

Niveles de radón (^{222}Rn) en oficina pública de Aldama, Chihuahua, México y grado de exposición al trabajador

Indoor radon (^{222}Rn) in a public workplace of Aldama, Chihuahua, Mexico and level of worker exposure

Hilse Ximena Salinas-Ramírez¹, Héctor Osbaldo Rubio-Arias¹, Luis Colmenero-Sujo²,
Sergio Dionisio Luévano-Gurrola¹, Jesús Manuel Ochoa-Rivero^{3*}

¹ Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Periférico. R. Almada, km. 1. Chihuahua, Chihuahua C.P. 31453, México

² Instituto Tecnológico de Chihuahua II. Ave. de las Industrias 11101, Complejo Industrial Chihuahua, C.P. 31130. Chihuahua, México

³ Campo Experimental la Campana, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). carretera Chihuahua-Ojinaga Km. 33.3, C.P. 32910. Aldama, Chihuahua, México.

*Autor de correspondencia

Resumen

La inhalación de gas radón (^{222}Rn) induce cáncer de pulmón en humanos. El objetivo de este estudio fue cuantificar la concentración de ^{222}Rn en una oficina pública. El estudio se llevó a cabo en dos etapas; en la primera etapa (PE) se cuantificó a tres alturas (0.74 m, 1.33 m y 2.06 m) alejado de la puerta y en la segunda etapa (SE) se cuantificó en el centro. Los niveles de ^{222}Rn (Bq m^{-3}) se obtuvieron con un equipo *AlphaGuard, Professional Radon Monitor*. Se hizo un análisis Anova ($\alpha = 0.05$) considerando un diseño de tratamientos factorial 3×2 . Se detectaron diferencias estadísticas para el factor de altura ($p < 0.05$) y para el factor tiempo ($p < 0.05$), pero no para la interacción ($p > 0.05$) en PE y SE. La concentración de ^{222}Rn fue mayor a la altura de 0.74 m (161.31 Bq m^{-3} en PE y 168.21 Bq m^{-3} en SE), que es superior a las normas internacionales (100 Bq m^{-3} de la Organización Mundial de la Salud [OMS] y 148 Bq m^{-3} para Estados Unidos de Norteamérica [EUA]).

Palabras clave: Radiactividad; radón interior; oficina; riesgo para la salud.

Abstract

The inhalation of radon gas (^{222}Rn) induces lung cancer in humans. The objective of this research was to quantify the ^{222}Rn levels in a public office. The study was carried out in two stages; in the first stage (FS), the ^{222}Rn was determined at three high levels (0.74 m, 1.33 m and 2.06 m) away from the main door, while in the second stage (SS) it was determined at the center of the office. The concentration was obtained with a portable AlphaGuard device, Professional Radon Monitor. An ANOVA analysis was performed for each step ($\alpha = 0.05$), considering a factorial arrangement design 3×2 . For both FS and SS were detected statistical differences for the height factor ($p < 0.05$) and time factor ($p < 0.05$), but not for the interaction ($p > 0.05$). The ^{222}Rn concentration was greatest at the height of 0.74 m (161.31 Bq m^{-3} in FS and 168.21 Bq m^{-3} in SS) which is higher than that of the international standards of the World Health Organization (WHO) of 100 Bq m^{-3} and higher than the standards of the United States of America (USA) of 148 Bq m^{-3} .

Keywords: Radioactivity; indoor radon; office; health risk.

Recibido: 03 de octubre de 2019

Aceptado: 27 de noviembre de 2019

Publicado: 12 de febrero de 2020

Como citar: Salinas-Ramírez, H. X., Rubio-Arias, H. O., Colmenero-Sujo, L., Luévano-Gurrola, S. D., & Ochoa-Rivero, J. M. (2020). Niveles de radón (^{222}Rn) en oficina pública de Aldama, Chihuahua, México y grado de exposición al trabajador. *Acta Universitaria* 30, e2458. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2020.2458>

Introducción

El radón (Rn) es un elemento radiactivo que se identifica en el grupo de los gases nobles. El Rn es un gas incoloro, inodoro e insípido. El isótopo ^{222}Rn tiene 86 protones y 136 neutrones y se genera por la desintegración natural del radioisótopo ^{226}Ra de la serie de decaimiento del ^{238}U . En consecuencia, un medio ambiente o ecosistema con altos niveles de uranio generará radón, el cual emana del subsuelo hacia la superficie a través de las rocas o grietas del estrato rocoso, hasta integrarse al ambiente superficial exterior o, bien, agregarse a un ambiente cerrado como una casa-habitación u oficina. La importancia del ^{222}Rn en un ambiente cerrado se magnifica cuando se analizan los resultados de un estudio desarrollado en los Estados Unidos de Norteamérica (EUA) que concluyó que entre el 10% y 15% del cáncer de pulmón que se presentaba entre los habitantes de ese país y Canadá era causado por exposición al gas radón (National Research Council [NRC], 1999). En México, los investigadores Espinosa, Golzarri, Angeles, & Griffith (2009) documentaron niveles de radón en lugares de trabajo en 24 estados del país y encontraron los niveles más altos en los estados de Jalisco (197 Bq m^{-3}), Guerrero (153 Bq m^{-3}) y Chihuahua (145 Bq m^{-3}).

