

Concentración de ^{222}Rn en Agua Potable de la Ciudad de Zacatecas, Medida por Centelleo Líquido y Dosis Asociada.

Arévalo B. César A. y López del R. Hugo, Dávila R. J. Ignacio, Mireles G. Fernando, Pinedo V. José L., Ríos M. Carlos, Saucedo A. Sonia A.

*Unidad Académica de Estudios Nucleares, Universidad Autónoma de Zacatecas
Ciprés 10, Fracc. La Peñuela, Zacatecas, Zac. 98068, MEXICO.*

cesar_arevalob@outlook.com ; hlopezdelrio@hotmail.com ; idavilara@gmail.com ;
fmireles@uaz.edu.mx ; jlpv85@hotmail.com ; criosmtz@hotmail.com ; chena@hotmail.de

Resumen

Se realizó un estudio para determinar la concentración de ^{222}Rn en muestras de agua potable recolectadas de diferentes domicilios de la ciudad de Zacatecas, México, cuya principal fuente de abastecimiento son las aguas subterráneas. El gas radiactivo ^{222}Rn es producto de la serie de decaimiento del ^{238}U y es considerado como una de las principales fuentes de radiación natural, ya que aporta casi la mitad de la dosis de radiación que una persona recibirá a lo largo de su vida. El ^{222}Rn se origina en las rocas de los acuíferos y se disuelve en el agua, que posteriormente es integrada a la red de distribución del suministro público que abastece a toda la población. La exposición a la radiación ionizante que el ^{222}Rn y su descendencia emiten, puede dañar la molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico) induciendo la posible aparición de cáncer. Se ha demostrado mediante diversos estudios epidemiológicos realizados en trabajadores de minas de uranio de diferentes partes del mundo, que dicha exposición aumenta la incidencia de cáncer de pulmón, colocando al ^{222}Rn y su descendencia como la segunda causa principal de este tipo de cáncer, después del hábito de fumar. Usando la técnica de extracción por solventes de ^{222}Rn en agua y la espectrometría de centelleo líquido, se muestreo y analizó el agua recolectada de 14 diferentes domicilios. El promedio de la actividad medida de ^{222}Rn fue 2.09 Bq/L y la dosis efectiva anual por ingesta de agua atribuible a esa concentración en de 6.07 mSv/a. La concentración de ^{222}Rn en agua y la dosis efectiva anual están por debajo de los 11 Bq/L y 50 mSv/a, tales concentraciones son los límites máximos establecidos por la USEPA (United States Environmental Protection Agency) y la ICRP (International Commission on Radiological Protection), respectivamente. Se calculó también la concentración de ^{222}Rn que se transfiere del agua al aire del interior de una vivienda y la dosis de radiación que esta concentración causa por inhalación, siendo 0.209 Bq/m³ y 1.463 $\mu\text{Sv/a}$, respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la serie de decaimiento del ^{238}U , se encuentra el único elemento radiactivo en estado gaseoso, el ^{222}Rn , caracterizado también por ser químicamente inerte. El ^{222}Rn ocurre de manera natural en las rocas que contienen ^{238}U y mediante un proceso de emanación y/o exhalación escapa por las grietas y porosidades de la roca hacia el medio ambiente [1]. Toda la población está expuesta

a fuentes naturales de radiación, de todos los radioisótopos que contribuyen a la dosis de radiación que se adquiere de manera natural, el ^{222}Rn aporta cerca del 50 %, además es considerado el de mayor riesgo para la salud [2][3]. Se considera que la exposición interna al ^{222}Rn por tiempos prolongados es causa de diversos tipos de cáncer, las principales vías de exposición interna son dos: la primera es por inhalación del gas, la cual es la segunda causa más importante de cáncer pulmonar en los Estados Unidos [4], la segunda es por vía oral cuando el ^{222}Rn se encuentra disuelto en el agua de consumo humano, pudiendo dar origen a un cáncer de estómago. El radón disuelto y liberado del agua representa el 89% del riesgo de cáncer mientras que la ingestión el 11% restante [1].

