

El radón en la isla de Gran Canaria: ¿una amenaza natural?

Radon in the island of Gran Canaria: a natural hazard?

Trabajo de Fin de Grado.

Milkos Santana Lorenzo.

Tutorizado por José Antonio Rodríguez Losada.

Grado en Biología. Marzo 2022.

Índice

Resumen	1
Abstract.....	1
Introducción	2
Radón.....	4
Características fisicoquímicas.....	4
Distribución del radón en la naturaleza.....	5
<i>Radón en el suelo.....</i>	<i>5</i>
<i>Radón en la atmósfera</i>	<i>6</i>
<i>Radón en el agua.....</i>	<i>7</i>
Efectos sobre la salud	7
Cáncer de pulmón	8
Otros tipos de cáncer	9
Mecanismos carcinógenos	10
Geología de Gran Canaria	10
El radón en la isla de Gran Canaria	13
Radón en rocas.....	14
Radón en viviendas.....	19
Radón en aguas subterráneas	21
Zonas propensas al radón. Mapas de potencial de radón.....	25
Conclusiones	27
Conclusions	27
Bibliografía	28

Resumen

El radón es un gas radiactivo de origen natural responsable de aproximadamente la mitad de la dosis de radiación ionizante recibida por la humanidad. La exposición al radón y sus descendientes radiactivos se considera la segunda causa de cáncer de pulmón después del consumo de tabaco. En este trabajo de fin de grado se revisa la bibliografía existente acerca del radón en la isla de Gran Canaria, con el fin de agrupar el conocimiento actual acerca de esta amenaza natural en la isla. En Gran Canaria se han realizado estudios sobre su concentración en rocas, viviendas y aguas subterráneas, así como su relación con la geología del territorio. Las investigaciones llevadas a cabo sugieren que, en general, la isla de Gran Canaria presenta un potencial de radón bajo, con sólo algunas zonas por encima de los niveles recomendados. Esta información facilita la toma de decisiones a la hora de elaborar planes de acción contra la exposición al radón, permitiendo darle prioridad a aquellas zonas clasificadas como propensas al radón.

Palabras clave: radón, Gran Canaria, suelos, viviendas, aguas subterráneas, carcinogénesis.

Abstract

Radon is a naturally occurring radioactive gas that accounts for approximately half of the ionising radiation dose received by humanity. Exposure to radon and its radioactive progeny is considered to be the second cause of lung cancer after tobacco consumption. This work consists of a bibliographic review about radon in Gran Canaria, with the aim of collecting the current knowledge about this natural threat in the island. Studies about its concentration in rocks, dwellings and groundwaters have been carried out. The research suggests that, in general, the radon potential of Gran Canaria is low, with just few areas exhibiting radon levels above those recommended. This information facilitates decision making processes for developing action plans against radon exposure, as it allows to prioritise those areas classified as radon prone.

Key words: radon, Gran Canaria, soils, dwellings, groundwater, carcinogenesis.

Introducción

La exposición a la radiación ionizante es una consecuencia inherente a la vida en La Tierra. La mayor parte de esta radiación proviene de fuentes naturales, que comprenden tanto la radiación cósmica procedente del espacio exterior como la radiactividad natural terrestre. En conjunto, estas fuentes naturales representan más de un 80% de la dosis media anual recibida por la humanidad (Charles, 2001). El resto proviene de fuentes artificiales tales como pruebas médicas, restos de pruebas y accidentes nucleares, etc.

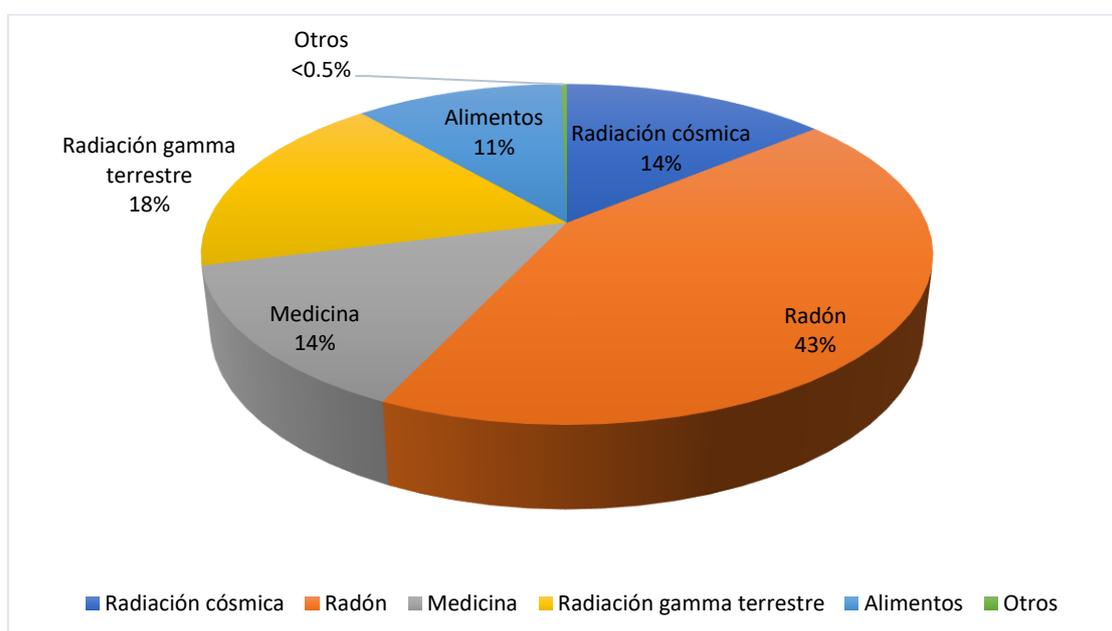


Figura 1. Fuentes de radiación ionizante. Elaboración propia. Datos de UNSCEAR, 2000.

La radiactividad natural terrestre procede de los isótopos radiactivos que de forma natural se encuentran en el medio ambiente (Alonso, 2016). Entre estos isótopos, particular importancia tiene el radón (^{222}Rn), que constituye la mayor fuente de radiación ionizante de origen natural, siendo responsable de aproximadamente la mitad de la dosis de radiación que una persona recibe a lo largo de su vida (Ruano-Ravina *et al.*, 2017). El radón es un gas noble que se genera a partir de la desintegración radiactiva del radio (^{226}Ra), que a su vez es un producto de la desintegración del uranio (^{238}U), presente en todas las rocas de la corteza terrestre. Debido a su estado gaseoso en condiciones normales de presión y temperatura, el radón difunde a través de los poros y grietas del terreno y alcanza la atmósfera. En caso de ser

inhalado, la radiación emitida por el radón y sus descendientes puede ocasionar daños en el ADN de las células del tracto pulmonar (Appleton, 2013), incrementando así las probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón. Por este motivo, el radón fue clasificado como un carcinógeno humano por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer en 1988, y en la actualidad se considera como la segunda causa de cáncer de pulmón después del consumo de tabaco (World Health Organization [WHO], 2009). A causa de esto, y en base a las recomendaciones de organismos como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 2014) o la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2009), diversos países han desarrollado normativas con el fin de proteger a la población ante los efectos nocivos de una exposición a concentraciones elevadas de radón (Consejo de Seguridad Nuclear [CSN], 2010).

En España, los estudios y recomendaciones en torno al radón han sido liderados principalmente por el Consejo de Seguridad Nuclear, organismo responsable de la protección del público frente a las radiaciones ionizantes (Alonso, 2016). Como parte del proyecto RADON, el CSN ha llevado a cabo numerosas campañas de medida de concentración de radón en viviendas y ha elaborado mapas que representan el riesgo de exposición a este elemento en función de la geología del territorio y de la concentración encontrada en las viviendas.

Las Islas Canarias constituyen un archipiélago de origen volcánico intraplaca, cuya prolongada actividad (más de 50 millones de años) y volumen (150000 km³) han dado lugar a una geología muy compleja, con una amplia variedad petrológica. Esta singular historia geológica hace que las islas tengan también unas características radiológicas diferenciadas con respecto al territorio peninsular o a las islas mediterráneas.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se revisa la bibliografía existente en torno a las emisiones de radón en distintos tipos de materiales litológicos de la isla de Gran Canaria, con el fin de ofrecer una recopilación del conocimiento actual acerca de esta amenaza natural en la isla. Se espera poder contribuir de este modo a un mejor entendimiento de los procesos y factores que rigen este fenómeno. Se tratarán en detalle aspectos como su presencia en suelos, aguas y viviendas, con especial hincapié en su posible repercusión desde un punto de vista de salud pública.

Radón

Características fisicoquímicas

El radón es un elemento químico con número atómico 86 y símbolo Rn situado en el grupo de los gases nobles del sistema periódico, con los que comparte la propiedad de ser inerte químicamente. Tiene una densidad de 9.73 kg m^{-3} a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura. Sus puntos de fusión y ebullición son $-71 \text{ }^\circ\text{C}$ y $-62 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. A temperatura ambiente es un gas incoloro, inodoro e insípido, mientras que en estado sólido puede presentar distintas coloraciones que van desde el amarillento (a bajas temperaturas) a rojo-anaranjado (a $-140 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura del aire líquido). Su concentración media en el aire es de un átomo por cada 10^{18} átomos de aire, siendo su coeficiente de difusión en este medio $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Presenta una gran solubilidad en agua, que aumenta a medida que disminuye la temperatura ($0.23 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $0.51 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$) (Alonso, 2016).

Existen tres isótopos naturales del radón: actinón (^{219}Rn), torón (^{220}Rn) y radón (^{222}Rn). El actinón, con una vida media de 3.92 s, proviene de la desintegración radiactiva del ^{235}U . El torón, cuyo periodo de semidesintegración es de 54.5 s, deriva del ^{232}Th . En último lugar el radón, con una vida media más larga que los anteriores, de 3.84 días, proviene de la desintegración del ^{238}U . Los tres isótopos se encuentran en estado gaseoso en condiciones normales de presión y temperatura. Al tratarse de un gas noble, no interactúa químicamente con otros elementos, por lo que una vez generado en el interior de la corteza puede moverse libremente por difusión y convección. No obstante, sólo el ^{222}Rn y el ^{220}Rn son capaces de alcanzar la atmósfera en cantidades considerables, puesto que la corta vida media del actinón conlleva que este decaiga mucho antes de poder difundir a través del suelo. Aunque el torón sí alcanza la atmósfera y su presencia se ha detectado en viviendas (Appleton, 2013), su breve periodo de semidesintegración hace que su contribución a la dosis de radiación recibida por el público sea muy inferior a la del radón. Es por ello que en este trabajo nos referiremos al ^{222}Rn cuando hablemos de radón, ya que éste representa prácticamente la totalidad de la dosis de radiación aportada por los isótopos del radón (Ruano-Ravina *et al.*, 2017).

