

Uranio en agua subterránea del acuífero Guadalupe-Bañuelos del estado de Zacatecas, México

César Alberto Arévalo Beltrán, J. Ignacio Dávila Rangel, Fernando Mireles García

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

cesar_arevalob@outlook.com

Resumen: Se realizó un estudio de la concentración de uranio en muestras de agua subterránea, provenientes de pozos ubicados en el acuífero Guadalupe-Bañuelos del estado de Zacatecas. El análisis de uranio se efectuó por espectrometría alfa, que requiere un trabajo previo de separaciones radioquímicas para aislar y concentrar el uranio para su cuantificación. Las concentraciones medidas se ubican en un intervalo de 3.2 a 7.3 ppb, con un promedio de 5.8 ± 0.27 ppb, este valor es inferior a las 15 ppb, que es el valor máximo de la concentración de uranio en aguas subterráneas para uso doméstico recomendado por la Organización Mundial de la Salud.

Palabras clave Uranio, agua subterránea, espectrometría alfa.

Abstract: Groundwater samples from wells located in the Guadalupe-Bañuelos aquifer in the state of Zacatecas were analyzed in order to quantify the uranium content. The uranium quantification was performed using the alpha spectrometry technique, which requires using radiochemical separations to isolate the uranium and concentrate it for its quantification. The measured concentrations are in the range of 3.2 to 7.3 ppb with an average of 5.8 ± 0.27 ppb. These concentrations is below of the maximum permitted value of 15 ppb recommended by the World Health Organization of 15.

Keywords: Uranium, groundwater, alpha spectrometry.

1. Introducción

El uranio es un elemento químico de símbolo U al que le corresponde el número atómico 92, tiene la mayor masa atómica de entre todos los elementos químicos naturales. [1]. Es de naturaleza metálica y posee propiedades radiactivas, se encuentra ampliamente distribuido por toda la corteza terrestre en concentraciones que van desde 0.1 hasta 500 partes por millón (ppm) [2].

El uranio existe en el agua por fenómenos que tienen que ver con la propia radiactividad del elemento y eventos de absorción y desorción que dan lugar a la meteorización de los suelos y rocas en los que originalmente se encontraba [3].

El agua subterránea es, en muchas partes del mundo, la principal fuente de agua potable para la población, de ahí que su estudio es importante para conocer qué elementos o compuestos están disueltos en ella. Al ser el agua subterránea un recurso vital para el ser humano, se ha reconocido su estudio como una de las mayores fuentes de información para entender y comprender algunos aspectos importantes relacionados con el ciclo hidrológico [4].

Es permanente el interés en varias regiones del mundo de monitorear las concentraciones de uranio en las fuentes de agua para uso y consumo del ser humano, con el fin de conocer el impacto de su toxicidad química y radiológica y sus repercusiones en la salud humana y el medio ambiente.[5].

Para monitorear las concentraciones de uranio en agua subterránea, ya sea en actividad o masa, es necesario utilizar técnicas especiales que nos permitan lograr una adecuada cuantificación del uranio. Una de estas técnicas es la espectrometría alfa, la cual después de haber realizado una buena separación radioquímica del uranio, no solo nos permite conocer la concentración del elemento, sino que también se puede realizar un análisis isotópico.

2. Marco teórico

2.1 Generalidades del uranio

El uranio es un elemento radiactivo o radionúclido. Descubierta en 1789 por M. H. Klaproth, es un emisor de partículas alfa, compuesto por tres isótopos, que también son radiactivos: ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U , con tiempos de vida media de 2.445×10^5 , 7.038×10^8 y 4.468×10^9 años respectivamente. De cada gramo de uranio natural el 99.282% de su masa es ^{238}U , 0.711% ^{235}U y 0.005% ^{234}U . Tanto el ^{238}U como el ^{235}U encabezan las series radiactivas del uranio y el actinio respectivamente, Figuras 1 y 2.