El ^{222}Rn es hijo directo del ^{226}Ra , los tiempos de vida media del ^{238}U y ^{226}Ra tan largos representan una fuente inagotable de ^{222}Rn . Cuando el radón se forma en las rocas de los acuíferos percola a través de las porosidades y grietas hasta alcanzar el agua y disolverse en ella, ya que de todos los gases nobles el radón es el de mayor solubilidad. La concentración de radón presente en el agua subterránea depende del tipo de rocas que conforman el acuífero así como de sus propiedades geoquímicas [5]. De esta manera existe un rango de concentraciones de radón en aguas subterráneas bastante amplio, las concentraciones reportadas en diferentes partes del mundo son tan pequeñas como 0.7 Bq/L y en algunas partes alcanzan los 3700 Bq/L [6].

El clima de la ciudad de Zacatecas es semidesértico y prácticamente toda el agua potable se extrae de pozos, el riesgo asociado a la presencia de radón en estas aguas suele ser bajo comparado con el correspondiente al del radón inhalado, pero es un riesgo diferenciado de éste, puesto que la exposición se produce, como ya se dijo, del consumo del gas disuelto y de la inhalación del radón liberado. Independientemente, cualquier forma de exposición, por mínima que sea, puede aumentar la incidencia de cáncer, además las consecuencias de la exposición a dosis bajas de radiación aún son materia de estudio.

El riesgo a la salud de exposición al radón ya sea inhalado o ingerido, se deriva principalmente de la interacción entre las partículas alfa emitidas por el radón y sus hijos de vida media corta, en especial los emisores alfa ^{218}Po y ^{214}Po , con el núcleo de las células del cuerpo humano, dañando directamente la molécula de ADN o de forma indirecta cuando las partículas alfa ionizan moléculas del agua intracelular dando lugar a radicales libres. El daño a la molécula del ADN puede ser el primer paso en una serie de eventos que culminan en la aparición de un cáncer [7]. A causa de los problemas de salud derivados de la exposición al radón, diversos organismos reguladores han establecido concentraciones límite para la exposición a este radionúclido. Uno de estos organismos es la USEPA que indica los límites máximos de concentración de radón en agua potable y aire interior, 11 Bq/L y 148 Bq/m³, respectivamente [1].

2. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS

Para este trabajo se recolectaron 28 muestras de agua, dos por cada punto de muestreo, de 14 diferentes colonias de la ciudad de Zacatecas, del estado de Zacatecas, México, y se utilizó la técnica de extracción de radón en agua y el centelleo líquido para determinar la concentración de radón presente en las muestras en Bq/L.

2.1. Área de estudio

El estado de Zacatecas cuenta con una superficie de 75,282 Km² se ubica al centro-norte del país, con un clima seco y semiseco y una temperatura media anual de 17°C. La ciudad de Zacatecas capital está ubicada en las coordenadas 22°34'18'' N y 102°34'31'' O, con una altura de 2426 metros sobre el nivel del mar [8]. El muestreo se realizó en la ciudad de Zacatecas recolectando muestras de agua potable de la red de suministro público, en específico del grifo principal de viviendas de diferentes colonias, es decir del primer grifo que esté conectado directamente a la red para asegurar que el agua a muestrear no provenga de un tinaco o cisterna evitando así problemas de pérdida de radón por el tiempo de almacenamiento, siendo la ubicación exacta de los puntos de muestreo la que se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Ubicación de los puntos de muestreo