El elemento inmediatamente anterior al radón en la serie del ^{238}U es el radio (^{226}Ra), que tiene una vida media de 1600 años. La progenie del radón consiste en una serie de elementos sólidos que se pueden dividir en dos grupos en función del periodo de semidesintegración:

los descendientes de vida corta, que incluyen ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po ; y los descendientes de vida larga, constituido por ^{210}Pb , ^{210}Bi y ^{210}Po . En último lugar de la cadena se encuentra el plomo (^{206}Pb) que es estable (Robayna Duque, 1998).

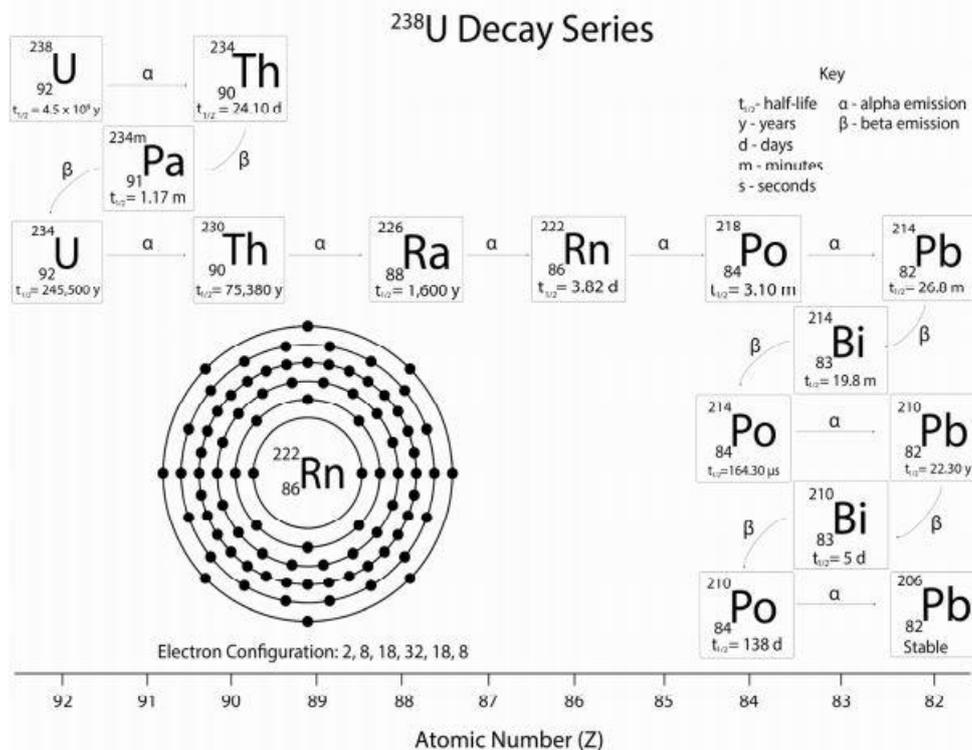


Figura 2. Cadena de desintegración del ^{238}U (Robertson *et al.*, 2013).

Distribución del radón en la naturaleza

Radón en el suelo

Puesto que deriva del radio, el radón se encuentra en todos los materiales que forman la corteza terrestre en cantidades variables en función del tipo de roca y suelo (Tommasino, 2005). Por lo general, las rocas procedentes de magmas félsicos o ácidos, como los granitos, contienen mayor cantidad de uranio y por tanto mayor capacidad para generar radón (Drolet *et al.*, 2013), mientras que aquellas que provienen de magmas máficos o básicos, como los basaltos, presentan un contenido en uranio muy inferior.

Tras su formación, el radón se desplaza por el terreno mediante difusión y convección, en función de factores como la porosidad, la permeabilidad y la presencia de grietas o fallas. De

este modo termina llegando a la superficie terrestre y pasando a la atmósfera en un proceso denominado exhalación.

Radón en la atmósfera

Una vez en la atmósfera, el radón tiende a dispersarse, y su concentración dependerá principalmente de las condiciones meteorológicas, como por ejemplo la temperatura, la presión atmosférica, la humedad y la velocidad del viento. La propia exhalación del terreno constituye otro factor determinante en la concentración de radón en la atmósfera, y a su vez se ve influida por factores como la presión atmosférica o la distancia de la fuente de radón respecto a la superficie. Cuando la presión disminuye, la exhalación aumenta debido al fenómeno de bombeo de aire y, en cambio, cuando la presión aumenta, el aire atmosférico tiende a penetrar en el suelo, lo que frena la salida del radón (Alonso, 2016). La concentración de radón al aire libre se sitúa entre 4 y 8 Bq m³ (Appleton, 2007), niveles que por lo general no representan una amenaza para la salud.

En espacios cerrados, su concentración suele ser mucho más elevada que al aire libre, con valores que van desde 10 Bq m⁻³ hasta 70 kBq m³ y un valor medio mundial de 40 Bq m⁻³. El principal mecanismo de entrada en las edificaciones es la difusión a través del suelo, aunque por lo general también se establece un flujo convectivo debido a las diferencias de presión entre la atmósfera del suelo y la atmósfera del recinto (Alonso, 2016). Algunos de los factores que influyen en su entrada y acumulación en ambientes cerrados son la permeabilidad y la tasa de exhalación del suelo, el diseño y los materiales de construcción empleados, factores meteorológicos, y condiciones de ventilación, entre otros (Appleton, 2007). Al ser unas nueve veces más denso que el aire, el radón tiende a acumularse en sótanos y plantas bajas, aunque el hecho de que estas plantas se encuentren más cerca de la corteza terrestre también influye en este comportamiento (Lorenzo-González *et al.*, 2019).

Por último, cavidades subterráneas como galerías de metro o minas presentan concentraciones muy superiores a las que se encuentran en la superficie, puesto que tanto el volumen de aire como el movimiento de este son mucho menores que en la atmósfera exterior.

Radón en el agua

La elevada solubilidad del radón en agua permite su presencia tanto en aguas superficiales como subterráneas. El radón presente en aguas superficiales se libera rápidamente al aire, por lo que su concentración en ríos, lagos o agua de mar suele ser inferior a 2 Bq L^{-1} (Alonso, 2016). Sin embargo, esto no ocurre en aguas subterráneas, donde su concentración es más elevada y varía en función de factores como la concentración de radio en las rocas que atraviesa, las características de las formaciones geológicas por las que transcurre o la temperatura (Alonso *et al.*, 2015). Aguas subterráneas que transcurren por rocas graníticas, sieníticas, pegmatíticas, rocas volcánicas ácidas y gneis ácidos, presentan concentraciones de radón que varían de 50 a 500 Bq L^{-1} . Aguas subterráneas obtenidas en fuentes situadas en rocas sedimentarias como calizas, areniscas y pizarras, así como rocas intermedias y rocas volcánicas básicas, por lo general presentan concentraciones de radón que varían entre 5 y 70 Bq L^{-1} (Alonso, 2016).

Efectos sobre la salud

Los efectos nocivos del radón fueron observados mucho antes de su descubrimiento por el físico alemán Friedrich Ernst Dorn en la primera década del siglo XX. Ya desde el siglo XVI se había observado que algunos mineros centroeuropeos morían prematuramente con síntomas pulmonares y caquexia, padeciendo una enfermedad que inicialmente fue denominada “*mala metallorum*” y que más tarde se identificaría como cáncer de pulmón. En 1924, la detección de elevadas concentraciones de radón en la atmósfera de ciertas minas en Checoslovaquia, en las que había una elevada incidencia de cáncer de pulmón, condujo a la hipótesis de que la exposición al radón podía causar este tipo de cáncer (Kang *et al.*, 2019).

Al tratarse de un gas químicamente inerte, el radón no se metaboliza, por lo que su toxicidad es debida a su condición de elemento radiactivo. Si bien existe cierta emisión de radiación gamma directa, la peligrosidad radiológica del radón radica principalmente en la emisión de partículas α por parte de sus descendientes de vida corta, en concreto ^{218}Po y ^{214}Po (Robayna Duque, 1998). Al contrario que el radón, estos elementos metálicos sí interactúan con la

materia circundante, pudiendo adherirse al tejido del tracto respiratorio cuando son inhalados. Las partículas α irradian las células cercanas, causando mutaciones en el ADN que pueden derivar en cáncer. Se estima que entre un 3 y un 15% de los casos de cáncer de pulmón están relacionados con este elemento (Lorenzo-González *et al.*, 2019). Además, también se ha sugerido su implicación en otras patologías. A continuación se revisan los datos existentes en torno a los efectos nocivos del radón, así como los posibles mecanismos citológicos y genéticos implicados.

Cáncer de pulmón

Los efectos carcinógenos del radón han sido bien demostrados por investigaciones llevadas a cabo en trabajadores de la minería del uranio, que se encuentran expuestos a elevados niveles de este elemento. Algunos de estos estudios presentan tamaños muestrales de miles de individuos durante periodos de observación de varios años, y los resultados demuestran una relación directa y lineal entre la exposición al radón y el cáncer de pulmón (Lorenzo-González *et al.*, 2019).

No obstante, estos resultados no pueden extrapolarse directamente al resto de la población debido a las numerosas diferencias entre ambos grupos, por lo que se han realizado estudios para evaluar el riesgo que supone la exposición al radón para la población general.

