dada la gran diversidad geológica. El CSN ha elaborado un mapa de potencial de radón que está disponible en la página web del CSN, en su apartado de protección radiológica frente a la radiación natural, radón (<https://www.csn.es/ca/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>). Para su elaboración se ha empleado la base de datos de mediciones de radón tomadas en la planta baja de viviendas, o en el primer piso si esta no está habitada, la tasa de exposición a radiación gamma terrestre y el mapa litoestratigráfico, de permeabilidades e hidrogeológico de España. En base a ello se han podido categorizar las zonas en función de sus niveles de radón y, en particular, identificar aquellas en las que un porcentaje significativo de los edificios residenciales presentan concentraciones superiores a 300 Bq/m³. A partir de esta información se ha elaborado el listado de términos municipales de actuación prioritaria al que se refiere la normativa vigente. El amplio número de mediciones que se desarrollen en base a la aplicación de la normativa aportarán información relevante en el proceso de actualización del mapa.

5. EFECTOS DEL RADÓN SOBRE LA SALUD

Los efectos del radón sobre la salud se derivan de su naturaleza radioactiva por lo que son de carácter probabilístico o estocástico, es decir, no todo el personal expuesto a las mismas concentraciones de radón tendrá un efecto o no tendrá el mismo efecto. La probabilidad de que el radón cause efectos en la salud aumenta con la dosis efectiva de radiación recibida.

En 1988, la IARC, clasificó el radón como cancerígeno para los seres humanos (grupo 1). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que el radón es responsable del 3 al 14 % de los casos de cáncer de pulmón, teniendo en cuenta que estas cifras estarán influenciadas por la zona geográfica y su sinergia con el hábito tabáquico individual. El radón y el tabaco se consideran co-carcinógenos, con un efecto sinérgico, no

solo aditivo sino más próximo a un impacto multiplicativo. De hecho, se estima que una persona fumadora, si además está expuesta a una elevada concentración de gas radón, tiene un riesgo 25 veces mayor de desarrollar cáncer de pulmón que una no fumadora. De acuerdo con estas cifras, la exposición a radón representa la segunda causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco, y la primera en personas no fumadoras.

Diferentes estudios realizados en Europa han proporcionado estimaciones de la mortalidad atribuible al radón que oscilan entre el 3 y el 10% de la mortalidad total por cáncer de pulmón. En España, el Ministerio de Sanidad elaboró un informe sobre la mortalidad atribuible a la exposición a radón en las distintas comunidades autónomas, estimando que, en 2017, el radón habría causado el 3,8% del total de fallecimientos por cáncer de pulmón.

Impacto del radón en el desarrollo del cáncer (carcinogénesis)

Al tratarse de un gas inerte la mayor parte del radón inhalado es exhalado. La progenie del radón, ya sea libre o adherida a partículas, puede permanecer en los pulmones y experimentar su desintegración radiactiva. La radiación alfa emitida en dicha desintegración es considerada como la mayor contribución a la dosis de radiación en el caso de este isótopo. Los descendientes del radón de vida más larga (como el plomo-210 y polonio-210) contribuyen poco a la dosis de radiación en el tejido pulmonar porque tienen más probabilidades de ser eliminados físicamente del pulmón por mecanismos de transporte mucociliar o celular antes de que puedan decaer y emitir una radiación significativa.

Las partículas inhaladas se depositan en diferentes tramos del aparato respiratorio, según su diámetro aerodinámico, impactando una parte en el epitelio de los bronquios, generando daño mediante acción directa o acción indirecta:

- La acción directa se produce como consecuencia de la absorción de la energía de la radiación por la célula directamente a nivel de estructuras celulares clave como el ADN en el núcleo de las células, o en otras moléculas esenciales como enzimas u orgánulos citoplasmáticos (ribosomas, mitocondrias). Las lesiones que provoca la radiación ionizante en el núcleo de las células se conocen como efecto genotóxico, e incluyen múltiples roturas sobre la doble cadena del ADN, mutaciones que alteran la secuencia de nucleótidos y anomalías cromosómicas que incluyen duplicaciones, deleciones, traslocaciones y anillos cromosómicos. La consecuencia de esta inestabilidad genómica es la modificación del ciclo celular, la pérdida de control sobre el crecimiento celular y la diferenciación, que lleva a la formación de tumores y al proceso de carcinogénesis.
- La acción indirecta consiste en que mediante la absorción de la energía de la radiación por las moléculas de agua (elemento del que están constituidos mayoritariamente las células), hace que el agua se disocie produciéndose iones y radicales libres muy reactivos, que, a su vez, pueden reaccionar entre sí o con otros compuestos, alterando las funciones básicas de la célula.

Por ello, al inhalarse, las partículas procedentes de la desintegración del radón permanecen en el epitelio

del tracto respiratorio donde se va acumulando el daño celular que puede conducir a la formación de tumores.

Actualmente no existe evidencia sólida sobre el impacto de la exposición a radón en otro tipo de enfermedades además del cáncer de pulmón. Si bien se han realizado diferentes estudios sobre su influencia en otros tipos de tumores (por ejemplo, en tumores hematológicos o cerebrales, entre otros), u enfermedades respiratorias, los resultados no son concluyentes.

Evidencia científica sobre el impacto del gas radón en el cáncer de pulmón

Estudios de laboratorio (preclínicos)

Evidencia preclínica *in vitro* e *in vivo* proveniente de células y animales (principalmente ratas) expuestas a altas dosis de radiación alfa ha demostrado la generación de un acúmulo de alteraciones citotóxicas y genotóxicas, entre las que se incluyen roturas de doble cadena del ADN, mutaciones consecutivas, aberraciones cromosómicas como deleciones, formaciones de anillos, micronúcleos y producción de radicales libres que llevan a la alteración del ciclo celular. Tras exposición a cultivos celulares a radiación alfa, se demostró el potencial de transformación maligna de estas células, aunque de momento no se ha identificado ninguna alteración genómica o firma molecular específica de la radiación alfa en modelos preclínicos. En modelos *in vivo* el radón también ha demostrado su impacto como carcinógeno en ratas expuestas a radón, desarrollando tumores pulmonares tras la exposición a radón de forma continuada.

Estudios epidemiológicos en mineros del uranio, exposición laboral

Tal y como se ha mencionado anteriormente el impacto y riesgo para la salud del gas radón asociado con el desarrollo del cáncer de pulmón en humanos se comenzó a estudiar en los mineros de uranio en la década de los 50, dado que en las minas de uranio se alcanzaban concentraciones de radón muy elevadas y sus trabajadores presentaban una elevada frecuencia de cáncer de pulmón entre otras enfermedades respiratorias. Posteriormente se demostró un incremento del riesgo lineal entre la exposición al radón laboral y el cáncer de pulmón en los mineros de uranio. El Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR en inglés) publica informes donde se recopilan estudios epidemiológicos, los analiza y concluye acerca de la relación entre la exposición a radón y el cáncer de pulmón.

La mayor evidencia sobre el impacto del radón en la salud de los mineros proviene del estudio *Pooled Uranium Miner Analysis* (PUMA), recientemente publicado, que ha confirmado una relación directa entre la exposición prolongada a este gas y la mortalidad por cáncer de pulmón. Este estudio ha permitido profundizar en cómo factores como la edad, la intensidad y la temporalidad de la exposición influyen en el riesgo, destacando especialmente el mayor impacto en trabajadores jóvenes y en aquellos con exposiciones recientes y elevadas.