| Muestra | Colonia | Ubicación | |
|---------|----------------------|----------------|-----------------|
| | | Latitud | Longitud |
| 1 | Estrella de Oro | 22°45'20.51" N | 102°36'6.01" O |
| 2 | Huerta Vieja | 22°45'14.22" N | 102°36'29.85" O |
| 3 | Europa | 22°44'50.66" N | 102°36'52.74" O |
| 4 | Las Huertas | 22°44'49.94" N | 102°36'51.10" O |
| 5 | Picones | 22°45'16.81" N | 102°37'58.85" O |
| 6 | El Orito | 22°44'57.41" N | 102°36'22.29" O |
| 7 | Gonzales Ortega | 22°45'25.23" N | 102°35'34.31" O |
| 8 | Lomas del Lago | 22°45'21.88" N | 102°35'20.89" O |
| 9 | Felipe Ángeles | 22°45'39.47" N | 102°35'49.31" O |
| 10 | Benito Juárez | 22°45'29.05" N | 102°35'17.93" O |
| 11 | Minera | 22°46'2.67" N | 102°35'6.65" O |
| 12 | Lomas de la Pimienta | 22°46'2.78" N | 102°35'13.32" O |
| 13 | La Herradura | 22°45'29.97" N | 102°35'11.18" O |
| 14 | Las Haciendas | 22°45'56.97" N | 102°35'1.59" O |

2.2. Muestreo, Preparación y Análisis de la Muestra

Se recolectaron 2 muestras de aproximadamente 1 litro en cada punto de muestreo en botellas de plástico del mismo volumen hasta que el agua se derramara por los bordes, inmediatamente se cerró y se etiquetó debidamente. Las muestras se llevaron inmediatamente al laboratorio donde se midieron alícuotas de 500 ml que se transfirieron a un matraz de extracción y se le agregaron 8 ml de aceite mineral de alta eficiencia PerkinElmer, para la extracción de radón, se cerró el matraz y se agitó vigorosamente durante 4 minutos y se dejó reposar por 3 horas, tiempo suficiente para garantizar la separación completa de las fases y que el ²²²Rn alcance el equilibrio con su descendencia [9]. La eficiencia de extracción por este método ha sido determinada experimentalmente por Lowry en 1991 [10] y para este caso la eficiencia de extracción es $\epsilon_{ext} = 26.9\%$.

Pasado el tiempo de reposo se desecha la fase acuosa y se deposita la fase orgánica, que es donde se encuentra el radón, en un vial de polietileno de alta densidad e inmediatamente se le agregaron

12 ml de líquido de centelleo OptiPhase HiSafe® 3 de Wallac, agitándolos para que se mezclaran. Se preparó un vial con 8 ml de aceite mineral y 12 ml de líquido de centelleo para el estudio del fondo (B).

Para cuantificar la concentración de ^{222}Rn presente en la muestra se recurrió a la detección de pulsos luminosos que se originan cuando la radiación alfa emitida interacciona con el líquido de centelleo, usando para ello el contador de centelleo líquido Wallac-Oy®, el cual es capaz de separar los pulsos originados por radiación alfa de los originados por la radiación beta, donde se llevó a cabo el conteo por un tiempo de 6 horas por muestra. Dada la baja resolución que ofrece el contador de centelleo líquido no es posible separar los pulsos originados por la emisión alfa del ^{222}Rn y ^{218}Po , ya que sus energías de decaimiento alfa presentan valores muy cercanos entre sí, por lo que para la cuantificación del ^{222}Rn se utilizó la actividad medida del ^{214}Po , ya que bajo condición de equilibrio secular, como es el caso, ambas actividades son equivalentes. La eficiencia de conteo para el ^{214}Po , medida por Favila en 2010 [11], es de $\varepsilon = 80.22 \pm 0.56\%$.

La determinación de la concentración en actividad de ^{222}Rn se realizó tomando en cuenta los valores de la eficiencia de extracción, así como la de conteo, además se utilizó un factor de corrección f para la pérdida de ^{222}Rn por decaimiento que ocurre en el tiempo desde que se toma la muestra hasta el momento del conteo. De esta manera la concentración de ^{222}Rn en agua C_w al momento de la toma de muestra es:

$$C_w \left(\frac{\text{Bq}}{\text{L}} \right) = \frac{A_{Rn-B}}{\varepsilon f \varepsilon_{\text{ext}} V} \quad (1)$$

Donde A_{Rn} es la actividad medida en el equipo en cps y V es el volumen de la muestra en litros. Utilizando esta concentración y suponiendo que el agua usada dentro de la casa proviene directamente de la red y no del tinaco o cisterna, se puede calcular el radón que se transfiere al aire interior de una vivienda. La concentración promedio de radón en interiores C_a que resulta solamente del uso del agua y se puede estimar como sigue [12]:

$$C_a = \frac{C_w W e}{V \lambda} \quad (2)$$

Donde:

C_w = concentración de radón presente en el agua de uso en la vivienda.