Las energías de las partículas alfa emitidas por los tres radioisótopos del uranio son muy cercanas entre sí, Tabla 1, por lo que si se requiere realizar un análisis isotópico, la técnica a la que se debe recurrir para su correcta medición, debe ser aquella que garantice una buena resolución, evitando así un nulo solapamiento

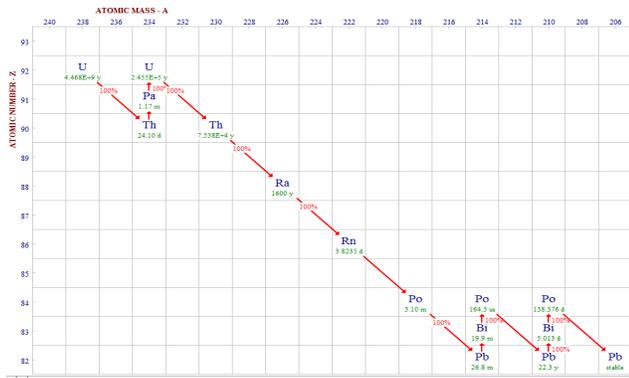


Fig. 1. Cadena de decaimiento del ^{238}U .

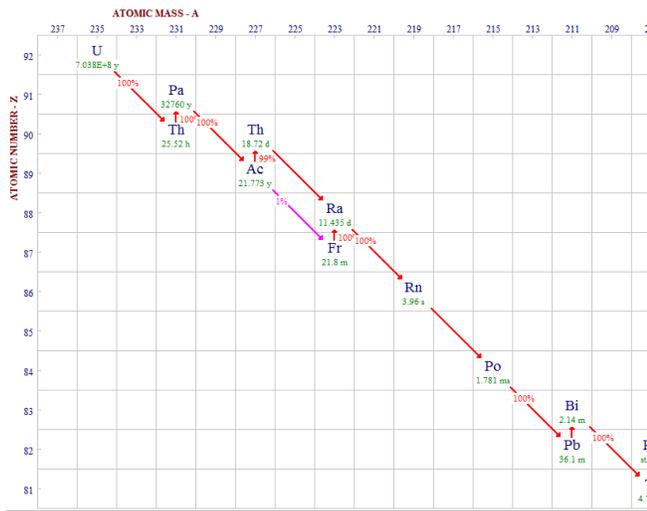


Fig. 2. Cadena de decaimiento del ^{235}U

Tabla 1. Energías alfa emitidas por los radioisótopos del uranio.

Radioisótopo	Energía más probable (MeV)
^{234}U	4.77
^{235}U	4.39
^{238}U	4.19

entre los picos característicos de los radioisótopos involucrados [6].

2.2 Movilización del uranio en el agua subterránea.

El uranio ocurre en las rocas ígneas en un estado de oxidación $4+$, lo que lo hace insoluble y prácticamente inmóvil, sin embargo debido a diversos fenómenos en los que el agua está involucrada, el uranio puede oxidarse cerca de la superficie de las rocas pasando a un estado de oxidación $6+$ el cual es muy estable. De esta manera el uranio puede formar complejos en la forma del ion uranilo UO_2^{2+} , los cuales son muy solubles y pueden integrarse en solución y transportarse siguiendo los flujos del agua [7].

El agua subterránea está contenida en el subsuelo en formaciones rocosas llamadas acuíferos, estos acuíferos están

compuestos de rocas porosas y permeables que permiten el almacenamiento de grandes masas de agua, estas rocas también contienen cantidades variables de uranio y al estar completamente saturadas de agua, facilitan en mayor medida la oxidación del uranio y en consecuencia su integración en ella y su consecuente movilización.

2.3 Espectrometría alfa

Las partículas α tienen bajo poder de penetración en la materia, están conformadas por 2 protones y 2 neutrones (núcleos de ^4He), son emitidas en la desintegración de radioisótopos pesados como los del uranio, cuyo proceso puede expresarse de forma general como $^A_Z\text{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He}$ [8].

Las partículas α son pesadas y de carga positiva por lo que su interacción con la materia es meramente coulombiana, esta interacción tiene lugar a través de colisiones elásticas o inelásticas con los núcleos atómicos, con los electrones orbitales o con cargas libres, de tal forma que van perdiendo energía en cada proceso de interacción, hasta su frenado total [9].

