

Presencia de actividad alfa y beta total en descargas de agua en el Río Santa Catarina en Monterrey, Nuevo León, México

Total alpha-beta activity in water discharges from the Santa Catarina River of Monterrey, Nuevo Leon, Mexico

Luis Humberto Colmenero Sujo¹, Héctor Osbaldo Rubio Arias², Jesús Manuel Ochoa Rivera³
y María de Lourdes Villalba^{4*}

¹ Instituto Tecnológico de Chihuahua, Instituto Tecnológico de México.

² Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

^{4*} Facultad de Ingeniería, Nuevo Campus Universitario, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México. C.P. 31125, Tel. 6144429500 ext. 2573. mwillalb@uach.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Los isótopos radiactivos son utilizados en diversos procesos, como en tratamientos médicos nucleares. Después de su uso, dichos isótopos pueden ser descargados en las aguas residuales, ocasionando problemas ambientales y de salud humana. El objetivo de este trabajo fue identificar la presencia de emisiones alfa y beta totales en el río Santa Catarina, Monterrey, Nuevo León, México, como referencia para conocer si existe riesgo para la salud de la población debido a estas descargas de radionúclidos en el agua residual. Se recolectaron muestras puntuales por conveniencia en seis sitios de descarga de agua durante la época de invierno y verano y se trasladaron al Laboratorio ABC para su análisis. Las emisiones alfa y beta variaron conforme a la estación del año, encontrándose concentraciones más altas en verano tanto de alfas como betas de 0.551 Bq/l y 0.842 Bq/l, respectivamente. Ningún valor superó los límites permitidos por la normatividad mexicana para elementos radiactivos, por lo que no representan un riesgo para la salud.

Palabras clave: Radionúclidos; descargas de agua; emisiones radiactivas.

Abstract

Radioactive isotopes are used in various processes such as nuclear medical treatments. After their use, these isotopes can be discharged into wastewater, causing environmental and human health problems. The objective of this work was to identify the presence of total alpha and beta emissions in the Santa Catarina River, Monterrey, Nuevo Leon, Mexico, as a reference to know if there is a risk to the health of the population due to these radionuclide discharges in wastewater. Point samples were collected for convenience at six water discharge sites during the winter and summer seasons and taken to the ABC Laboratory for analysis. The alpha and beta emissions varied according to the season of the year, with higher concentrations of both alphas and betas in summer of 0.551 Bq/l and 0.842 Bq/l, respectively. None of the values exceeded the limits allowed by Mexican regulations for radioactive elements and therefore do not represent a health risk.

Keywords: Radionuclides; water discharges; radioactive emissions.

Recibido: 20 de marzo de 2023

Aceptado: 05 de junio de 2023

Publicado: 23 de agosto de 2023

Cómo citar: Colmenero Sujo, L. H., Rubio Arias, H. O., Ochoa Rivera, J. M., & Villalba, M. L. (2023). Presencia de actividad alfa y beta total en descargas de agua en el Río Santa Catarina en Monterrey, Nuevo León, México. *Acta Universitaria* 33, e3824. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2023.3824>

Introducción

Los isótopos radiactivos son hoy en día parte importante de la vida y de las actividades humanas. Las técnicas nucleares se utilizan para determinar y evaluar propiedades de distintos materiales, medir los niveles de contaminantes, esterilizar y desinfectar componentes, monitorear procesos industriales y modificar propiedades químicas y físicas para la producción de nuevos materiales y tratamientos médicos. Los desechos mal confinados de estos productos son un factor de riesgo para la salud (Calvo, 2018; Torres-Carranza & Ortiz-Oliveros, 2019). Actualmente, no es raro encontrar elementos radiactivos en muchas áreas y en diferentes ambientes, como en descargas de agua de uso municipal, industrial, comercial y hospitalario. Estas pueden generar repercusiones serias en la salud humana y en el medio ambiente (Manrique *et al.*, 2015), debido a que muchas sustancias y sus metabolitos son farmacológicamente activos y no son totalmente removidos o inactivados en los sistemas de tratamiento convencionales o por los procesos naturales de autopurificación de los cuerpos receptores, como agua y suelo.