Los antecedentes de que el ^{222}Rn ocasionaba problemas de salud en lugares cerrados se presentó en minas de uranio. De hecho, el médico Alemán Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus Paracelsus, mejor conocido con la alocución latina de Paracelso, fue de los primeros en documentar la enfermedad identificada como *el consumo del minero*. Esta enfermedad, posteriormente, se diagnosticaría como cáncer de pulmón que era común en los trabajadores con exposición de gas ^{222}Rn en lugares cerrados. Esto se explica en razón de que una vez que el ^{222}Rn y sus descendientes experimentan un decaimiento radioactivo, empiezan a emitir partículas alfa de alta energía, que potencialmente representan un riesgo para la salud humana y animal (Armienta Rodríguez, Segovia & Monteil, 2010; Espinosa & Golzarri, 2016).

Diversos estudios han sido efectuados en diferentes partes del mundo, como en México (Colmenero *et al.*, 2004; Espinosa, Golzarri, Román-Sedano & Castillo, 2019; Lerma-Treviño, Rubio-Arias, Colmenero-Sujo, Villalba, & Ochoa-Rivero, 2018; Tommasino & Espinosa, 2018), Costa Rica (Barquero, Fernandez, Monnin, Seidel & Segocia, 2005), Nicaragua (Connor, Hill, La Femina, Navarro & Conway, 1996), El Salvador (Cartagena *et al.*, 2004) y otros países (Manchado, Cervantes & Lantigus, 2005), con el fin de conocer la concentración del ^{222}Rn y el riesgo a la salud de las personas en distintos ambientes y comunidades. Un estudio reciente desarrollado por Lerma-Treviño *et al.* (2018) en ciudad Aldama, Chihuahua, encontró que los habitantes presentaban una alta exposición a ^{222}Rn en sus casas habitación; es decir, por arriba de las recomendaciones internacionales. Sin embargo, poco se conoce, o no está documentado, el nivel al que estaría expuesto una persona que labora en una oficina pública. Para el estado de Chihuahua, México, esta información es relevante cuando se relaciona con su geología, ya que cuenta con grandes áreas naturales ricas en uranio (Villalba *et al.*, 2015). De hecho, algunas estimaciones muestran que alrededor del 50% de las reservas uraníferas de México (Sierra de Peña) se localizan en el municipio de Aldama en el estado de Chihuahua (Dahlkamp, 2010). Al analizar que los empleados de oficinas públicas laboran en espacios cerrados por alrededor de ocho horas diarias realizando sus actividades, en consecuencia, es necesario documentar su nivel de exposición al gas ^{222}Rn . Por esta razón, el objetivo del presente estudio fue medir los niveles de ^{222}Rn en una oficina pública y su relación con cáncer de pulmón. La hipótesis fue que los niveles de ^{222}Rn en las oficinas públicas pueden ser mayores a los sugeridos por la normatividad internacional promoviendo el cáncer de pulmón entre los trabajadores. Esto es importante, ya que el ^{222}Rn es el segundo responsable del cáncer de pulmón entre la población después del tabaco (United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation [UNSCEAR], 2000; 2008).

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en una oficina pública localizada en ciudad Aldama, Chihuahua, México, en el periodo de diciembre de 2016 a febrero de 2017. La ciudad de Aldama se localiza a 30 km de la ciudad de Chihuahua, en el estado de Chihuahua, México, en $28^{\circ} 50' 30.1''$ Latitud Norte y $105^{\circ} 55' 31.7''$ Longitud Oeste (figura 1). Se seleccionó la ciudad de Aldama, debido a que este Municipio posee las mayores reservas uraníferas de México, estimándose en este ecosistema más del 50% de dichas reservas (Dahlkamp, 2010; Villalba *et al.*, 2013). La zona de estudio se localiza a 1799 msnm, presenta un clima seco y una fluctuación de la temperatura en primavera y verano con una máxima de 41.9°C y en la temporada invernal una mínima de -7.9°C . La precipitación pluvial promedio es de 334 mm que se presenta en el periodo de julio-septiembre y también se pueden exhibir algunas precipitaciones de nieve en la temporada invernal (diciembre-marzo).