La energía cinética de las partículas α emitidas por un radionúclido tiene valores determinados y característicos del radionúclido que las emite, de tal forma que el espectro de emisión es un espectro discreto (monoenergético) o de líneas, en la práctica debido a la resolución del detector los espectros tienen forma de una gaussiana.

La espectrometría alfa es un procedimiento de análisis ampliamente utilizado en la cuantificación de concentraciones muy bajas de radioisótopos emisores alfa de muestras ambientales, también se aplica en estudios geológicos y de datación, entre otros.

Un sistema de espectrometría alfa, como el aquí utilizado se conforma de un detector semiconductor de ion implantado y un sistema de tratamiento y almacenamiento de datos, que permite la cuantificación e identificación de los radioisótopos presentes en la muestra [8]. El éxito de la espectrometría alfa como método de análisis depende: por un lado del proceso radioquímico de separación y concentración del uranio, ya que debemos tener este elemento totalmente aislado de los demás elementos que pueda contener el agua subterránea para evitar interferencias a la hora de su medición.

Por otro lado, la espectrometría alfa requiere, que el uranio una vez aislado, se electrodeposite en una plancheta de acero inoxidable, el electrodepósito debe ser lo suficientemente uniforme y delgado para evitar el fenómeno de autoabsorción, muy común en la radiación alfa, para obtener un espectro con picos lo suficientemente altos y bien resueltos para su correcta identificación.

3. Materiales y métodos

3.1 Toma de muestras de agua subterránea

Se seleccionaron 5 pozos de forma aleatoria, clasificados como públicos y privados, para uso agrícola y consumo de la población, del acuífero Guadalupe-Bañuelos, localizado al sureste de la capital Zacatecana y el cual comprende la mayor parte de la porción sur del municipio de Guadalupe y pequeñas porciones de

los municipios de Genaro Codina y Ojocaliente, con una extensión de aproximadamente 371 km², Figura 3 [10].

La localización exacta de los pozos se muestra en la Tabla 2. De cada pozo se tomó una muestra representativa del agua subterránea, dejando correr el agua uno o dos minutos para desechar el agua estancada en las tuberías, para luego coleccionar una muestra de 3L en botellas de polietileno. Se acidificaron las muestras con HNO₃ hasta pH 1, para evitar la adsorción del uranio en las paredes del recipiente

3.2 Procesamiento de las muestras

En el desarrollo experimental realizado se utilizó como referencia la metodología propuesta por la ASTM (American Society for Testing and Materials): *Standard test method for Isotopic uranium in water by radiochemistry* [11], implementando algunas modificaciones.

3.2.1 Coprecipitación del uranio en la muestra: Para la coprecipitación del Uranio en una muestra de agua de 3L, se acidifica a pH 1 agregando aproximadamente 7 mL de ácido nítrico (HNO₃) concentrado (si la muestra se acidificó al momento de su toma, omitir este paso) y se agrega un trazador.

Un trazador ideal no debe contener radionúclidos que ocurran naturalmente en la muestra, su energía debe ser lo suficientemente diferente de las energías de los radioisótopos del uranio, para que en el espectro pueda resolverse sin dificultad. No debe haber fraccionamiento químico entre el trazador y los radionúclidos de uranio y la actividad o concentración del trazador debe conocerse con precisión.

Para el análisis de uranio el trazador ideal es el ²³²U cuya energía alfa es 5.32 MeV, que en este caso se le agrega a la muestra un volumen de 1 ml con una actividad de 0.064 ± 0.0001 bequerels (Bq).

Una vez agregado el trazador la muestra se ebulle por 5 min y se agregan 500 mg de bisulfito de sodio (NaHSO₃) y 2 mL de una solución de cloruro de hierro (FeCl₃), la cual contiene 20 mg de Fe/mL. Después de agregar el FeCl₃ se ebulle nuevamente por 10 min, a continuación se agrega hidróxido de amonio (NH₄OH) concentrado hasta que la solución se enturbie, se agregan 10 mL adicionales de NH₄OH y se agita por 30 min, inmediatamente después de la adición del NH₄OH se formará hidróxido de hierro que precipita arrastrando al uranio y demás actínidos presentes. El precipitado se separó de la fase acuosa por centrifugación, posteriormente se disuelve con 10 ml de HNO₃ 8M, esta solución está lista para el siguiente proceso.