Los resultados obtenidos han sido variados, y aunque algunos estudios sugieren un aumento del riesgo de cáncer de pulmón en proporción a la dosis de radón en las viviendas, muchos de ellos no han podido obtener resultados estadísticamente significativos (Kang *et al.*, 2019). Esto último puede deberse a un menor tamaño muestral sumado al hecho de que los niveles de exposición al radón en viviendas son por lo general mucho más bajos que en minas, por lo que el incremento esperado en el riesgo de padecer cáncer de pulmón es también menor y difícil de estimar sin un número amplio de muestras. De hecho, cuando se agrupan los datos de varias de estas investigaciones y se analizan en conjunto, como hicieron Darby *et al.*, (2005) en Europa y Krewski *et al.*, (2005) en Norteamérica, se obtiene un aumento significativo del riesgo de cáncer de pulmón en proporción a la concentración de radón (Lorenzo-González *et al.*, 2019), que va desde un 11% por cada 100 Bq m⁻³ en el estudio norteamericano a un 16% por cada 100 Bq m⁻³ en el estudio europeo.

Considerando todo lo anterior, podemos decir que hay pruebas suficientes para afirmar que la exposición al radón está relacionada con un aumento del riesgo de padecer cáncer de pulmón, y que este riesgo aumenta en función de la dosis y el tiempo de exposición, siendo por tanto mayor para los trabajadores de la minería, pero significativo también para el público en general.

Otros tipos de cáncer

Aunque la mayor dosis de radiación es recibida por el tracto respiratorio, el radón y sus descendientes también pueden alcanzar otros órganos (Kendall y Smith, 2002) como el estómago, los riñones, la piel o la médula ósea. Por este motivo, se han llevado a cabo diversas investigaciones con el fin de identificar una posible relación entre la exposición al radón y el desarrollo de cánceres distintos del de pulmón. Los resultados de estos estudios son variados y a menudo contradictorios. Además, muchos de ellos presentan limitaciones como tamaños muestrales pequeños o la estimación de la exposición al radón a partir de mapas en lugar de la realización de medidas directas en las viviendas (Lorenzo-González *et al.*, 2019).

Se ha investigado mucho sobre una posible relación entre la exposición al radón y el desarrollo de distintos tipos de leucemia. A pesar de ello, dicha relación sigue siendo objeto de controversia, con algunos autores apuntando a favor de un incremento del riesgo de leucemia con la exposición al radón (Rericha *et al.*, 2006), y otros que apuntan en contra (Laurier *et al.*, 2001), (Toti *et al.*, 2005). Algo similar ocurre con otros tipos de cáncer. Messier *et al.*, (2017) encontraron una asociación entre el consumo radón en el agua y el cáncer de estómago, mientras que Auvinen *et al.*, (2005), no observaron dicha relación, incluso para aguas con concentraciones de radón superiores a 300 Bq L⁻¹. En lo que respecta al cáncer de piel, Wheeler *et al.*, (2012) indican una posible asociación con el radón, pero en un estudio llevado a cabo por Barbosa-Lorenzo *et al.*, (2016) no se observó esta relación. Obviamente estos son sólo algunos de los muchos ejemplos existentes en la literatura, y aunque ninguno de ellos constituye prueba suficiente de la presencia o ausencia de estas relaciones, sirven para ilustrar la disparidad de los resultados obtenidos hasta el momento.

Así pues, actualmente se considera que no hay pruebas suficientes de la asociación entre la exposición al radón y el desarrollo de otros tipos de cáncer distintos del de pulmón, aunque

muchos de los resultados obtenidos en torno a enfermedades como la leucemia o el cáncer de estómago sugieren que esta relación es posible.

Mecanismos carcinógenos

Aunque no se ha logrado identificar el mecanismo exacto por el que el radón induce el desarrollo de cáncer, sus efectos a nivel celular se manifiestan en forma de mutaciones genéticas (aberraciones cromosómicas, formación de micronúcleos), generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), o alteraciones del ciclo celular (por ejemplo, retraso de la mitosis e inhibición de la apoptosis), entre otros (Lorenzo-González *et al.*, 2019). Estos procesos varían en función de diferentes factores como la dosis de radiación, la frecuencia con la que ocurre, el tipo de célula sobre el que actúa, la fase del ciclo celular en la que se encuentra, etc. (Robertson *et al.*, 2013).

Se ha tratado de establecer una relación entre el riesgo de cáncer de pulmón causado por radón y la presencia de mutaciones específicas en ciertos genes, algunos de los cuales están implicados en aspectos como la regulación celular o la reparación del ADN. Aunque se han señalado algunas asociaciones, los resultados hasta el momento son inconclusos. Algunas pruebas sugieren que determinados polimorfismos en la familia de la glutatión S-transferasa pueden suponer un factor de riesgo en el cáncer de pulmón inducido por radón. También se ha propuesto que mecanismos como la disfunción mitocondrial o el acortamiento de los telómeros podrían estar relacionados con la carcinogénesis causada por el radón (Lorenzo-González *et al.*, 2019).

Geología de Gran Canaria

La isla de Gran Canaria es la tercera en extensión (1560 km²) y la segunda en población (855521 habitantes a 1 de enero de 2020) (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2021) del Archipiélago Canario. Se encuentra a 28 grados de latitud norte y 15º 35' de latitud oeste. Se trata de una isla casi circular, con unas dimensiones aproximadas de 46 km de diámetro y su punto más alto, el Pico de las Nieves (1949 m), constituye el origen de una profunda red de barrancos en disposición radial.

Gran Canaria es una isla geológicamente madura en la que el relieve presenta más rasgos de modelado erosivo que volcánico. Ha estado activa, al menos, durante los últimos 14-15 millones de años, aunque en la actualidad no existe ningún tipo de actividad volcánica (Instituto Geográfico Nacional [IGN], s.f.). Desde un punto de vista geológico, la isla puede dividirse en dos dominios diferenciados: el dominio sudoeste o Paleocanaria y el dominio noreste o Neocanaria. La mitad sudoeste corresponde al vulcanismo más antiguo (14.5 – 8 Ma). Esta área incluye un espectro composicional amplio de rocas volcánicas y plutónicas, que varían desde ultrabásicas a intermedias y ácidas. En cambio, la mitad noreste está constituida principalmente por rocas volcánicas pertenecientes a la fase de rejuvenecimiento (aprox. 5.3 Ma – actualidad), con un espectro composicional más limitado en el que dominan principalmente los términos básicos (Alonso *et al.*, 2019).

Su historia geológica, tras su emersión, comienza hace unos 14 Ma (Mioceno medio) y se puede dividir en tres grandes ciclos magmáticos: ciclo antiguo, ciclo Roque Nublo y ciclo post Roque Nublo (Alonso, 2016).

El ciclo antiguo comienza con la rápida emisión de un gran volumen de coladas basálticas, que condujo a la construcción de un edificio volcánico en escudo con alturas máximas de 2000 m y diámetro similar al de la isla actual (IGN, s.f.). Inmediatamente después de emitirse estos basaltos fisurales, se origina una cámara magmática zonada en la que tienen lugar fenómenos de mezcla de magmas. Estos fenómenos desencadenaron una serie de erupciones muy explosivas cuyos depósitos se extendieron por toda la isla, e incluyen términos composicionales que van desde riolitas peralcalinas a traquibasaltos. La emisión de estos depósitos supuso un brusco vaciado de magma, generando de este modo inestabilidades en el techo de la cámara magmática, que condujeron a la formación de una caldera de colapso (Caldera de Tejeda). Como consecuencia del colapso caldérico se suceden nuevas erupciones explosivas formadoras de potentes depósitos ignimbríticos de composición traquítico-riolítica. Los siguientes depósitos piroclásticos y lávicos, emitidos entre 13 y 9.6 Ma, fueron de naturaleza fonolítica, cubriendo gran parte de todos los materiales anteriores (Pérez Torrado, 2000).

Un hiato eruptivo produjo un importante periodo de inactividad de casi 4 Ma. Durante este periodo, un intenso proceso erosivo condujo a la formación de una red radial de paleobarrancos (Pérez Torrado, 2000). Los materiales procedentes de esta actividad erosiva

(arenas y conglomerados de cantos fonolíticos) se acumularon principalmente en las zonas bajas de la costa noreste, este y sur de la isla, constituyendo el denominado “Miembro Inferior de la Formación Detrítica de Las Palmas”.

A continuación de este periodo de inactividad tiene lugar el Ciclo Roque Nublo (de 5 – 4.5 a 3.5 – 3 Ma). Sus primeros signos de actividad volcánica se caracterizaron por erupciones estrombolianas de magmas basaníticos y nefeliníticos (Carracedo *et al.*, 2002), localizadas en los sectores meridionales y centrales de la isla. Posteriormente, la actividad se desplazó hacia los sectores centrales de la isla, construyendo el edificio plioceno Roque Nublo, un estratovolcán de cerca de 3500 m de altura cuyas emisiones fueron rápidamente canalizadas a través de la red de barrancos originada en la fase erosiva anterior. En este periodo se emitieron lavas con una composición variada desde basanítica-basaltoalcalina hasta traquítica-fonolítica. A partir de cierto momento las emisiones lávicas se alternaron con otras de carácter explosivo que originaron potentes depósitos ignimbríticos conocidos como “Aglomerados o Brechas Roque Nublo”. Este ciclo de actividad volcánica finaliza hace alrededor de 3 Ma con la intrusión en las zonas centrales de la isla de numerosos domos de composición fonolítica (Pérez Torrado, 2000).

Solapándose con los últimos episodios del ciclo anterior comienza el ciclo post Roque Nublo (3.2 Ma), que se caracteriza por la emisión, en erupciones estrombolianas, de lavas y piroclastos de naturaleza basanítico-nefelinítica. El volumen de emisión de este ciclo es sensiblemente inferior al de los ciclos anteriores, lo que sugiere un agotamiento de la fuente magmática para Gran Canaria. Además, la distribución de sus materiales, claramente polarizada hacia los sectores septentrionales de la isla, indica una tendencia migratoria de los conductos de emisión hacia el noreste ya apuntada en los ciclos anteriores (Pérez Torrado, 2000).