Estudios epidemiológicos en la población general

Basándose en la evidencia acumulada sobre el radón como carcinógeno en mineros, surgió la necesidad de investigar su impacto en la salud en entornos residenciales y su posible relación con el cáncer de pulmón en la población general. Dado que la exposición en mineros no era directamente extrapolable al ámbito residencial, se llevaron a cabo numerosos estudios de casos y controles para evaluar esta asociación. Sin embargo, muchos de estos estudios iniciales presentaban limitaciones metodológicas, lo que resultó en resultados ambiguos o con un poder estadístico insuficiente para detectar diferencias significativas.

Siguiendo un enfoque similar al utilizado en estudios laborales, se realizaron análisis combinados (*pooling*) de los principales estudios de casos y controles sobre la exposición residencial al radón y el cáncer de pulmón. Estos metaanálisis confirmaron una relación lineal entre la concentración de radón y el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón, estimándose un incremento del riesgo del 16% por cada aumento de 100 Bq/m³ en la concentración de radón residencial. Además de establecer esta relación lineal, no se identificó un nivel de seguridad por debajo del cual la exposición al gas radón pueda considerarse completamente exenta de riesgo.

Este efecto se ha observado tanto en personas fumadoras como en no fumadoras, consolidando al radón como uno de los principales factores de riesgo de cáncer de pulmón en población no fumadora.

Como se ha mencionado previamente, el gas radón y el tabaquismo, principal factor de riesgo del cáncer de pulmón, actúan como co-carcinógenos, lo que significa que su combinación incrementa significativamente el riesgo absoluto de desarrollar esta enfermedad. En personas expuestas al radón, el riesgo de cáncer de pulmón es mayor en fumadores y exfumadores en comparación con quienes nunca han fumado. Es importante destacar que, en fumadores, se ha observado un aumento significativo del riesgo a partir de concentraciones de radón de tan solo 50 Bq/m³, un nivel inferior a los valores de referencia recomendados para la población general.

Si bien el cáncer de pulmón está asociado a múltiples factores de riesgo ambientales (como la contaminación atmosférica o los gases de combustión de motores diésel) y laborales (como la exposición al amianto o a la sílice cristalina), la evidencia sobre la interacción del radón con estos agentes es aún limitada. No obstante, se sabe que comparten vías de carcinogénesis y podrían actuar de forma sinérgica, amplificando el daño en las células pulmonares.

Por ello, ciertos grupos de población, como fumadores, exfumadores, personas con enfermedades respiratorias preexistentes o trabajadores expuestos a carcinógenos ambientales y laborales pueden ser especialmente vulnerables a los efectos del radón.

La investigación en epidemiología molecular ha explorado las alteraciones genómicas y moleculares asociadas a la exposición al radón, dado su impacto en el cáncer de pulmón. Se ha observado que la radiación alfa induce aberraciones cromosómicas, agrupaciones de mutaciones y estrés oxidativo. En base a ello se han planteado posibles biomarcadores de exposición asociados a diversas mutaciones en genes sin que, hasta la fecha, se haya identificado una firma molecular específica del daño inducido por radón.

BIBLIOGRAFÍA

COLLIER, C.G., et al. Carcinogenicity of radon/radon decay product inhalation in rats – effect of dose, dose rate and un-attached fraction. *International Journal of Radiation Biology*. 2005, vol. 81, no. 9, pp. 631-647. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09553000500368404>.

CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR (CSN). [Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. Guía de Seguridad 11.4](#), 2012.

DARBY, Sarah, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 2005, vol. 330, no. 7485, pp. 223-228. Disponible en: <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>.

DARBY, Sarah et al. Residential radon and lung cancer--detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 2006; vol. 32 Suppl 1, pp. 1-83. Disponible en: <https://www.sjweh.fi/article/982>.

FRUTOS VÁZQUEZ, Borja; OLAYA ADÁN, Manuel. [Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios](#). Colección Informes Técnicos, INT-04.20. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2010.