3.2.2 Extracción líquido-líquido en la separación y concentración de uranio: El tri-n-butil fosfato o TBP, (C₄H₉O)₃PO, es muy conocido por su gran capacidad como solvente extractor de nitritos orgánicos y otras sales de soluciones acuosas.

Los nitratos más fácilmente extraíbles son los de los lantánidos y actínidos, en especial los cationes tetravalentes y los iones divalentes de los actínidos (UO⁺², NpO⁺², PuO⁺²) [12].

Tabla 2. Ubicación de los pozos muestreados.

Pozo	Ubicación
1	22°43'01.5''N- 102°27'47.2''E
2	22°39'18.4''N- 102°30'34.7''E
3	22°42'58.7''N- 102°28'16.4''E
4	22°41'14.6''N- 102°29'31.8''E
5	22°43'0.05''N- 102°28'10.0''E

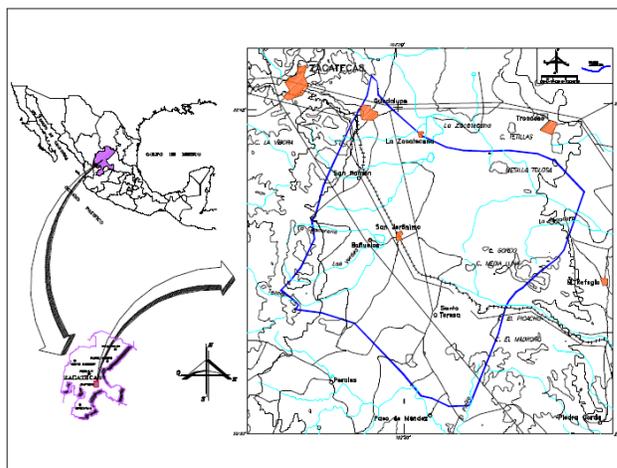
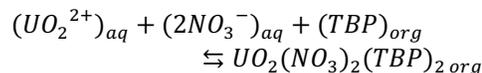


Figura 3. Acuífero Guadalupe-Bañuelos

La extracción del uranio presente en solución ácida por el TBP se describe de la siguiente manera: [8]



La separación líquido-líquido se realiza a partir de la solución previamente obtenida en la etapa de coprecipitación misma que se transfiere a un embudo de separación (fase acuosa) a continuación se añadieron 5 mL de TBP (fase orgánica), se agitó por un par de minutos, el uranio y el torio pasan a la fase orgánica quedando retenidos en ella, mientras que en la fase acuosa quedarán los demás elementos que no son de interés (Fe, Po, Ra y Pb) que se desechan junto con la fase acuosa [13], se realizan dos lavados consecutivos a la fase orgánica con HNO₃. A la solución de TBP en el embudo de separación se le adicionaron 20 mL de Xileno y 15 mL de HCl 1.5 M se agita por un par de minutos y el Th pasa ahora a la fase acuosa quedando solamente el uranio en la fase orgánica, se realizan dos lavados más con HCl 1.5 M a la fase orgánica y al final se obtendrán 45 mL de HCl que contiene los isótopos del torio, ésta solución se puede utilizar y aplicarle otros procedimientos para el estudio del torio, en nuestro caso no nos interesa este elemento y la solución se desechó.

Finalmente, para hacer la liberación del uranio unido al TBP se agregaron 15 mL de agua destilada al embudo de separación donde se encuentra el TBP, se agitó por dos minutos y el uranio se incorpora a la fase acuosa, se realizan dos lavados consecutivos con agua destilada y se obtuvo una solución con un volumen de 45 mL que contiene únicamente los isótopos de uranio de interés, esta solución es la que se utiliza en el siguiente proceso.