La presencia de fármacos radiactivos que tienen una vida media relativamente corta como los isótopos utilizados en medicina nuclear, por ejemplo, el ^{99m}Tc (tecnecio-99 metaestable, radiación gamma), con periodo de semidesintegración de 6.03 horas, se usa para el estudio de órganos muy variados como el esqueleto, corazón, hígado, bazo, vías biliares, tracto digestivo y cerebro, ya que se combina fácilmente con las moléculas que están cerca. El ^{201}Tl (talio-201, radiación gamma), periodo de semidesintegración de 3.04 días, se emplea para estudios cardiacos; ^{67}Ga (galio-67, radiación gamma), periodo de desintegración 3.3 días, se aplica en la detección de tumores; ^{111}In (indio-111, radiación gamma), periodo de semidesintegración 2.2 días, se usa para procesos inflamatorios; el ^{133}Xe (xenón-133, radiación beta), periodo de semidesintegración 5 días, es usado en estudios pulmonares; y el ^{131}I (yodo-131, radiación beta), periodo de semidesintegración 8.02 días, es usado para el tratamiento de cáncer de tiroides o hipertiroidismo (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear>). Todos estos isótopos radiactivos, al no ser confinados adecuadamente, tienen una presencia constante en las aguas residuales a causa de su reposición continua (pseudopersistencia).

Castro-Pastrana *et al.* (2015) señalaron que el material radiactivo suministrado a los pacientes se elimina por diferentes vías (orina, excremento, saliva y sudor) (Sociedad Española de Protección Radiológica [SEPR], 2011), soluciones acuosas de isótopos radiactivos provenientes del lavado de aparatos, residuos de síntesis orgánica, desechos de comida de pacientes tratados, entre otros (Álvarez-Rico, 2010), que van a parar a la red de drenaje (Mulas *et al.*, 2019); ya que viajan a través de la red de saneamiento, algunas veces hasta las plantas de tratamiento; concentrándose en lodos, producto de la depuración.

Los fármacos radiactivos no figuran dentro de la clasificación de los contaminantes emergentes: residuos farmacéuticos, hormonas y disruptores endocrinos, drogas ilegales, pesticidas, embalaje de productos de cuidado personal, aditivos alimentarios y biocidas. Esta situación es comprensible pues es necesario disponer de datos de seguimiento de calidad. Actualmente, existe poca información sobre el uso y disposición de los desechos radiactivos que emplean las instituciones; además, regularmente se desconoce quién las adquiere, vende, usa y dónde las dispone y/o carece de equipo especializado para detectar las concentraciones de los emisores radiactivos (Cruz-López *et al.*, 2020; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2010). Salinas (2022) analizó y evaluó la existencia de riesgo para el público y el medio ambiente por efectos de los emisores radiactivos en agua de la Unión Europea. El autor sugirió establecer primeramente la detección de los isótopos naturales en el agua, después detectar los artificiales y, finalmente, proceder a realizar una investigación adicional en el caso que los resultados anteriores no justifiquen los valores de las emisiones radiactivas encontradas.

El objetivo de este trabajo fue identificar la presencia de emisiones alfa y beta totales en el río Santa Catarina, Monterrey, Nuevo León, México, como referencia para conocer si existe riesgo para la salud de la población debido a descargas de fármacos radiactivos en el agua residual.