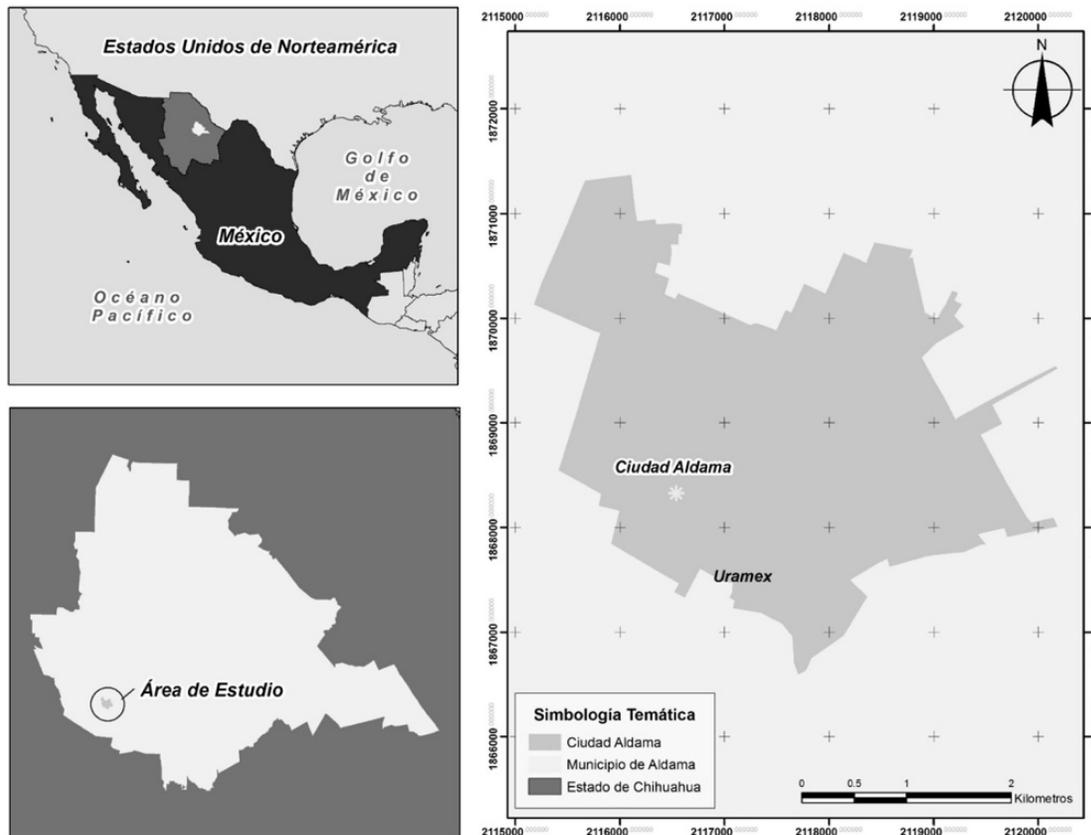


Figura 1. Ubicación geográfica de ciudad Aldama, Chihuahua, México.

Fuente: Elaboración propia.

El estudio se llevó a cabo en dos etapas. En la primera etapa (PE) se determinó la concentración de ^{222}Rn a tres niveles de altura, tomando como base el piso de la oficina. Las alturas fueron de 0.74 m, 1.33 m y 2.06 m, y se consideró el lugar más alejado de la puerta de acceso de la oficina, es decir, el lugar menos ventilado. En la segunda etapa (SE), se determinó la concentración de ^{222}Rn de manera similar a la primera etapa, pero cambiando el lugar al centro de la oficina. La oficina de estudio ocupa un espacio de aproximadamente 12 m^2 y cuenta con una sola puerta de acceso, así como un ventanal de cristal claro.

La cuantificación del ^{222}Rn se obtuvo con un equipo portátil *AlphaGuard, Professional Radon Moniton* (Genicron Instruments GmbH-Modelo P30). Este equipo mide la concentración de ^{222}Rn cada 10 min en Becquerel por metro cúbico (Bq m^{-3}). Al momento de instalar el equipo de medición, se verificaba que la cámara de ionización (*alpha spectroscopy*) se localizara hacia el centro de la oficina. En forma adicional a la concentración del ^{222}Rn , se obtenía la información de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) cada 10 min. En la PE se obtuvo información de tres días y tres noches en forma continua, mientras que en la SE fueron cuatro días y cuatro noches, por lo que se generó una base de datos de 2016 mediciones y de 2910, respectivamente.

Análisis estadístico

Se condujo un análisis de varianza (Anova) para cada etapa por separado, es decir, para PE y SE en forma independiente. Se consideró un diseño de tratamiento factorial 3×2 , donde el factor A fue la altura con tres niveles (0.74 m, 1.33 m y 2.06 m), mientras que el factor B fue el Tiempo de lectura con dos niveles; durante el día (9:00 a 21:00 horas) y durante la noche (21:00 h a 9:00 h). Se elaboraron gráficas de respuesta (estadística descriptiva) y se realizó un análisis de correlación, utilizando el paquete estadístico Minitab 16 (Rubio & Jiménez, 2012). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando un nivel de significancia de 0.05, es decir, $\alpha = 0.05$.