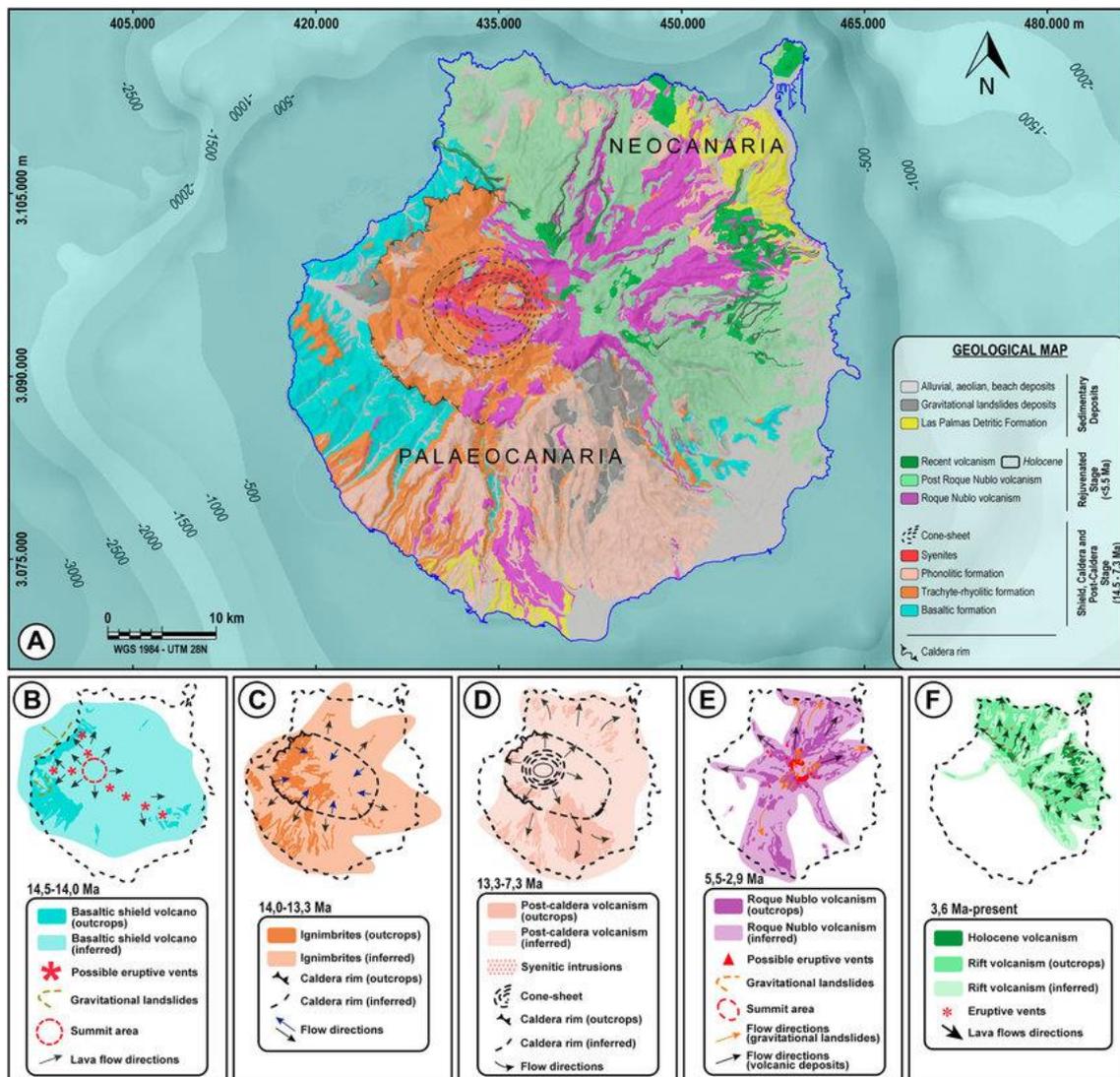


Figura 3. Mapa geológico de Gran Canaria (Rodríguez-González *et al.*, 2018)

Por último, el vulcanismo más reciente en Gran Canaria consiste en pequeñas erupciones de tipo estromboliano localizadas en la mitad noreste de la isla y de igual naturaleza básica que las del ciclo anterior. Estas erupciones dieron lugar a algunas estructuras como la Caldera de Bandama o el volcán Montañón Negro, que supone una de las erupciones más recientes de la isla, con una edad de 3075 años (IGN, s.f.).

El radón en la isla de Gran Canaria

La investigación en torno a las radiaciones ionizantes naturales en las Islas Canarias comenzó en la década de los noventa, con una serie de estudios llevados a cabo por el Laboratorio de

Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna (FIMERALL) en colaboración con el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Estos primeros trabajos se centraron en la determinación de las concentraciones de radón existentes en el interior de las viviendas de las diferentes islas y en algunas cuevas (CSN, 2004).

En el caso de la isla de Gran Canaria, la mayor parte de los estudios relativos al radón han sido llevados a cabo por el Grupo de investigación Interacción Radiación Materia (GIRMA) del Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Además de estos, el Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna ha realizado también mediciones de radón como parte de un proyecto promovido por el Consejo de Seguridad Nuclear. Estos trabajos constituyen el grueso de esta revisión bibliográfica, y se comentarán a continuación de forma detallada.

Radón en rocas

La exhalación de radón por parte del terreno sobre el que se encuentran las edificaciones constituye la fuente principal de radón *indoor*. Además de esta, la exhalación por parte de los materiales de construcción empleados también afecta notablemente a la cantidad de radón en el interior de las edificaciones, estimándose hasta en un 20% del total (CSN, 2010). Dado que tanto los suelos como los materiales de construcción son una combinación de los diferentes materiales litológicos que se encuentran en una zona determinada, la determinación de la tasa de exhalación de las rocas características de un territorio resulta útil a la hora de estimar el riesgo radiológico al que está expuesta la población de dicho territorio.

En la isla de Gran Canaria se encuentran representados la mayor parte de los litotipos presentes en el Archipiélago Canario. Estas rocas pertenecen a la serie ígnea alcalina, y su composición evoluciona desde términos indiferenciados, representados por basaltos; rocas de composición intermedia, representadas por traquibasaltos y finalmente, términos más diferenciados o evolucionados (sálicos), representados por traquitas y fonolitas (Hernández-Gutiérrez, 2014). También es muy notable en las islas la existencia de ignimbritas fonolíticas de composición y texturas variadas. En la Tabla 1 se muestra una clasificación resumida de los litotipos existentes en Canarias, según los criterios propuestos por Hernández-Gutiérrez (2014).

Tabla 1. Clasificación simplificada de los litotipos de las rocas volcánicas de Canarias. Adaptado de Hernández-Gutiérrez, 2014.

BASALTO (B)	AFANÍTICO (AF)	MASIVO (BAFM)
		VACUOLAR (BAFV)
	OLIVÍNICO-PIROXÉNICO (OP)	MASIVO (BOPM)
		VACUOLAR (BOPV)
	PLAGIOCLÁSICO (PL)	MASIVO (BPLM)
		VACUOLAR (BPLV)
TRAQUITA (TRQ)		TRQ
FONOLITA (FON)		FON
IGNIMBRITA (IG)		SOLDADA (IGS)
		NO SOLDADA (IGNS)

En un estudio llevado a cabo por Alonso (2016), se determinaron diferentes parámetros relativos a la exhalación de radón en un conjunto de rocas de la isla de Gran Canaria. Los puntos de muestreo fueron seleccionados para incluir la mayoría de los tipos litológicos presentes en la isla, y los resultados obtenidos se presentan a continuación (Tabla 2).

Tabla 2. Tipo litológico, concentración de radio y tasa de exhalación de muestras de rocas de Gran Canaria. Adaptado de Alonso, 2016.

Muestra	Tipo litológico	^{226}Ra (Bq kg⁻¹)	Tasa de exhalación (mBq kg⁻¹ h⁻¹)
M1	Traquita	109 ± 9	190 ± 14
M2	Fonolita	57 ± 5	111 ± 8
M3	Sienita	81 ± 7	53 ± 5
M4	Basalto (alterados)	8 ± 1	26 ± 2
M5	Basalto	19 ± 1	1.8 ± 0.5
M6	Riolita	310 ± 25	358 ± 23
M7	Riolita	44 ± 4	31 ± 4
M8	Fonolita (alteradas)	35 ± 2	48 ± 9
M9	Fonolita (alteradas)	42 ± 2	109 ± 11

Como era de esperar, existe una correlación entre la concentración de radio y la tasa de exhalación, de forma que la muestra con mayor tasa de exhalación es aquella que presenta un mayor contenido de radio, mientras que las muestras con las tasas más bajas contienen una cantidad muy baja de este elemento (Figura 4). Del mismo modo, tipos de rocas

diferentes, pero con concentraciones similares de radioisótopos presentan niveles de radón semejantes. Existe también una concordancia entre el grado de diferenciación magmática de las muestras y su tasa de exhalación. Así pues, la riolita M6 y la traquita M1, que presentan un grado de diferenciación elevado, exhiben las mayores tasas de exhalación. Por otra parte, las tasas de exhalación más bajas corresponden a muestras de rocas indiferenciadas, es decir, los basaltos M4 y M5. En una posición intermedia estarían las fonolitas y sienitas, con tasas de exhalación ligeramente menores que las riolitas.

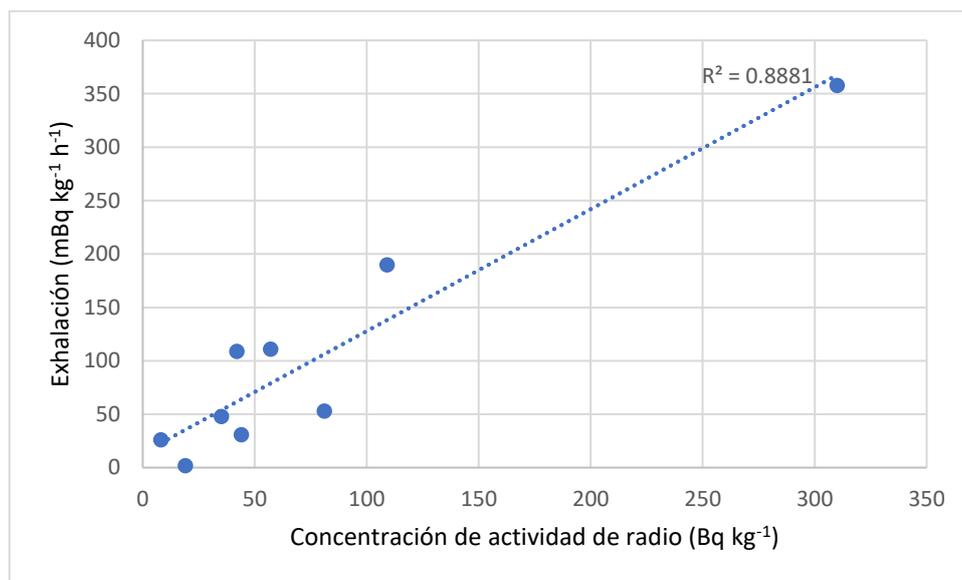


Figura 4. Relación entre la concentración de radio y la tasa de exhalación. Elaboración propia. Datos de Alonso, 2016.