3.2.3 Electrodeposición catódica del uranio: Con la finalidad de obtener un electrodepósito de uranio sobre el disco de acero inoxidable con las características apropiadas que permitan obtener un espectro definido y de alta resolución, se adaptó una celda de electrodeposición, con diversos materiales; el cuerpo de la celda es un vial de vidrio al cual se le desbasta el fondo, y en el otro extremo se adapta una base unida a un poste sobre la que se coloca el disco de acero inoxidable pulido a espejo, que funciona como cátodo, en la parte desbastada, se coloca un tapón de teflón con dos orificios pequeños en el centro, uno por donde se introduce el alambre de platino (ánodo) y el otro para liberar los gases producidos en el proceso de electrodeposición, la celda está dispuesta como se observa en la Figura 4.

El proceso de electrodeposición es el siguiente: al residuo seco obtenido en el proceso de separación y concentración, se le añaden 2 mL de una solución al 5% de $\text{NaHSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$ 9 M, luego se adicionaron 5 mL de HNO_3 concentrado, evaporando a sequedad evitando calcinar la muestra, este residuo se disolvió con 5 mL del electrolito de sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1M y esta solución se transvasó a la celda de electrodeposición, el vaso se lavó 2 veces con 2.5 mL de electrolito y los lavados se añaden a la celda para un total de 10 mL de electrolito, se agregaron unas gotas de azul de timol que funciona como indicador de pH el cual debe de estar entre 2.5 y 3.5, a este pH la solución se tornó en una tonalidad rosa, indicando que el pH es el correcto, se colocó el ánodo de platino a una distancia de 5 mm del cátodo, los electrodos se conectaron a la fuente de voltaje y se ajusta la corriente a 600 mA. El tiempo de electrodeposición fue de una hora, una vez que transcurrió este tiempo, se retira el ánodo de la solución, se apaga la fuente de voltaje, y se colecta la solución del electrolito remanente, a continuación el disco de acero inoxidable con el electrodepósito de los radioisótopos de interés, en este caso uranio, se enjuaga primero con NH_4OH 0.15 M y luego con alcohol etílico, se deja secar al ambiente y está listo para su análisis por espectrometría alfa.

3.3 Cuantificación del uranio por espectrometría alfa

Una vez que el uranio se ha electrodepositado en el disco de acero inoxidable, se lleva a contar al equipo de espectrometría alfa, el cual para la correcta identificación de emisores alfa debe ser calibrado en energía, para ello se utiliza una fuente triple de emisores alfa certificada NIST (^{239}Pu , ^{241}Am y ^{244}Cm) de energías 5.1, 5.1 y 5.8 MeV, respectivamente.

Para garantizar buenos resultados se debe hacer un buen análisis del espectro alfa que arroje el equipo de espectrometría.

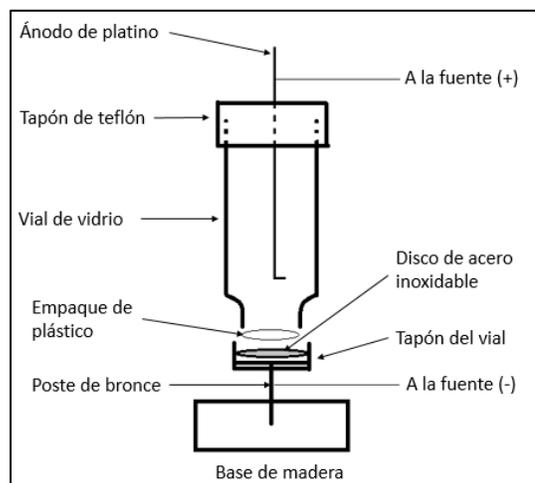


Figura 4. Esquema de una celda de electrodeposición.

El tiempo de conteo requerido para fines estadísticos depende en gran medida de las actividades de los radioisótopos, es muy común usar tiempos de conteo de por lo menos 1000 minutos para muchas muestras naturales, así mismo las muestras blanco deben tener un tiempo de conteo similar para determinar el fondo, el cual está compuesto por dos elementos, el primero es un fondo fijo ocasionado por el ruido electrónico del detector o rayos cósmicos incidentes que puedan golpear al detector, el segundo un fondo variable causado por núcleos de retroceso que pudieran quedar a la deriva entre la fuente y el detector, los más comunes provienen de la desintegración del ^{232}U , conocer con precisión el fondo es esencial para el conteo de muestras con baja actividad.