Resultados

En la tabla 1 se presenta un concentrado del nivel de ^{222}Rn medido en las dos etapas del estudio, es decir, para la PE y SE. Se puede visualizar claramente que en todas las mediciones los niveles de ^{222}Rn fueron mayores en la menor altura (0.74 m) y durante la noche. Por ejemplo, a la altura 0.74 m en la PE se presentó una concentración de 148.62 Bq m^{-3} durante el día, valor que fue menor a lo observado durante la noche de 174.08 Bq m^{-3} . Un resultado similar fue obtenido en la SE a la misma altura de 0.74 m, ya que se tuvo una concentración de 151.71 Bq m^{-3} durante el día y una de 184.71 Bq m^{-3} durante la noche.

Tabla 1. Análisis de la concentración de ^{222}Rn en una oficina pública medido en dos etapas.

Etapas	Altura (m)	Tiempo de Lectura	Media (Bq m^{-3})	Error Estándar de la Media ($\pm\text{SEM}$)	Desviación Estándar ($\pm\text{SD}$)
Primera etapa	0.74	Día	148.62	2.73	41.74
		Noche	174.08	3.91	55.19
	1.33	Día	112.31	3.99	58.62
		Noche	139.30	4.68	69.46
	2.06	Día	137.23	3.08	73.54
		Noche	168.54	2.94	70.53
Segunda etapa	0.74	Día	151.71	1.84	59.43
		Noche	184.71	2.25	70.82
	1.33	Día	133.88	3.13	46.97
		Noche	151.77	3.76	54.61
	2.06	Día	145.91	2.82	42.04
		Noche	175.62	3.67	53.17

Fuente: Elaboración propia.

El Anova para la PE detectó diferencias estadísticas por efecto de altura ($p < 0.05$) y por efecto de tiempo de lectura ($p < 0.05$), pero no para la interacción ($p > 0.05$). La figura 2(a) muestra que la mayor concentración de ^{222}Rn fue a los 0.74 m de altura con 161.31 Bq m^{-3} , luego descendió a los 1.33 m con un nivel de 125.92 Bq m^{-3} , para luego aumentar a los 2.06 m con una concentración de 152.95 Bq m^{-3} . Además,

en figura 2(b) es notorio que la máxima concentración de ^{222}Rn se presentó durante la noche con 163.18 Bq m^{-3} , mientras que en el día la concentración promedio fue de 135.57 Bq m^{-3} .

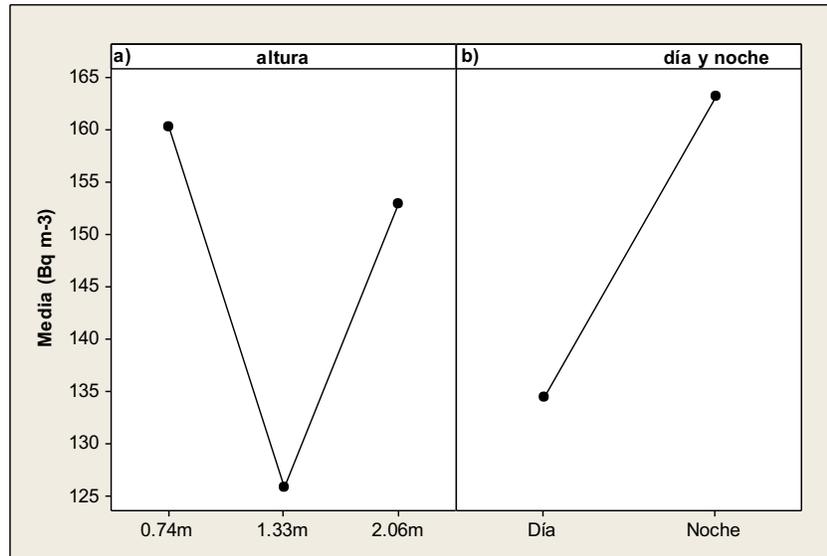


Figura 2. Niveles de ^{222}Rn de la PE de una oficina pública en ciudad Aldama, Chihuahua, México.
Fuente: Elaboración propia.

De manera similar en los resultados de la SE también se encontraron diferencias estadísticas por efecto de altura ($p < 0.05$), por efecto de tiempo de lectura ($p < 0.05$), pero no para la interacción ($p > 0.05$). La figura 3a muestra que la mayor concentración de ^{222}Rn se detectó a los 0.74 m de altura con 168.21 Bq m^{-3} , luego descendió a los 1.33 m con un nivel de 142.53 Bq m^{-3} , para luego aumentar a los 2.06 m con una concentración de 160.31 Bq m^{-3} . En la figura 3b también es notorio que la máxima concentración de ^{222}Rn se presentó durante la noche con 178.42 Bq m^{-3} , mientras que en el día la concentración promedio fue de 148.15 Bq m^{-3} .