En otro estudio llevado a cabo como parte del Proyecto PR32960 del CSN (Rodríguez-Losada, comunicación personal) sobre la emisión de radón en los materiales volcánicos de las Islas Canarias, se realizó un análisis de la exhalación de radón en distintos tipos de rocas de la isla de Gran Canaria. En la Figura 5 se representa la ubicación de los puntos muestreados mediante circunferencias cuyo diámetro varía en función del valor de exhalación de la muestra correspondiente.

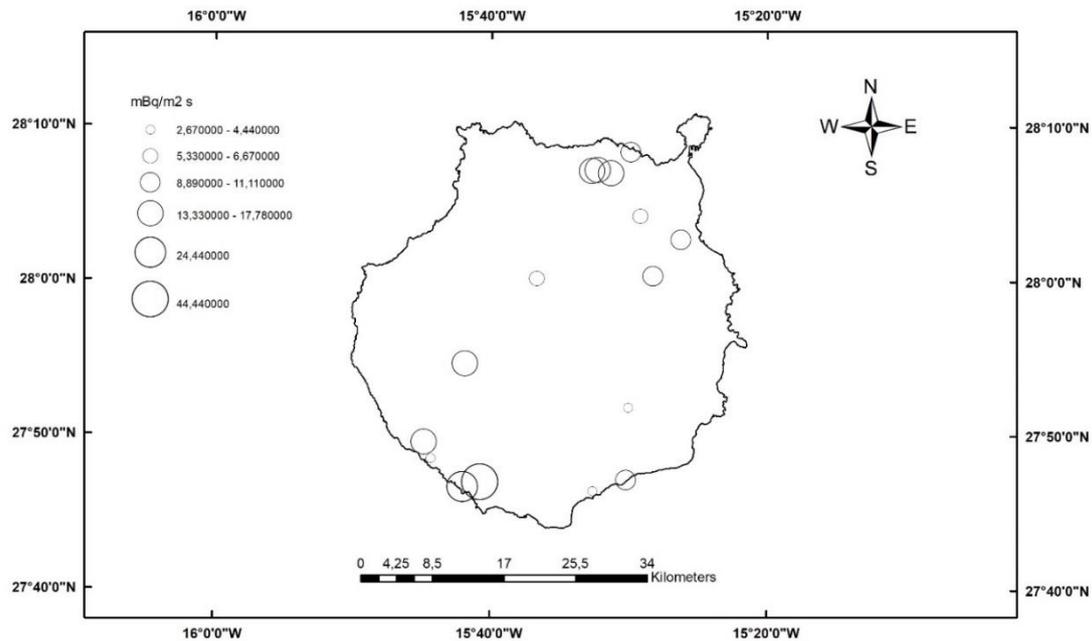


Figura 5. Localización geográfica de las muestras y tasa de exhalación. Elaboración propia. Datos de Rodríguez-Losada (comunicación personal).

Mediante el análisis individual de la tasa de exhalación de radón en función del grado de diferenciación magmática (contenido en sílice), se puede observar que los valores más bajos de exhalación se encuentran en muestras de rocas máficas (aquellas con baja concentración de SiO_2), mientras que a medida que se incrementa el contenido de sílice se produce un aumento de la tasa de exhalación (Figura 6). Sin embargo, esta tendencia creciente se mantiene sólo hasta concentraciones de sílice en torno al 60%, donde la tasa de exhalación alcanza sus valores máximos, para iniciar un descenso conforme el contenido de sílice sobrepasa este valor y se acerca al 70%. Así pues, se produce un incremento inicial de la exhalación de radón a medida que la diferenciación aumenta, seguido por una disminución de esta hacia los términos más diferenciados.

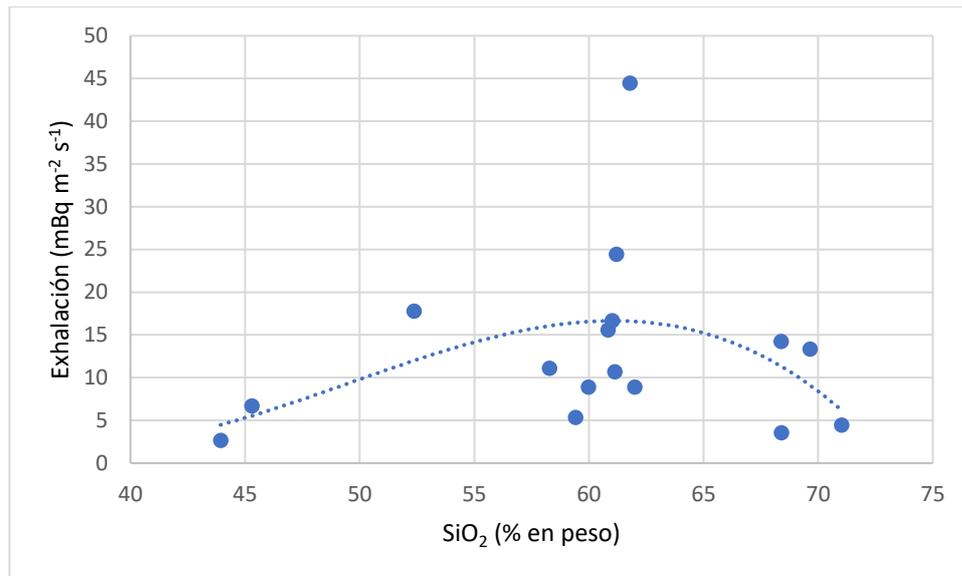


Figura 6. Relación entre concentración de sílice y tasa de exhalación. Elaboración propia. Datos de Rodríguez-Losada (comunicación personal).

Tal comportamiento es común y conocido en relación con el de otros elementos como Ba y Sr, donde el incremento inicial de concentraciones con diferenciación creciente o contenido de sílice es seguido por una disminución en la mayoría de los miembros félsicos (Berlin y Henderson, 1969).

Las rocas félsicas, representadas mayormente por fonolitas y traquitas en Canarias, contienen cantidades importantes de tectosilicatos (principalmente feldespatos alcalinos y, más raramente, algo de cuarzo). La red cristalina de los tectosilicatos es lo suficientemente grande para acomodar elementos como el torio, el uranio y el radio (padres del radón), que tienen tamaños iónicos relativamente grandes. La mayoría de ellos se encuentran acomodados dentro de la red de feldespatos alcalinos, de manera que, con la cristalización masiva de estos en etapas avanzadas de diferenciación, una mayor cantidad de estos elementos quedarán retenidos en la red de feldespatos. Esto conlleva que el líquido residual, que dará lugar a los miembros más félsicos o diferenciados, termine empobreciéndose en estos elementos, lo que explica la menor tasa de exhalación de radón en estas rocas (Viñas *et al.*, 2012).

Por tanto, los estudios llevados a cabo muestran que en Gran Canaria existe una amplia variabilidad en cuanto a la exhalación de radón por parte de los materiales litológicos, con algunos litotipos presentando un potencial de radón elevado. Sería conveniente evitar en la medida de lo posible el uso de estos últimos para la edificación, así como evaluar la

concentración de radón en las viviendas edificadas en zonas donde estos materiales son abundantes.

Radón en viviendas

El radón se mueve fácilmente entre los poros de los materiales normalmente usados en la edificación (CSN, 2010), y penetra en las viviendas atravesando los forjados, soleras o muros o introduciéndose a través de grietas o fisuras (Figura 7). Teniendo en cuenta el riesgo para la salud que supone una exposición prolongada a este gas, es necesario el establecimiento de medidas de control que garanticen la seguridad de la población. En línea con las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 2014), estas medidas deberían incluir tanto la determinación de niveles de referencia de concentración de radón en edificaciones, como el diseño de un programa nacional de vigilancia radiológica que permita conocer el riesgo al que se encuentra expuesta la población, y tomar medidas correctivas en caso necesario.

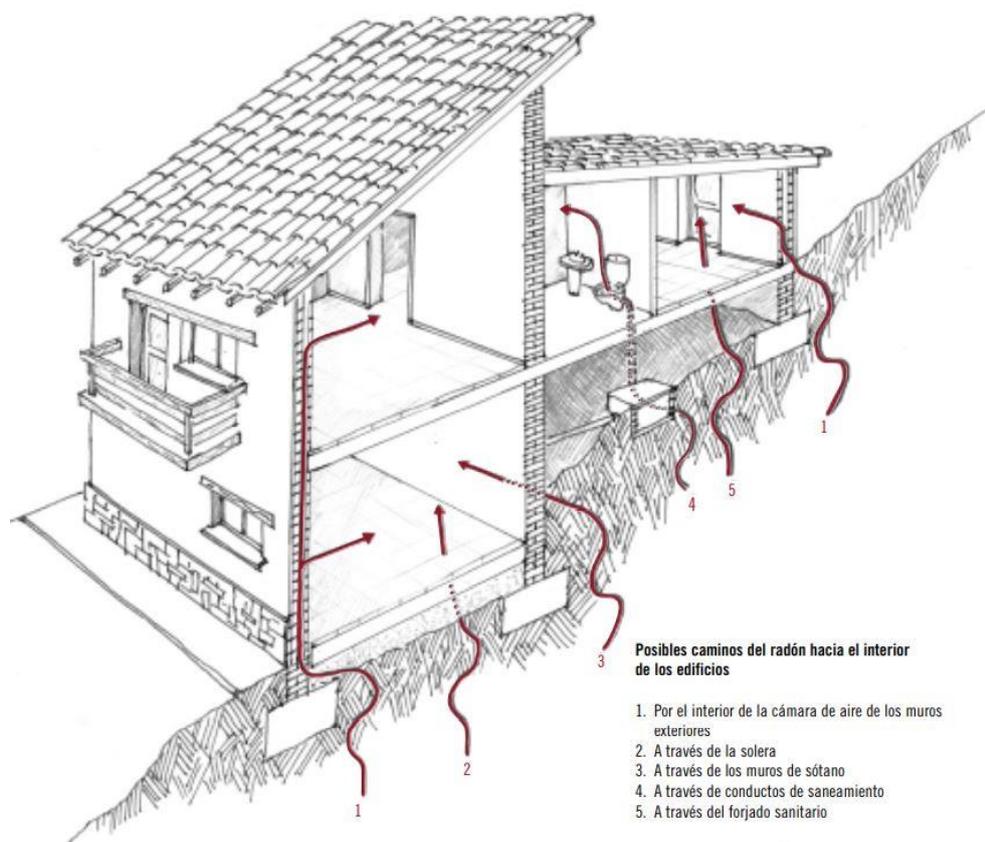


Figura 7. Principales vías de entrada del radón en viviendas (CSN, 2010).