W = uso de agua por habitante ($\text{m}^3 \text{ habitante}^{-1} \text{ h}^{-1}$)

e = promedio ponderado de la eficiencia de la transferencia de radón en el agua al aire.

V = volumen de la vivienda (m^3)

λ = tasa de ventilación de la vivienda (h^{-1})

Debido a la incertidumbre que existe en todas estas cantidades, principalmente en el volumen de la vivienda, el uso de agua, la tasa de ventilación y la transferencia del radón del agua al aire, la Agencia de Protección al Medioambiente de los Estados Unidos (USEPA) integra estas variables en un solo factor llamado factor de transferencia f :

$$f = \frac{W e}{V \lambda} \quad (3)$$

La USEPA en base a modelos experimentales ha asignado 1.0×10^{-4} [1], como el mejor valor estimado para el factor de transferencia, de esta manera la concentración de radón en aire interior, como consecuencia del uso del agua es:

$$C_a = C_w \cdot 1 \times 10^{-4} \quad (4)$$

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran los espectros obtenidos después de la medición, el primero (línea punteada azul) hace referencia al fondo y el segundo (línea negra), al punto donde se encontró la concentración más alta de ^{222}Rn . En la Tabla II se muestran las concentraciones de ^{222}Rn en cada punto de muestreo y que corresponde al promedio de las dos muestras tomadas, las concentraciones están en un intervalo de 0.315 a 4.415 Bq/L, donde la concentración más baja corresponde a la colonia Felipe Ángeles y la más alta a la colonia Huerta Vieja. La concentración promedio es 2.09 ± 0.16 Bq/L y está por debajo del límite de 11 Bq/L. De acuerdo con las concentraciones de ^{222}Rn en cada muestra la concentración promedio que se transfiere del agua al aire del interior de una vivienda es del orden de los 0.209 Bq/m³ muy por debajo del límite de 148 Bq/m³, se podría suponer que esta concentración tan pequeña en el aire interior se puede despreciar.

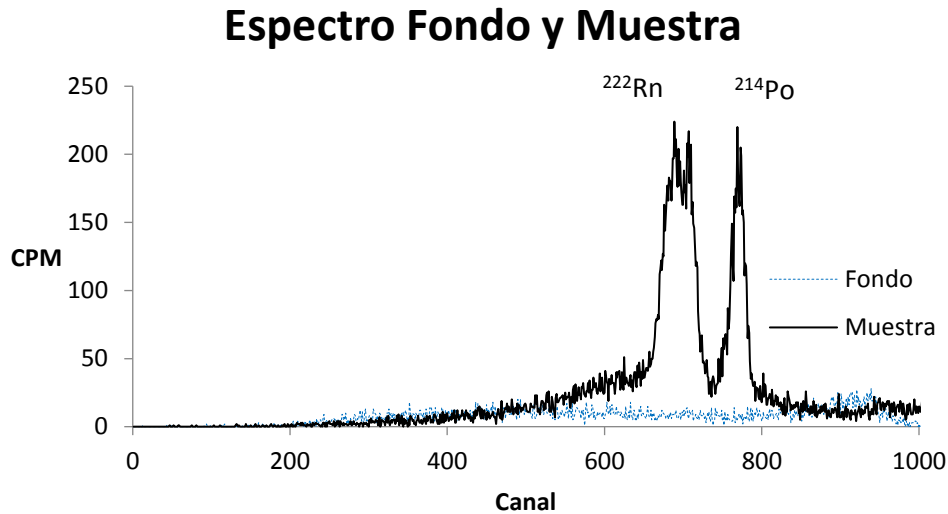


Figura 1. Espectros alfa obtenidos del vial de fondo y de la muestra 2.