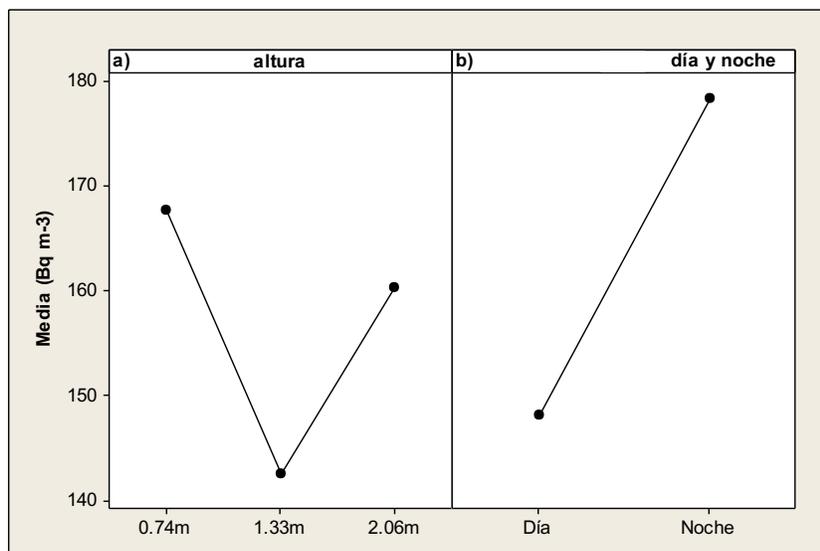


Figura 3. Niveles de ^{222}Rn de la SE de una oficina pública en ciudad Aldama, Chihuahua, México.
Fuente: Elaboración propia.

El análisis estadístico de correlación entre los niveles de ^{222}Rn y la temperatura fue altamente significativo ($p = 0.000$) tanto para la PE como para la SE, ambos con valores negativos, significando que en la medida que los valores de y se reducen, los valores de x se incrementan. La figura 4 muestra claramente cómo en la PE, durante la noche los niveles de ^{222}Rn se incrementaban en la medida que descendía la temperatura. Este efecto fue similar para la concentración de ^{222}Rn y la temperatura ambiental en la SE, lo cual se muestra en la figura 5.

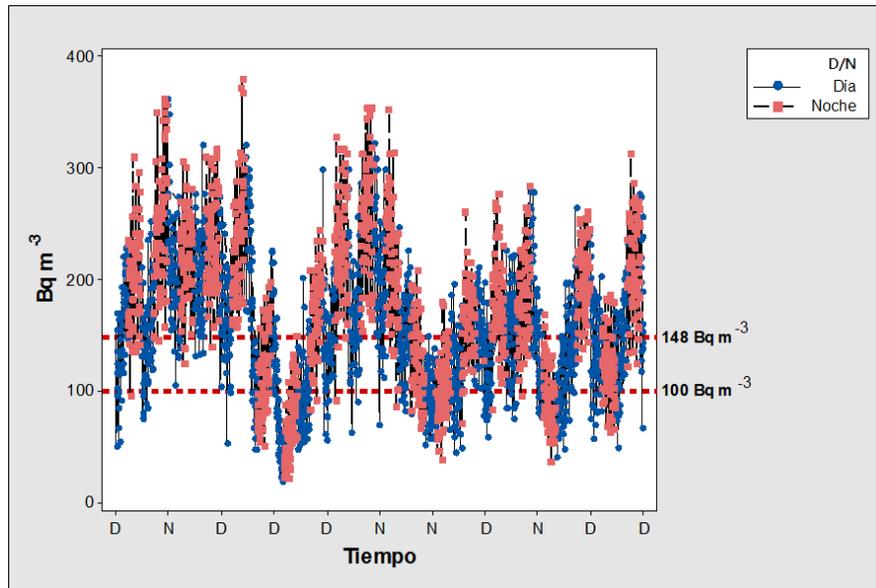


Figura 4. Relación entre la concentración de ^{222}Rn y temperatura ambiental en la PE de una oficina pública en Aldama, Chihuahua, México.
Fuente: Elaboración propia.