El análisis del espectro alfa típico de los radioisótopos del uranio es relativamente sencillo debido a que los picos obtenidos son bien resueltos.

El rendimiento químico o eficiencia de extracción del uranio es obtenida mediante el análisis del ^{232}U y su respectiva región o pico en el espectro. La eficiencia de conteo depende del área del detector, el área efectiva de la fuente y de la distancia entre el detector y la fuente. El método más simple de conocer la eficiencia de conteo es medir la actividad de una fuente calibrada de actividad nominal conocida, debe tener un área activa similar a las fuentes que se utilizaran para la cuantificación de uranio y deben contener emisores alfa de vida media larga.

Por último para realizar los cálculos correspondientes a la concentración de uranio se debe tener en cuenta que tanto los radioisótopos naturales del uranio, como el ^{232}U son extraídos con un rendimiento químico idéntico ya que no hay fraccionamiento químico durante los procesos de aislamiento y todos están sujetos a una misma probabilidad de ser medidos por el detector, por lo tanto la eficiencia del detector no se usa para el cálculo de la concentración de uranio en ppb, la cual se realiza mediante la siguiente expresión:

$$[U](ppb) = \frac{(^{238}\text{U})W_s[^{232}\text{U}]_s}{(0.747)V(^{232}\text{U})} \quad (1)$$

donde (^{238}U) es la tasa de conteo correspondiente al pico del ^{238}U en desintegraciones por minuto (dpm), W_s es el peso de la solución agregada de trazador (g), $[^{232}\text{U}]_s$ es la concentración de ^{232}U añadida (dpm/g), 0.747 es la actividad de 1 μg de ^{238}U (dpm), V es el volumen de la muestra y (^{232}U) es la tasa de conteo correspondiente al pico del ^{232}U [7]

4. Resultados

Se presenta en primer lugar la calibración en energía del equipo de espectrometría alfa, se hizo el ajuste lineal a los valores experimentales para la obtención de la ecuación de calibración, para poder identificar correctamente los radioisótopos del uranio, continuando con algunas propiedades físicas de cada una de las muestras tomadas, Tabla 3 y por último los resultados de la cuantificación de uranio Figura 5 y Tabla 4.

De cada pozo se procesaron dos muestras de 3 L cada una, así la concentración de uranio reportada es el promedio de las dos, las incertidumbres reportadas se calcularon conforme a la ley de propagación de error utilizando las incertidumbres que el propio equipo de espectrometría alfa arroja tanto para el pico del ^{238}U como para el pico del ^{232}U .

La eficiencia general de todo el proceso (coprecipitación, separación química, electrodeposición y conteo), se obtiene dividiendo la actividad registrada en el pico correspondiente al trazador entre la actividad añadida de trazador multiplicado por 100, de esta manera se obtiene una eficiencia global promedio de $4.0 \pm 0.002\%$.

La metodología descrita para la separación, concentración y cuantificación de uranio en agua subterránea, no solo permite la determinación de este radionúclido si no que ofrece la posibilidad de realizar un estudio radiológico más completo ya que al realizar la separación del uranio, de forma implícita también se obtiene la separación de otros radionúclidos de forma aislada como el torio y polonio.

5. Análisis de resultados

De acuerdo con la calibración en energía, fue posible identificar correctamente los cuatro radioisótopos del uranio, como se puede apreciar en el espectro figura 6, donde la línea en rojo es el espectro que arroja el equipo y en línea negra se identifica la energía de los radioisótopos y que corresponden con los picos formados, el espectro de la medición del fondo también esta graficado, pero como prácticamente es cero no se ve.