En este contexto, en la isla de Gran Canaria se han llevado a cabo dos campañas de medida de radón en viviendas, ambas promovidas por el CSN. La primera, llevada a cabo por el laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna (CSN, 2004), obtuvo un valor medio aritmético para la isla de 67 Bq m^{-3} y un valor medio geométrico de 51 Bq m^{-3} , con un rango de valores comprendido entre 18 y 433 Bq m^{-3} . En la Tabla 3 puede observarse la distribución de los datos en cada municipio muestreado.

Tabla 3. Concentración de radon en viviendas de diferentes municipios de Gran Canaria. Adaptado de CSN, 2004.

Población	Número de viviendas	Concentración (rango)(Bq m^{-3})
Arucas	9	50 (29-177)
Gáldar	4	64 (25-98)
Las Palmas	48	42 (20-140)
San Bartolomé	6	69 (32-113)
Telde	7	93 (30-200)
Teror	7	210 (38-400)

Los investigadores encontraron variación entre plantas, siendo los valores más elevados los de los sótanos (valor medio 148 Bq m^{-3}), seguidos por las plantas bajas (78 Bq m^{-3}), y en último lugar las plantas superiores (50 Bq m^{-3}). Esta variación apoya la idea de que el factor que más afecta a la concentración de radón *indoor* es la exhalación por parte del terreno. Además, se encontró influencia tanto de la ventilación como de los materiales de construcción empleados sobre las concentraciones de radón.

En cuanto a la distribución por poblaciones, todas presentan valores de concentración relativamente uniformes a excepción de Teror, donde se midieron valores notablemente superiores al resto. En la geología de la zona predominan los materiales sálicos pertenecientes al primer ciclo volcánico, lo que podría explicar los elevados valores encontrados.

En otro estudio realizado por el Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna (Rodríguez-Losada, comunicación personal) se midió la concentración de radón en sótanos o semisótanos de una serie de viviendas, obteniéndose los datos que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de radón en viviendas de la isla de Gran Canaria. Elaboración propia. Datos de Rodríguez-Losada (comunicación personal).

Vivienda	Altitud (m)	Concentración (Bq m ⁻³)	Coordenadas UTM (28R)
1	14	64 ± 1.7	447767 3113577.7
2	15	269 ± 1.9	449650 3073365.4
3	65	225 ± 2.5	457465.9 3110667.9
4	720	62 ± 2.2	450771.6 3099142.3
5	115	484 ± 6.8	459049.8 3097757.7
6	25	90 ± 2.1	442174.7 3070667.1

Se puede observar que, mientras que las viviendas 1, 4 y 6 presentan valores por debajo de los 100 Bq m⁻³, en las viviendas 2, 3 y 5 se supera este valor, alcanzando los 484 Bq m⁻³ en el caso de la vivienda número 5. El CSN recomienda un nivel de referencia en edificios ya existentes de 300 Bq m⁻³ (CSN, 2012). En base a este criterio, sería conveniente la implementación de técnicas de mitigación con el fin de reducir la concentración de radón en la medida de lo posible. Estas técnicas abarcan desde intervenciones sencillas como el sellado de grietas y fisuras o la ventilación adecuada de la vivienda hasta otras más complejas como la instalación de sistemas de extracción o filtros de aire (WHO, 2009), y tanto su efectividad como su coste y/o conveniencia varían ampliamente en función del sistema del que se trate.

En definitiva, la concentración de radón en el interior de la mayoría de las viviendas estudiadas en Gran Canaria se encuentra en un nivel aceptable, bastante inferior al máximo recomendado por los organismos competentes en la materia. No obstante, existen viviendas cuya concentración se acerca al límite e incluso lo sobrepasa, lo que sugiere la existencia de zonas propensas al radón en las que sería conveniente la vigilancia para, en caso necesario, aplicar medidas correctivas.

Radón en aguas subterráneas

Aunque la mayor parte del radón proviene del suelo y los materiales de construcción, el radón disuelto en el agua también puede suponer una fuente de exposición a las radiaciones ionizantes. Si bien se libera rápidamente a la atmósfera cuando se encuentra disuelto en

aguas superficiales, su concentración en aguas subterráneas puede ser elevada. En caso de que esta agua se destine a consumo humano, el radón disuelto en la misma puede pasar a la atmósfera de las viviendas durante la realización de actividades domésticas o incluso ser ingerido con el agua, contribuyendo así a la dosis de radiación recibida por el público.

Además de su importancia desde un punto de vista de salud pública, el radón puede ser utilizado como trazador geofísico con el fin de identificar y cuantificar descargas de aguas subterráneas en aguas superficiales o de caracterizar las formaciones geológicas por las que discurren las aguas subterráneas (Alonso *et al.*, 2015).

En Gran Canaria se ha llevado a cabo un muestreo de radón en pozos y manantiales alimentados por el acuífero norte de la isla (Alonso *et al.*, 2015). Los resultados obtenidos se muestran a continuación (Tabla 5).

Tabla 5. Concentración de radón en muestras de aguas subterráneas en Gran Canaria. Adaptado de Alonso *et al.* 2015.

Muestra	Cota (m snm)	Profundidad (m snm)	Cota del fondo (m snm)	[²²² Rn] (Bq L ⁻¹)
Rd1	235	0	235	76.9 ± 8.3
Rd2	108	150	-42	51.9 ± 8.9
Rd3	430	176	254	0.3 ± 0.3
Rd4	354	192	162	5.7 ± 1.9
Rd5	725	151	574	7.4 ± 3.7
Rd6	235	123	112	1.3 ± 1.0
Rd7	679	290	389	12.5 ± 3.1
Rd8	603	340	263	30.8 ± 6.4
Rd9	345	150	195	19.2 ± 4.6
Rd10	515	360	155	3.8 ± 2.4
Rd11	377	125	252	28.2 ± 6.1
Rd12	996	450	546	1.8 ± 1.0
Rd13	499	200	299	14.8 ± 4.1
Rd14	452	400	52	0.9 ± 0.8
Rd15	620	315	305	9.7 ± 2.6
Rd16	740	280	460	2.8 ± 1.2
Rd17	260	170	90	0.8 ± 0.8
Rd18	523	230	293	37.3 ± 8.1
Rd19	420	372	48	4.2 ± 1.9
Rd20	625	400	225	4.9 ± 1.7
Rd21	810	302	508	2.6 ± 1.4

Rd22	481	143	338	12.4 ± 3.3
Rd23	750	608	142	1.8 ± 0.9
Rd24	1050	540	510	3.1 ± 1.4
Rd25	445	340	105	3.4 ± 1.5
Rd26	598	394	204	10.9 ± 2.8
Rd27	182	150	32	6.6 ± 2.5
Rd28	827	355	472	3.7 ± 1.5

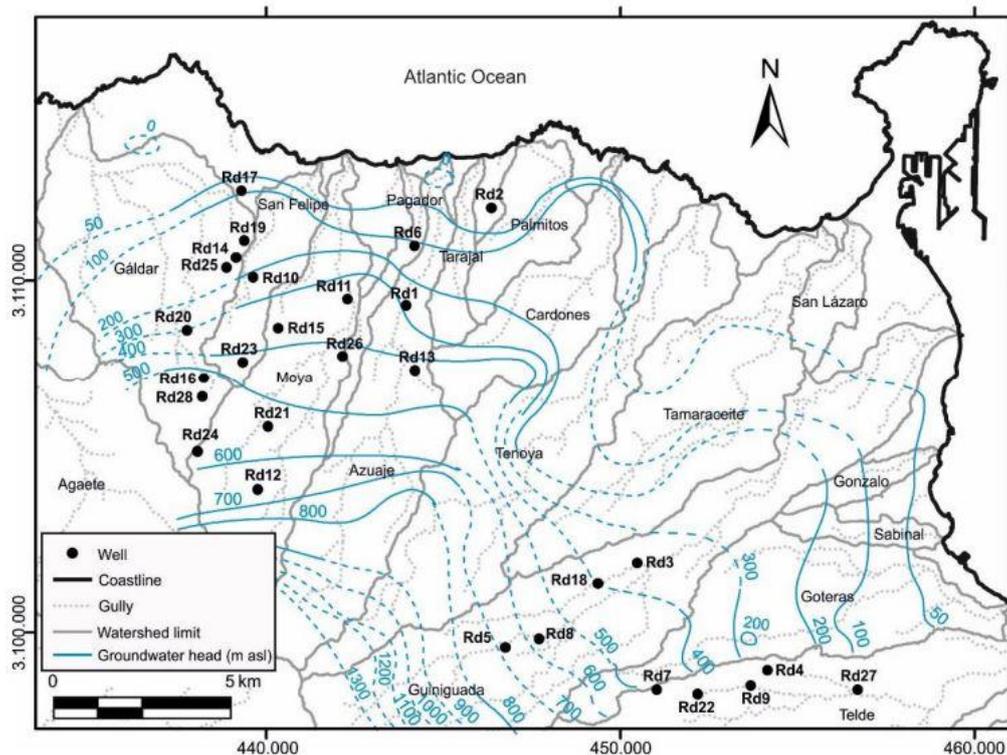


Figura 8. Localización geográfica de las muestras de agua y curvas de nivel piezométrico de las aguas subterráneas en el año 2008-2009 (Alonso *et al.*, 2015).