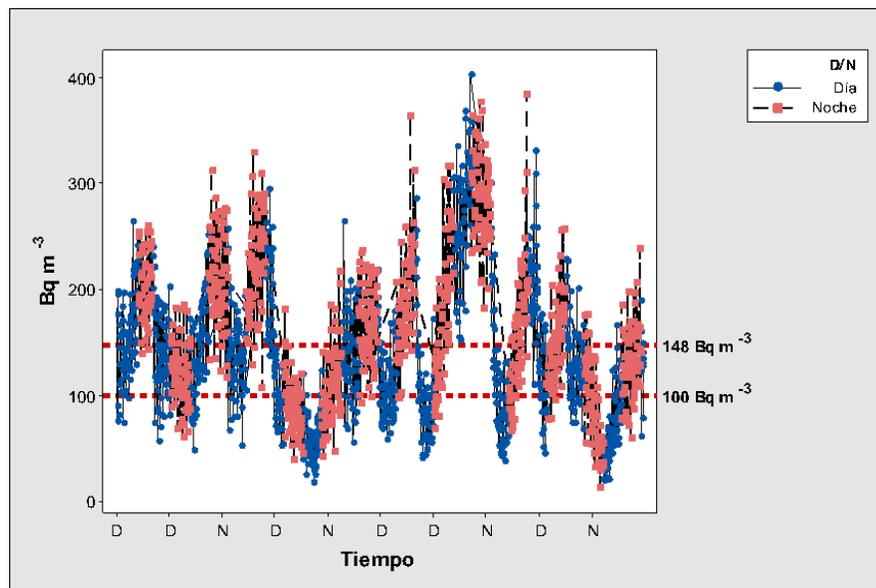


Figura 5. Relación entre la concentración de ^{222}Rn y temperatura ambiental de la SE de una oficina pública en Aldama, Chihuahua, México.
Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La diferencia entre el nivel de ^{222}Rn observado en la noche y durante el día se explica por el hecho de que en la noche la temperatura desciende, acentuándose este efecto en ambientes áridos y semiáridos. Este efecto de temperatura-presencia de ^{222}Rn ha sido documentado en estudios previos (Lerma-Treviño *et al.*, 2018). El nivel que se reporta en este estudio, a una altura de 0.74 m (161.31 Bq m^{-3}), representa un foco rojo para los trabajadores de oficinas públicas, debido a que se encuentran laborando en un ambiente que supera la recomendación de 100 Bq m^{-3} , la cual ha sido establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS), así como también lo recomendado por EUA de no sobrepasar un nivel de 148 Bq m^{-3} .

Está bien documentado que la intensidad de ^{222}Rn disminuye en lugares bien aireados (OMS, 2015), por lo que se recomienda que las casas y centros de trabajo estén bien ventilados (Collignan & Powaga, 2019). El problema se magnifica en lugares cuya construcción ha sido realizada con materiales poco porosos y con contenido de ^{226}Ra . Los investigadores Lerma-Treviño *et al.* (2018) documentaron una concentración de ^{222}Rn de hasta 600 Bq m^{-3} durante la noche, en casas-habitación de ciudad de Aldama, en el norte de México. Esta alta concentración se detectó en casas-habitación que fueron construidas de adobe y fue ampliamente superior a la concentración de ^{222}Rn determinado en casas construidas con block. Los resultados de este estudio son importantes si se analiza que un trabajador público en ciudad de Aldama, Chihuahua, puede encontrarse laborando durante ocho horas por día con una exposición a niveles de ^{222}Rn por arriba de las recomendaciones y luego el mismo trabajador, durante la noche, se encuentre en un ambiente inhalando diferentes niveles de ^{222}Rn ; en consecuencia, esa persona tendrá mayores posibilidades de desarrollar cáncer de pulmón. En la literatura mundial está bien documentado que la exposición del humano a diversos niveles de ^{222}Rn puede incrementar la posibilidad de adquirir cáncer de pulmón (Krewski *et al.*, 2006; Lubin *et al.*, 2005).

Un estudio reciente de Rizo & Echarri (2018) en diferentes áreas de un edificio en Alicante, España, reportó niveles de ^{222}Rn en un rango de 96.98 Bq m^{-3} a 224.67 Bq m^{-3} . Estos autores concluyeron que los niveles de ^{222}Rn en un determinado edificio no sólo dependen del tipo de suelo donde ha sido construido, como se ha considerado en forma tradicional, sino que también depende del tipo de materiales utilizados en la construcción.

Los estudios de Darby *et al.* (2005) concluyeron que la exposición al ^{222}Rn era causante directo del cáncer en humanos. Cuando una persona inhala ^{222}Rn , las partículas alfa empiezan a interactuar con el tejido pulmonar, provocando cierto nivel de daño al ADN (Rodrigues, Arruda & García, 2012; Sethi, El-Ghamry & Kloecker, 2012; Silva *et al.*, 2018). Por este efecto, la OMS (2015) ha especificado claramente que "una sola partícula alfa puede provocar daños genéticos significativos en una célula, con la posibilidad de daños al ADN con cualquier nivel de exposición al radón". Es importante mencionar también que la Comisión Europea para la Energía Atómica (CEEA) ha recomendado (EURATOM, 1990) que una concentración de 100 Bq m^{-3} en una determinada zona debería ser utilizada para seguir el monitoreo de los niveles del gas ^{222}Rn , mientras que una concentración mayor de 300 Bq m^{-3} debería ser un argumento para sugerir de forma obligatoria una ventilación de ese determinado espacio. Es importante especificar que no se encontraron estadísticas de cáncer de pulmón en la ciudad de Aldama, es decir, información respecto a enfermos, pacientes o personas fallecidas, debido a que un gran número de personas acude a la ciudad de Chihuahua a diagnóstico o tratamiento e incluso, en caso de muerte, el municipio de Chihuahua expide el acta de defunción. Por esta razón, es difícil correlacionar el nivel de ^{222}Rn y la presencia de esta enfermedad. Sin embargo, se debe recordar que existen estudios que demuestran que el cáncer de pulmón en humanos se ha incrementado en áreas donde los habitantes tienen un cierto nivel de exposición al gas ^{222}Rn (Darby *et al.*, 2005). En otro estudio, Gray, Read, McGale & Darby (2009) en Gran Bretaña concluyeron que alrededor de 1100 muertes de cáncer de pulmón estaba relacionado con la exposición del humano a ^{222}Rn .