Las concentraciones de uranio encontradas se ubican en el intervalo de 3.2 a 7.3 ppb con un promedio de 5.8 ± 0.27 ppb. La Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) encabeza una serie de investigaciones para establecer un nivel de algún contaminante en el agua en el que aún es seguro para el consumo humano, a este se le llama nivel máximo de contaminante (MCL). El MCL establecido para el uranio según la USEPA es de 30 ppb, en la República Mexicana se sigue esta recomendación según la NOM-014-CONAGUA-2003. Sin embargo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el nivel de uranio destinado para uso y consumo humano no

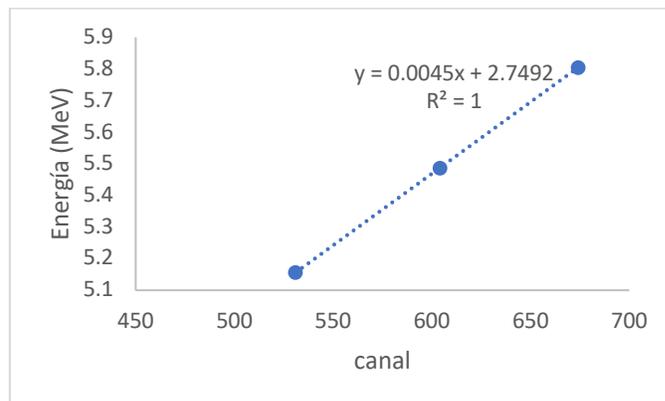


Figura 5. Curva de calibración de la fuente triple.

Tabla 3. Propiedades físicas de las muestras de agua

Pozo	pH	Sólidos totales disueltos (ppm)	Electroconductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	7.79	301	595
2	8.04	170	334
3	7.45	203	409
4	7.87	165	339
5	7.65	295	610

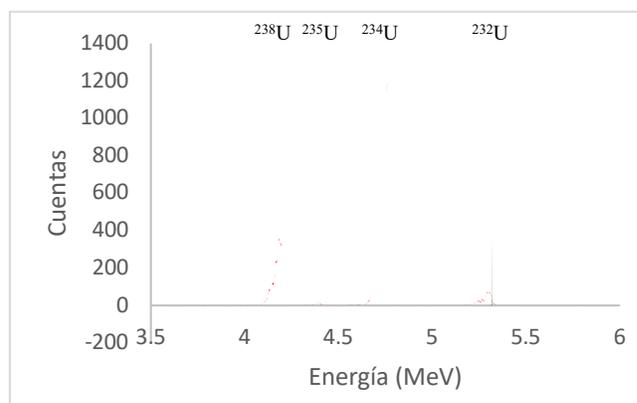


Figura 6. Espectro característico de los radioisótopos del uranio.

Tabla 4. Concentración de uranio en las muestras de agua.

Pozo	Concentración de uranio (ppb)
1	7.33 ± 0.42
2	7.25 ± 0.17
3	4.25 ± 0.12
4	3.21 ± 0.11
5	7.08 ± 0.53

deba exceder 15 ppb [14].

Es bien sabido que cuando alguna persona ingiere algún radionúclido, las partículas radiactivas ionizan los átomos y o moléculas cercanos a ellas causando afecciones a nivel celular, induciendo cambios importantes en el ADN pudiendo conducir a un proceso canceroso. Si bien las partículas alfa que emite el uranio tienen un poder bajo de penetración en la materia, son de las más dañinas si se ingieren ya que causan mucho más ionización por unidad de volumen que la radiación beta o gamma [15].

Ahora bien no solo está presente el riesgo de desarrollar cáncer por ingesta de uranio, sino que también puede causar daño renal debido a su toxicidad química. La nefrotoxicidad del uranio se deriva de la acumulación tisular debido a la ingesta del elemento durante un tiempo prolongado [16].

Las diferentes concentraciones de uranio encontradas, se deben en gran medida a la gran variedad de rocas que conforman el acuífero Guadalupe-Bañuelos [10].

6. Conclusiones y recomendaciones

Se logró cuantificar el uranio contenido en agua subterránea procedente del acuífero Guadalupe-Bañuelos y la correcta identificación de sus radionúclidos.

Las concentraciones de uranio encontradas están en el intervalo de 3.2 a 7.3 ppb con un promedio de $5,8 \pm 0.27$ ppb. Estos valores están por debajo de los límites recomendados por los organismos nacionales e internacionales en esta materia y nos permiten conocer la calidad radiológica del agua.