Tabla II. Concentración en actividad de ^{222}Rn en cada una de las muestras.

| Muestra | Colonia | Actividad del Rn (cpm) | Concentración de ^{222}Rn (Bq/L) |
|---------|----------------------|------------------------|---|
| 1 | Estrella de Oro | 22.7 ± 1.0 | 3.30 ± 0.16 |
| 2 | Huerta Vieja | 27.7 ± 1.1 | 4.41 ± 0.19 |
| 3 | Europa | 24.4 ± 1.1 | 3.78 ± 0.17 |
| 4 | Las Huertas | 26.4 ± 1.1 | 4.34 ± 0.19 |
| 5 | Picones | 31.0 ± 1.2 | 4.19 ± 0.16 |
| 6 | El Orito | 18.7 ± 0.9 | 2.41 ± 0.14 |
| 7 | Glez. Ortega | 18.5 ± 1.3 | 2.23 ± 0.18 |
| 8 | Lomas del Lago | 9.1 ± 1.2 | 0.76 ± 0.18 |
| 9 | Felipe Ángeles | 6.9 ± 0.8 | 0.32 ± 0.12 |
| 10 | Benito Juárez | 9.0 ± 0.9 | 0.73 ± 0.14 |
| 11 | Minera | 8.2 ± 0.8 | 0.54 ± 0.12 |
| 12 | Lomas de la Pimienta | 7.7 ± 0.9 | 0.49 ± 0.13 |
| 13 | La Herradura | 12.9 ± 1.3 | 1.30 ± 0.18 |
| 14 | Las Haciendas | 7.4 ± 0.8 | 0.45 ± 0.13 |

Así mismo, se estimó las dosis que recibe el estómago por ingestión, donde el órgano crítico es el estómago, la dosis se calculó bajo el supuesto de un consumo diario de 0.6 litros de agua por día y suponiendo que todo el radón ingerido decae en el estómago. La energía considerada proviene solamente de los emisores alfa (^{222}Rn , ^{218}Po y ^{214}Po) que en conjunto da un total de 19.2 MeV, la dosis absorbida D se calculó como sigue:

$$\dot{D}(\text{Gy/d}) = \frac{q \left(\frac{\text{des}}{\text{s}}\right) \times E (\text{MeV}) \times 1.6 \times 10^{-13} \left(\frac{\text{J}}{\text{MeV}}\right) \times 8.64 \times 10^4 \left(\frac{\text{s}}{\text{d}}\right)}{m (\text{kg}) \times \frac{1 \text{ J/kg}}{\text{Gy}}} \quad (5)$$

Donde, q es la actividad del ^{222}Rn , E la energía de cada radiación emitida y m la masa del órgano blanco (para el caso del estómago se consideró 0.4 kg). Para el cálculo de la dosis efectiva anual H se consideró un factor de calidad de 20, cuyo límite máximo permisible según la ICRP es de 50 mSv/a [13], las dosis en el estómago se observan en la Tabla III.

Tabla III. Concentración promedio de ^{222}Rn en agua y promedio de dosis absorbida y efectiva anuales recibidas por el estómago.

| C_w (Bq/L) | D (mGy/a) | H (mSv/a) |
|--------------|---------------|-------------|
| 2.09 ± 0.16 | 0.304 ± 0.023 | 6.07 ± 0.46 |

Los efectos biológicos de las radiaciones sobre los seres vivos se han estudiado por más de 70 años, por lo que en la actualidad son bien conocidos, en particular para dosis moderadas y altas, sin embargo para dosis bajas (inferiores a 100 mSv) los expertos aun no conocen del todo dichos efectos, por lo que las investigaciones actuales se centran en esta área [14]. Una sola partícula alfa puede causar daños genéticos significativos en una célula, la posibilidad de daños al ADN asociado al radón se da con cualquier nivel de exposición según la OMS [15]. Este daño en la estructura del ADN puede ser el primer paso en una serie que puede culminar en la aparición de un cáncer.