Conclusiones y Recomendaciones

Derivado del presente trabajo se pueden formular las siguientes conclusiones: 1) Los trabajadores administrativos en la ciudad de Aldama, Chihuahua, están expuestos a diversos niveles del gas ^{222}Rn en sus horas de trabajo; 2) Se confirma que el ^{222}Rn se concentra en la parte inferior de espacios cerrados; en este caso en particular, a los 0.74 m de altura, ya que es conocido que este gas noble es más pesado que el aire y; 3) La variable de temperatura está altamente correlacionada con los niveles de ^{222}Rn ; es decir, a menor temperatura más alto nivel de ^{222}Rn , por lo cual, en época invernal los trabajadores podrían estar más expuestos a este gas.

Implicaciones o Impactos

Es importante que las autoridades de los tres niveles de gobierno recomienden a los trabajadores administrativos la ventilación de sus espacios de trabajo para reducir la concentración del ^{222}Rn y así minimizar su inhalación. En consecuencia, se podría disminuir la presencia de cáncer de pulmón. Además, es fundamental que dichas autoridades también sugieran al trabajador ejecutar la misma acción de ventilación en sus casas-habitación para reducir las posibilidades de contraer cáncer de pulmón.

Referencias

- Armienta, M. A., Rodríguez, R., Segovia, N., & Monteil, M. (2010). Medical geology in Mexico, Central America and the caribbean. En: O. Selenius, R. B. Finkelman, & J. A. Centeno (Eds.). *Medical Geology, a Regional Synthesis* (pp. 79-106). Washington DC, USA: Springer. doi: 10.1007/978-90-481-3430-4
- Barquero, J., Fernandez, E., Monnin, M., Seidel, J. L., & Segocia, N. (2005). Water chemistry and radon survey at the Poas Volcano (Costa Rica). *Annals of Geophysics*, 48(1), 33-42. doi: <https://doi.org/10.4401/ag-3195>
- Cartagena, R., Olmos, R., Lopez, D. I., Soriano, T., Barahona, F., Hernandez, P. A., & Perez, N. M. (2004). Diffuse soil degassing of carbon dioxide, radon and mercury at San Miguel Volcano, El Salvador. *Special Papers-Geological Society of America*, 203-212.
- Collignan, B., & Powaga, E. (2019). Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 196, 268-273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.023>
- Colmenero Sujo, L., Montero Cabrera, M. E., Villalba, L., Renteria Villalobos, M., Torres Moye, E., Garcia León, M., Garcia-Tenorio, R., Mireles García, F., Herrera Perez, F., & Sanchez Aroche, D. (2004). Uranium-238 and thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico. *Journal of Environmental Radioactivity*, 77(2), 205-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.03.008>
- Connor, Ch., Hill, B., La Femina, P., Navarro, M., & Conway, M. (1996). Soil ^{222}Rn pulse during the initial phase of the June-August 1995 eruption of Cerro Negro, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73(1-2), 119-127. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(96\)00020-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(96)00020-0)
- Dahlkamp, F.J. (2010). *Uranium deposits of the world. USA and Latin America*. Heidelberg, Alemania: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-78943-7
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Schaffrath Rosario, A., Tirmarche, M., TomáBek, L., Whitley, E., Wichmann, H. E., & Doll, R. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330, 1-6. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>