Los valores obtenidos oscilan entre 0.3 y 76.9 Bq L⁻¹, con una media de 12.8 Bq L⁻¹. Todos estos valores se encuentran por debajo del nivel de actuación recomendado (Comisión Europea, 2013), que se sitúa en 100 Bq L⁻¹. Atendiendo a la distribución espacial de los resultados se pueden establecer tres grupos que engloban pozos geográficamente próximos entre sí y con valores relativamente similares (Figura 9). El primer grupo, representado por la línea azul, presenta valores de concentración bajos (inferiores a 10 Bq L⁻¹) y comprende pozos localizados mayormente en la cuenca de Guía, incluyendo algunos asociados a la cuenca de Moya. En segundo lugar (línea verde), el grupo que presenta los valores más elevados incluye

puntos localizados en el norte de la isla, principalmente en la cuenca de Azuaje, con algunos pozos pertenecientes a la cuenca media de Moya. Por último (línea naranja), el grupo situado más al noreste incluye las muestras correspondientes a las cuencas de Guinguada y Telde, y sus valores son intermedios.

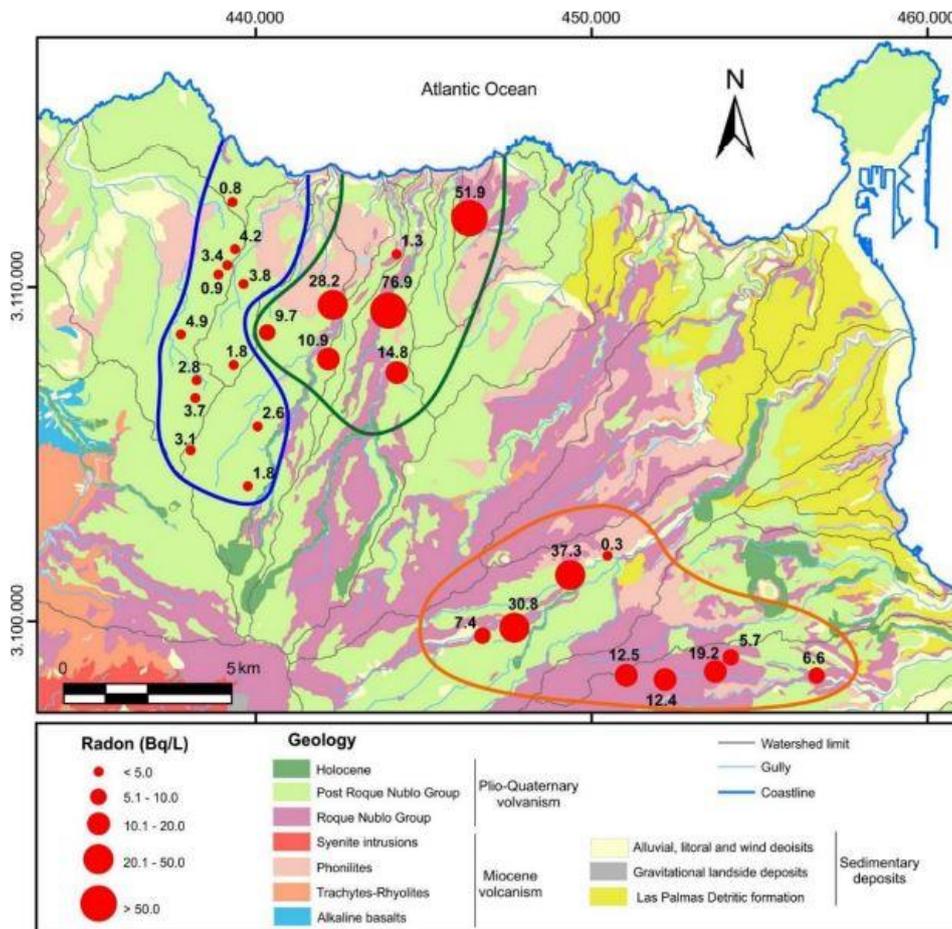


Figura 9. Distribución espacial de la concentración de radón en muestras de agua. Las muestras se agrupan en función de su localización geográfica y de su concentración de radón (Alonso *et al.*, 2015).

Según los datos existentes acerca de la geología profunda (Alonso *et al.*, 2015), las aguas del primer grupo discurren por rocas básicas con poco contenido en precursores de radón, mientras que las del segundo grupo fluyen por un territorio con mayor contenido en rocas ácidas. Para el tercer grupo no se dispone de una sección vertical de la geología, aunque muchos de los pozos se localizan sobre coladas del grupo Roque Nublo, de forma que es posible suponer que exista una gran proporción de rocas básicas en el subsuelo que expliquen la ausencia de valores elevados en esta área.

Así pues, los datos obtenidos en el acuífero norte de Gran Canaria permiten clasificar las aguas subterráneas de esta zona como seguras desde el punto de vista radiológico, dado que no sobrepasan el umbral de 100 Bq L⁻¹. Además, los resultados concuerdan con lo que cabría esperar en base a la composición de la geología profunda de la isla, lo que sugiere la utilidad del empleo de la concentración de radón en aguas subterráneas como indicador de la composición geológica de los materiales subterráneos.

Zonas propensas al radón. Mapas de potencial de radón.

Con el fin de facilitar la elaboración de planes de acción eficaces que den prioridad a aquellos territorios donde el riesgo para la población sea mayor, se pueden desarrollar mapas predictivos que permitan identificar aquellas zonas propensas al radón (*radon prone areas*), es decir, áreas con una elevada probabilidad de contener viviendas con niveles de radón por encima del valor nacional de referencia (WHO, 2009).

Como se ha dicho anteriormente, la concentración de radón en una vivienda es una función de diversos factores (la mayor parte geológicos y meteorológicos, aunque también algunos relacionados con el diseño de las construcciones o los hábitos domésticos). Por ello, a la hora de diseñar mapas predictivos resulta útil el empleo de índices que integren información proveniente de diversas variables. Estos índices suelen basarse en parámetros físicos y geológicos, puesto que las variables antropogénicas a menudo varían con el tiempo o incluso entre distintas regiones (Pasztor *et al.*, 2016).

En este contexto, se define el potencial de radón geogénico como una magnitud que proporciona una medida cuantitativa de “lo que la tierra entrega” en términos de radón. El potencial de radón geogénico constituye un indicador de la capacidad del suelo para constituir una fuente de radón *indoor* (Alonso, 2019) y, aunque distintos autores emplean metodologías ligeramente diferentes, normalmente resulta de una combinación entre la concentración de actividad de radón en el suelo y la permeabilidad del suelo a los gases. La relación entre el potencial de radón geogénico y la concentración de radón *indoor* ha sido probada por diversos estudios (Giustini *et al.*, 2019).

Con el fin de obtener una representación del potencial de radón geogénico en la isla de Gran Canaria, Alonso *et al.*, (2019) llevaron a cabo mediciones de la concentración de radón en el suelo y de la permeabilidad del suelo a los gases a lo largo de la isla. A partir de estos parámetros, calcularon el potencial de radón geogénico según el método descrito por Neznal *et al.*, (2004), y mediante la interpolación geoestadística de los datos obtuvieron el mapa de riesgo que se muestra en la Figura 10.

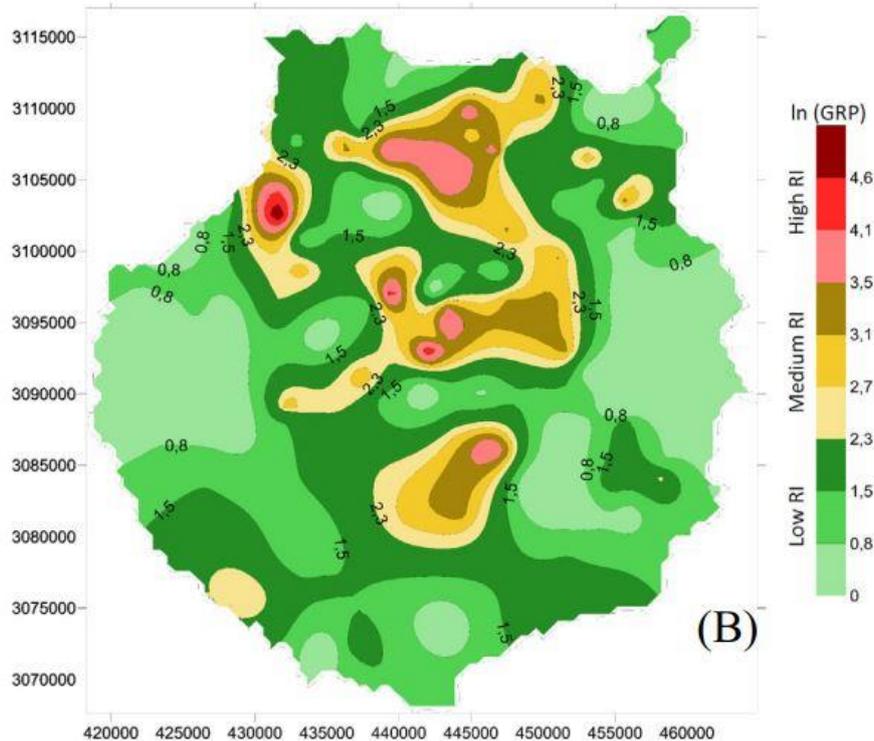


Figura 10. Mapa de potencial de radón en Gran Canaria (escala logarítmica) (Alonso *et al.*, 2019).

Los colores del mapa representan diferentes categorías de riesgo en base al potencial de radón geogénico. Como puede observarse, la mayor parte de la isla presenta un riesgo bajo, con sólo algunas zonas de riesgo medio y alto situadas principalmente en el centro y norte de la isla. Estas áreas se corresponden con suelos provenientes de rocas intermedias y ácidas características del Ciclo Antiguo y el Ciclo Roque Nublo, por lo que los resultados resultan coherentes con la geología. Por otro lado, las zonas de riesgo bajo son aquellas en las que predominan los materiales de naturaleza basáltica característicos del vulcanismo post-Roque Nublo, así como aquellas zonas de depósitos aluviales y eólicos.