4. CONCLUSIONES

La espectrometría por centelleo líquido usada para la cuantificación de la concentración en actividad de radón en agua, es un método sencillo que ofrece una alta eficiencia de conteo (80.22%), además de una sencilla preparación de muestras.

El rango de concentraciones de radón, encontrado en los diferentes puntos de muestreo va de 0.32 a 4.41 Bq/L, con una concentración promedio de 2.09 ± 0.16 Bq/L, la cual no rebasa el límite máximo establecido por la USEPA de 11 Bq/L. Cuando se usa agua que proviene directamente de la red de suministro una parte del radón que viene disuelto en ella, se transfiere al aire interior de la vivienda. La concentración promedio de radón en aire interior, ocasionada por esta transferencia, es de 0.209 Bq/m³, tal concentración está muy por debajo del límite establecido por la USEPA de 148 Bq/m³, por lo tanto puede ser despreciada.

El promedio de dosis equivalente anual para el estómago es 6.07 ± 0.46 mSv/a, la cual está por debajo del límite establecido por la ICPR de 50 mSv/a.

4. REFERENCIAS

1. Nazaroff, William W. "Radon Transport from Soil to Air", *Reviews of Geophysics*, **30(2)**, p. 137-160 (1992).
2. National Research Council, *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*, National Academy Press, Washington, D.C., USA, (1999).
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Effects of Ionizing Radiation*, United Nations publication, (2006).
4. National Research Council, *Health Effects of Exposure to Radon (BEIR VI)*. National Academy Press, Washington, D.C., USA, (1999).
5. Aleissa, Khalid Abdulaziz, Abdulrahman Sayeed Alghamdi, Fahad Ibrahim Almasound, y Md. Shafiqul Islam, "Measurement of Radon Levels in Groundwater Supplies of Riyadh with Liquid Scintillation Counter and the Associated Dose" *Radiation Protection Dosimetry*, **154(1)**, p. 95-103, (2013).
6. Crawford-Brown, D. J., "The Biokinetics and Dosimetry of ²²²Rn in the Human Body Following Ingestion of Groundwater", *Environmental Geochemistry and Health*, **11(1)**, p. 10-17 (1989).
7. Organización Mundial de la Salud (OMS), *Manual de la OMS Sobre el Radón en Interiores: Una Perspectiva de Salud Pública*, Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza, (2015).
8. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) *Anuario Estadístico y Geográfico de Zacatecas*, México, (2015).
9. Leaney, Fred W., y Andrew Harzeg, "A rapid field extraction method for determination of radon in natural waters by liquid scintillation counting", *Limnology and Oceanography: Methods* **4**, p. 254-259, (2006)
10. Lowry, Jerry D, "Measuring Low Radon Levels in Drinking Water Supplies", *Journal Water Works Association* **83(4)**, p. 149-153, (1991).
11. Favila Reyna, Esteban. *Estudio de la concentración de radon en aguas termales en el Estado de Zacatecas, México*, Tesis de maestría, Zacatecas, México (2010).

12. Nazaroff, W. W., S. M. Doyle, A. V. Nero, y R. G. Sextro, "Potable Water as a Source of Airborne ^{222}Rn in U.S. Dwellings: A Review and Assessment", *Health Physics* **52(3)**, p. 281-295, (1987).
13. ICRP 103. *Las recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. Publicación 103 ICRP*, Sociedad Española de Protección Radiológica, (2007).
14. Comisión Chilena de Energía Nuclear Departamento de Protección Radiológica y Ambiental. "Efecto de las radiaciones ionizantes en el ser humano" Chile, 2010.
15. OMS. *Manual de la OMS sobre el radón en interiores . Una perspectiva de salud pública*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2015.