GARCÍA-TALAVERA SAN MIGUEL, Marta; LÓPEZ ACEVEDO, Francisco Javier. [Cartografía del potencial de radón de España](#). Colección Informes Técnicos, INT-04.41. Consejo de Seguridad Nuclear. 2019.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). Man-made mineral fibres and radon. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans, vol. 43. IARC, 1988. ISBN 9283212436. Disponible en: <https://publications.iarc.fr/publications/media/download/1592/bddbe727065b1d7fddd8a42fa4e9e9cf758ce65e.pdf>.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials. Safety Reports Series No. 49, IAEA, 2006. ISSN 1020-6450. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1257_web.pdf.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP*. 1993, vol. 23, no. 2. ISSN 0146-6453. Disponible en: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_23_2.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014, vol. 43, no. 3. ISSN 0146-6453. Disponible en: http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_43_3.

KELLY-REIF, Kaitlin et al. Radon and lung cancer in the pooled uranium miners analysis (PUMA): highly exposed early miners and all miners. *Occupational and Environmental Medicine*, 2023, vol. 80, no. 7, pp. 385-391. Disponible en: <https://doi.org/10.1136/oemed-2022-108532>.

LAGUNA, Juan Carlos et al. Geographic differences in lung cancer: focus on carcinogens, genetic predisposition, and molecular epidemiology. *Therapeutic Advances in Medical Oncology*, 2024, vol. 16, pp. 1-21. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/17588359241231260>.

LAURIER, D et al. Miner studies and radiological protection against radon. *Annals of the ICRP*, 2020, No 49 (1_suppl), pp. 57-67. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0146645320931984>.

MADAS, Balázs G. et al. Effects of spatial variation in dose delivery: what can we learn from radon-related lung cancer studies? *Radiation and Environmental Biophysics*, 2022, vol. 61, no. 4, pp. 561-577. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00411-022-00998-y>.

MARTIN-GISBERT, Lucía et al. Radon exposure and its influencing factors across 3,140 workplaces in Spain. *Environmental Research*, 2023, vol. 239, pp. 117305-11712. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117305>.

PÉREZ RÍOS, Mónica et al. Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España. Ministerio de Sanidad, 2021. Disponible en: https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/04_Mortalidad_radon.pdf.

RAGE, Estelle et al. PUMA - pooled uranium miners analysis: cohort profile. *Occupational and Environmental Medicine*, 2020, vol. 77, pp.194-200. Disponible en: <https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105981>.

Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. Boletín Oficial del Estado, 305, de 21 de diciembre de 2022. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/12/20/1029/con>.

Real Decreto 1217/2024, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes. Boletín Oficial del Estado, 292, de 4 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2024/12/03/1217>.

RIUDAVETS, Mariona et al. Radon and lung cancer: current trends and future perspectives. *Cancers*, 2022, vol. 14, no. 13, pp. 3142-3158. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/cancers14133142>.

ROBERTSON, Aaron et al. The cellular and molecular carcinogenic effects of radon exposure: a review. *International journal of molecular sciences*, 2013, vol. 14, no. 7, pp. 14024-14063. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms140714024>.

SAMET, Jonathan M. et al. Uranium mining and lung cancer in Navajo men. *New England Journal of Medicine*, 1984, vol. 310, no. 23, pp. 1481-1484. Disponible en: <https://doi.org/10.1056/NEJM198406073102301>.

SELIGER, R.L.; KRATZER, T.B.; GIAQUINTO, A.N.; SUNG, H.; JEMAL, A. Cancer statistics, 2025. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2025, vol. 75, no. 1, pp. 10-45. Disponible en: <https://doi.org/10.3322/caac.21871>.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, 2019. ISBN 978-92-1-139184-8. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2019_Report-CORR.pdf.

WEAVER, D. A. et al. Cytogenetic and molecular genetic analysis of tumorigenic human bronchial epithelial cells induced by radon alpha particles. *Carcinogenesis*, 1997, vol. 18, no. 6, pp. 1251-1257. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/carcin/18.6.1251>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. World Health Organization, 2009. ISBN 9789241547673. Disponible en: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf.

Agradecimientos:

Al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) por su colaboración en la revisión del documento.