Por tanto, podemos decir que la isla de Gran Canaria presenta un potencial de radón geogénico bajo en la mayor parte de su superficie, aunque éste alcanza niveles elevados en determinadas zonas que podrían clasificarse como áreas propensas al radón.

Conclusiones

El radón constituye la mayor fuente de radiación ionizante recibida por el público y, a causa de sus efectos nocivos sobre la salud, se hacen necesarios tanto la identificación de aquellas áreas con concentraciones elevadas de radón como el establecimiento de medidas destinadas a mitigar sus efectos.

Las fuentes principales de radón son el suelo sobre el que se asientan las edificaciones, los materiales empleados en la construcción y en menor medida el agua proveniente de fuentes subterráneas. El potencial de radón de un territorio está fuertemente relacionado con sus características geológicas.

La isla de Gran Canaria muestra un potencial de radón geogénico bajo en la mayor parte del territorio, con sólo algunas zonas propensas al radón en el norte de la isla. La distribución espacial de este potencial coincide con lo que cabría esperar de acuerdo con la geología de la isla, con aquellas áreas donde abundan las rocas más diferenciadas presentando los mayores niveles de radón, ya sea en rocas, viviendas o aguas subterráneas.

Por tanto, podemos concluir que el riesgo por radón para los habitantes de Gran Canaria es, por lo general, bajo. No obstante, sería recomendable un mayor número de medidas en aquellas zonas clasificadas como propensas al radón, además de evitar la extracción de materiales para la construcción de aquellas formaciones rocosas cuya concentración de radón es elevada.

Conclusions

Radon constitutes the main dose of ionising radiation to the public and, given its harmful effects, both the identification of areas in which the radon levels are elevated and the implementation of mitigation measures are needed.

Main sources of radon are the soil on which the edifications are built, building materials and, to a lesser extent, water coming from underground sources. Radon potential of an area is heavily correlated to its geologic features.

Gran Canaria's geogenic radon potential is low in most parts of the island, with only few radon prone areas in the north. Its spatial distribution matches the geology, with those areas with the most differentiated rocks presenting the highest radon levels, either in rocks, dwellings or groundwaters.

Therefore, we can conclude that radon risk for the inhabitants of Gran Canaria is, in general, low. However, it would be advisable to take more measurements in those areas classified as radon prone, as well as avoiding extraction of building materials from those rock formations whose radon concentration is elevated.

Bibliografía

- Alonso, H. 2016.** El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales. Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Alonso, H., Cruz-Fuentes, T., Rubiano, J. G., González-Guerra, J., Cabrera, M. C. et al. 2015.** Radon in Groundwater of the Northeastern Gran Canaria Aquifer. *Water* **7**: 2575-2590.
- Alonso, H., Rubiano, J. G., Guerra, J. G., Arnedo, M. A., Tejera, A. et al. 2019.** Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils. *Science of the Total Environment* **664**: 449-460.
- Appleton, J. D. 2007.** Radon: sources, health risks and hazard mapping. *AMBIO* **36**: 85-89.
- Appleton, J. D. 2013.** Radon in air and water, pp. 239-278. En: Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R. et al. (eds.), *Essentials of medical geology* (Revised Edition). Springer.
- Auvinen, A., Salonen, L., Pekkanen, J., Pukkala, E., Ilus, T. et al. 2005.** Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: A case-cohort study in Finland. *International Journal of Cancer* **114**: 109-113.
- Barbosa-Lorenzo, R., Barros-Dios, J. M., Raíces, M., Cerdeira, S. & Ruano-Ravina, A. 2016.** Residential radon and cancers other than lung cancer: a cohort study in Galicia, a Spanish radon-prone area. *European Journal of Epidemiology* **31**: 437-441.
- Berlin, R. & Henderson, C.M.B. 1969.** The distribution of Sr and Ba between the alkali feldspar, plagioclase and ground mass phases of porphyritic trachytes and phonolites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **33**: 247-255.
- Carracedo, J. C., Pérez Torrado, F. J., Ancochea, E., Meco, J., Hernán, F. et al. 2002.** Cenozoic volcanism II: the Canary Islands pp. 439-472. En: Gibbons, W. & Moreno, T. (eds.), *The geology of Spain*. The Geological Society, London.
- Charles, M. 2001.** UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Journal of Radiological Protection* **21**: 83-86.

- Comisión Europea 2013.** Directiva 2013/51/Euratom del Consejo, de 22 de octubre de 2013, por la que se establecen requisitos para la protección sanitaria de la población con respecto a las sustancias radiactivas en las aguas destinadas al consumo humano. *Diario Oficial de la Unión Europea* **296**: 12-21.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) 2004.** Concentraciones de radón en viviendas españolas. Otros estudios de radiación natural. *Colección Informes Técnicos 13.2004*.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) 2010.** Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. *Colección Informes Técnicos 24.2010*.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) 2012.** Guía de Seguridad 11.2. Control de la exposición a fuentes naturales de radiación.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H. et al. 2005.** Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* **330**: 223.
- Drolet, J. P., Martel, R., Poulin, P., Dessau, J. C., Lavoie, D. et al. 2013.** An approach to define potential radon emission level maps using indoor radon concentration measurements and radiogeochemical data positive proportion relationships. *Journal of Environmental Radioactivity* **124**: 57-67.
- Giustini, F., Ciotoli, G., Rinaldini, A., Ruggiero, L. & Voltaggio, M. 2019.** Mapping the geogenic radon potential and radon risk by using Empirical Bayesian Kriging regression: A case study from a volcanic area of central Italy. *Science of the Total Environment* **661**: 449-464.
- Hernández Gutiérrez, L. E. 2014.** Caracterización geomecánica de las rocas volcánicas de las Islas Canarias. Tesis doctoral, Universidad de La Laguna.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN).** Geología y tectónica de Gran Canaria. https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag_sismotectonicas/can_grancanaria.html - Consultada el 6 de septiembre de 2021.
- Instituto Nacional de Estadística (INE) 2021.** Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero. <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2910> – Consultada el 6 de septiembre de 2021.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP) 2014.** Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP* **43**(3).
- Kang, J. K., Seo, S. & Jin, Y. W. 2019.** Health Effects of Radon Exposure. *Yonsei Medical Journal* **60**(7): 597-603.
- Kendall, G. M. & Smith, T. J. 2002.** Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection* **22**: 389-406.
- Krewski, D., Lubin, J. H., Zielinski, J. M., Alavanja, M., Catalan, V. S. et al. 2005.** Residential Radon and Risk of Lung Cancer. A combined Analysis of 7 North American Case-Control Studies. *Epidemiology* **16**: 137-145.
- Laurier, D., Valenty, M. & Timarche, M. 2001.** Radon exposure and the risk of leukemia: a review of epidemiological studies. *Health Physics* **81**: 272-288.
- Lorenzo-González, M., Torres-Durán, M., Barbosa-Lorenzo, R., Provencio-Pulla, M., Barros-Dios, J. M. et al. 2019.** Radon exposure: a major cause of lung cancer. *Expert Review of Respiratory Medicine* **13**: 839-850.
- Messier, K. P. & Serre, M. L. 2017.** Lung and stomach cancer associations with groundwater radon in North Carolina, USA. *International Journal of Epidemiology* **46**: 676-685.
- Neznal, M., Neznal, M., Matolín, M., Barnet, I. & Miksova, J. 2004.** The new method for assessing the radon risk of building sites. *Czech Geological Survey Special Papers* **16**: 7-13. <http://www.radon-vos.cz/pdf/metodika.pdf>
- Pásztor, L., Szabó, K. Z., Szatmári, G., Laborczi, A. & Horváth, Á. 2016.** Mapping geogenic radon potential by regression kriging. *Science of the Total Environment* **544**: 883-891.

- Pérez Torrado, F. J. 2000.** Historia geológica de Gran Canaria. I Jornadas Canarias de Geología. Las Palmas de Gran Canaria.
- Rericha, V., Kulich, M., Rericha, R., Shore, D. L., & Sandler, D. P. 2006.** Incidence of Leukemia, Lymphoma, and Multiple Myeloma in Czech Uranium Miners: A Case-Cohort Study. *Environmental Health Perspectives* **114**(6): 818-822.
- Robayna Duque, B. E. 1998.** Radón en viviendas de las Islas Canarias Occidentales: Distribución geográfica y dosimetría. Tesis doctoral, Universidad de La Laguna.
- Robertson, A., Allen, J., Laney, R. & Curnow, A. 2013.** The Cellular and Molecular Carcinogenic Effects of Radon Exposure: A Review. *International Journal of Molecular Sciences* **14**: 14024-14063.
- Rodríguez-González, A., Pérez-Torrado, F. J., Fernández-Turiel, J. L., Aulinas, M., Paris, R. et al. 2018.** The Holocene volcanism of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Journal of Maps* **14**(2): 620-629.
- Ruano-Ravina, A., Kelsey, K. T., Fernández-Villar, A. & Barros-Dios, J. M. 2017.** Action levels for indoor radon: different risks for the same lung carcinogen? *European Respiratory Journal* **50**: 1701609.
- Tommasino, L. 2005.** Radiochemical Methods — Radon, pp. 32-44. En: Worsfold, P., Townshend, A. & Poole, C. (eds.), *Encyclopedia of Analytical Science* (Second Edition). Elsevier.
- Toti, S., Biggeri, A. & Forastiere, F. 2005.** Adult myeloid leukaemia and radon exposure: a Bayesian model for a case-control study with error in covariates. *Statistics in Medicine* **24**: 1849-1864.
- Viñas, R., Eff-Darwich, A., Rodríguez-Losada, J. A. & Hernández, L. E. 2012.** A regional scale radon monitoring network in the volcanic island of Tenerife, Canary Islands (Spain). The American Association of Radon Scientists and Technologists (AARST). US.
- Wheeler, B. W., Allen, J., Depledge, M. H. & Curnow, A. 2012.** Radon and skin cancer in southwest England: an ecologic study. *Epidemiology* **23**(1): 44-52.
- World Health Organization (WHO) 2009.** WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO Press Geneva.