La importancia de realizar un monitoreo de aguas subterráneas, principalmente aquellas cuyo destino es el consumo humano, en busca de elementos radiactivos, recae en el hecho de que estos elementos representan un gran riesgo de exposición radiactiva si se ingieren, dañando seriamente la salud, pudiendo desencadenar alteraciones celulares graves que pueden terminar en un proceso canceroso.

Las concentraciones de uranio reportadas no sobrepasan el límite máximo recomendado por la USEPA, ni tampoco las 15 ppb que recomienda la OMS. Sin embargo es recomendable implementar un programa de monitoreo sistemático en tiempo y espacio para conocer el grado de variabilidad de las concentraciones de uranio encontradas en este acuífero y poder inferir si el consumo de agua pudiese representar un riesgo a la salud humana. Actualmente no hay registros o datos que permitan saber si dicho monitoreo ya se ha llevado a cabo.

7. Agradecimientos

Este trabajo de investigación se realizó gracias a la Unidad Académica de Estudios Nucleares, de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Todo el equipo, reactivos e infraestructura fue proporcionado por esta institución.

Un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Referencias

[1] Foro de la Industria Nuclear Española, Monografía: ¿Qué es el uranio?, pp.1-5, disponible en

- https://issuu.com/foronuclear/docs/monografia_uranio, [consultado en 2020].
- [2] Ivanovich, M., Harmon, R. S. *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*. Ed. Clarendon Press, 2da edición United Kingdom, 1992.
- [3] Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, *El Uranio*, Morant, Junat de Leon y Castilla, Domenech e-learning multimedia S.A., primera edición 2009.
- [4] Cabrera, A.; Blesarin M.; Maldonado L., *Edad del Agua Subterránea, Cuadernos de Estudio del Agua Subterránea*, E-book, Serie Científica Katarumen, 2014.
- [5] Kenneth G. Orloff, Ketna Mistry, Paul Charp, et al, *Human exposure to uranium in groundwater*, Academic Press, Environmental Research, 2004, No. 3 Vol 94, pp. 319-326.
- [6] RadDecay V4 Software
- [7] Ivanovich, M., Harmon, R. S. *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environmental Problems*, Clarendon Press, 2da. Ed., 1982.
- [8] Tsoufanidis, Nicholas, y Sheldon Landsberger. *Measurement and detection of radiation*. Third. New York: Taylor and Francis Group, 2011.
- [9]. Knoll, G. F., *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons. Fourth edition, 2010.
- [10] Comisión Nacional del Agua, *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero 3227 Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas*, Diario Oficial de la Federación 2009.
- [11] ASTM: D3972-09, *Standard Test Method for Isotopic Uranium in Water by Radiochemistry*, 2009.
- [12] Alcock, K., Grimley, S. S., Healy, T. V., Kennedy, J., & McKay, H. A. C., *The Extraction of Nitrates by tri-n-butyl phosphate (TBP). Part 1. The system TBP+ Diluent+ H₂O+ HNO₃*. Transactions of The Faraday Society, 1956 Vol. 52, pp 39-47,
- [13] Lehritani, M., Mantero, J., Casacuberta, N., Masqué, P., & García-Tenorio, R., *Comparison of Two Sequential Separation Methods for U and Th Determination in Environmental Samples by Alpha-Particle Spectrometry*. Radiochimica Acta International journal for chemical aspects of nuclear science and technology, 2012 Vol. 100, pp 431-438.
- [14] Skeppström, K., & Olofsson, B. Uranium and radon in groundwater. *European water*, 2007, Vol 17 No. 18, pp. 51-62.
- [15] Cember, Herman, y Thomas E. Johnson. *Introduction to Health Physics*. Fourth edition. New York: Mc Graw Hill, 2009.
- [16] Vicente, L., Quiros, Y., Barriocanal, F., et al. *La exposición crónica al uranio, un riesgo potencial de nefrotoxicidad*. 2011 Revista de Toxicología, Vol .28 No.2, 99-108.