- Espinosa, G., & Golzarri, J. I. (2016). Indoor radón (^{222}Rn) concentration level study in child care centers and kindergartens, using nuclear track methodology (NTM). *Journal of Environmental Science and Engineering*, 5, 599-605. doi:10.17265/2162-5298/2016.12.001
- Espinosa, G., Golzarri, J. I., Román-Sedano, A. M., & Castillo, F. (2019). Mapping of radon (^{220}Rn and ^{222}Rn) concentration distribution in a microclimate cellar using nuclear track methodology. *Journal of Environmental Protection*, 10(7), 919-928. doi: <https://doi.org/10.4236/jep.2019.107054>
- Espinosa, G., Golzarria, J. I., Angeles, A., & Griffith, R. V. (2009). Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in Mexico using nuclear track methodology. *Radiation Measurements*, 44(9), 1051-1054. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.035>
- EURATOM. (1990). *EUR-Lex. 90/143/EURATOM: Recomendación de la Comisión EURATOM, de 21 de Febrero de 1990, Relativa a la Protección de la Población Contra Los Peligros de una Exposición al Radón en el Interior de Edificios*. European Union (EU): Brussels, Belgium, 1990.
- Gray, A., Read, S., McGale, P., & Darby, S. (2009). Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. *Bmj*, 338, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.a3110>
- Krewski, D., Lubin, J. H., Zielinski, J. M., Alavanja, M., Catalan, V. S., William Field, R., Klotz, J. B., Létourneau, E.G., Lynch, C. F., Lyon, J. L., Sandler, D. P., Schoenberg, J. B., Steck, D. J., Stolwijk, J. A., Weinberg, C., & Wilcox, H. B. (2006). A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 69(7-8):533-597. doi: <https://doi.org/10.1080/15287390500260945>
- Lerma-Treviño, C., Rubio-Arias, H., Colmenero-Sujo, L. H., Villalba, M.L., & Ochoa-Rivero, J. M. (2018). Indoor radon gas (^{222}Rn) levels in homes of Aldama, Chihuahua Mexico and the risk of lung cancer. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7),1337. doi: <https://dx.doi.org/10.3390%2Fijerph15071337>
- Lubin, J. H., Wang, Z. Y., Wang, L. D., Boice, J. D., Cui, H. X., Zhang, S. R., Conrath, S., Xia, Y., Shang, B., Cao, J. S., & Kleinerman, R. A. (2005). Adjusting lung cancer risks for temporal and spatial variations in radon concentration in dwellings in Gansu Province, China. *Radiation Research*, 163(5), 571-579. doi: <https://doi.org/10.1667/RR3109>
- Manchado, A., Cervantes, P., & Lantigus, L. (abril de 2005). Evidencias sobre la hormesis por ^{222}Rn en el balneario Elguea, Cuba. *Proceedings of the First Convention on Earth Sciences*. La habana.
- National Research Council (NRC). (1999). *Health Effects of Radon: BEIR VI*. Washington, DC, USA: National Academy Press.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2015). *El Radón y sus efectos en la salud*. Nota descriptiva. Recuperado el 21 de marzo de 2019 <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>
- Rizo Maestre, C., & Echarri Iribarren, V. (2018). The radon gas in underground buildings in clay soils. The plaza Balmis Shelter as a paradigm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,15(5), 1004. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15051004>
- Rodrigues, A. S., Arruda, M. S. C., & García, P. V. (2012). Evidence of DNA damage in humans inhabiting a volcanically active environment; a useful tool for biomonitoring. *Environmental International*, 49, 41-56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.08.008>
- Rubio, A. H. O., & Jiménez, C. J. (2012). *Estadística aplicada con análisis en Minitab*. México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Sethi, T. K., El-Ghamry, M. N., & Kloecker, G. H. (2012). Radon and lung cancer. *Clinical Advances in Hematology & Oncology*, 10(3),157-164.
- Silva Linhares, D. P., Ventura Garcia, P., Silva, C., Barroso, J., Kazachkova, N., Pereira, R., Lima, M., Camarinho, R., Ferreira, T., & Dos Santos Rodrigues, A. (2018). DNA damage in oral epithelial cells of individuals chronically exposed to indoor radon (^{222}Rn) in a hydrothermal area. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(5), 1713-1724. doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9893-2>
- Tommasino, I., & Espinosa, G. (2018). Radon in workplaces the urgent need of new measurements and devices. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, 6(1), 1-7. doi:10.15415/jnp.2018.61001

United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2008). *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Fifty-sixth Session*. New York, NY, USA: United Nations Publications.

United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2000). *Exposures from Natural Radiation Sources (Annex B); Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly*. New York, NY, USA: UNSCEAR.

Villalba, L., Colmenero-Sujo, L., Pinales-Munguía, A., Estrada-Gutiérrez, G., Rubio-Arias, H., Mireles-García, F., & Dávila-Rangel, I. (2013). Analysis of health risk due to the presence of radioactive and chemical elements in groundwater, Aldama municipality, Chihuahua, México. *Journal of Environmental Protection*, 4(11),1265-1271. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2013.411147>

Villalba, M. L., Colmenero-Sujo, L. H., Rubio Arias, H., Pinales Munguía, A., Espino Valdés, M. S., De la Garza Aguilar, R., Silva Hidalgo, H., & Viramontes Olivas, O. (2015). Cuantificación de radón (^{222}Rn) en aire y dosis de radiación en baños termales del norte de México. *Nova scientia*, 7(15),153-167.