Regulación y disposición de radiactivos en México

En México, los residuos radiactivos son regulados por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS), quien a su vez se rige por las Normas Internacionales de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés), para su manejo, control y disponibilidad final. De acuerdo con la investigación de Torres-Carranza & Ortiz-Oliveros (2019), la CNSNS tiene registro de 441 licencias de operación de fuentes radiactivas con fines médicos; de ellas, 229 ampara el uso de fuentes abiertas y 212 la operación de fuentes cerradas. Los isótopos autorizados para procedimientos de medicina nuclear son: ¹³N, ¹⁵O, ¹⁸F, ²²Na, ³²P, ³⁵S, ⁵¹Cr, ⁵⁵Fe, ^{57,60}Co, ^{67,68}Ga, ^{89,90}Sr, ⁹⁰Y, ^{99m}Tc, ⁹⁹Mo, ¹¹¹In, ^{125,131}I, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵³Sm, ¹⁷⁷Lu, ¹⁸⁸Re, ¹⁹²Ir, ¹⁹⁸Au, ²⁰¹Tl y ²²³Ra.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, publicada el 1 de julio del 2020 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), establece algunos cambios en los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residual; sin embargo, esta no contempla parámetros radiactivos. La NOM-CCA-029 ECOL/1993 indica que en caso de que se identifique descargas provenientes de hospitales con emisores alfas y betas totales que causen efectos negativos, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) fijará condiciones particulares de descarga para señalar los límites máximos permisibles. La NOM-006-NUCL-1994 establece los criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos de público, la cual presenta las concentraciones límites en efluentes gaseosos y vertimientos (DOF, 1996). Entre las regulaciones se encuentra que los radionúclidos que emiten radiación beta, como el ¹³¹I, no deben superar una concentración de 1×10^5 Bq m⁻³ (100 Bq/l).

La Tabla 1 muestra las concentraciones límite de radionúclidos empleados en medicina nuclear que pueden ser vertidos al drenaje en México, según la NOM-006-NUCL-1994 (DOF, 1996).

Tabla 1. Concentración límite de radionúclidos en drenaje de la Norma Oficial Mexicana NOM-006-NUCL-1994.

Radionúclido	drenaje (Bq/m ³)	drenaje (Bq/l)
⁹⁹ Tc	1E+07	10 000
²⁰¹ Tl	8E+06	8000
⁶⁷ Ga	4E+06	4000
¹³¹ I	1E+05	100

Fuente: Elaboración propia.

Las descargas de los radionúclidos que emiten radiación gamma, como es el caso del ⁹⁹Tc, ²⁰¹Tl y ⁶⁷Ga, son mayores a la de los radionúclidos que emiten radiación beta, como el ¹³¹I, esto debido a que su afectación interna es menor.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estado de Nuevo León está en el noreste de México, tiene 31 municipios y una superficie de 64 156 km². La Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) la conforman los municipios de Apodaca, Pesquería, Cadereyta, Jiménez, García, General Escobedo, Guadalupe y Salinas. La ZMM es la segunda ciudad en importancia económica en México y la tercera en población, con 5 784 000 habitantes (Martínez-Quiroga, 2018). La zona cuenta con una altitud promedio de 534 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.), un clima semiárido con una evaporación potencial de 1800 mm/año. La precipitación anual es de 585 mm, el 70% de la lluvia total es principalmente entre los meses de mayo a octubre. Tiene una temperatura media anual de 22 °C, con variaciones entre ± 20 °C dependiendo de la temporada (Cruz-López *et al.*, 2020), cuenta con siete ríos, así como con algunas presas, como se observa el Figura 1.



Figura 1. Ríos de la Zona Metropolitana de Monterrey.
Fuente: Elaboración propia.

El Río Santa Catarina (RSC), que se localiza en los municipios de Guadalupe y Cadereyta Jiménez, es una cuenca de captación de la presa "El Cuchillo", fuente superficial de suministro de agua potable para la ZMM del estado de Nuevo León y su zona conurbada. A lo largo del río existen descargas oficiales y no oficiales, producto de actividades domésticas, industriales, comerciales y hospitalarias (García-Ortega, 2021). De acuerdo con Cruz-López *et al.* (2020), la procedencia de las descargas de agua en el RSC es difusa, lo que hace difícil definir los giros empresariales y comerciales que componen cada una; sin embargo, estas están compuestas principalmente de aguas residuales tratadas primarias o crudas. Es importante mencionar que, debido al crecimiento de la población en la ZMM, las fuentes de agua existentes no son suficientes para satisfacer la demanda, por lo que es necesario la reutilización del agua municipal para uso industrial y otras actividades. En la Figura 2 se puede observar la zona del RSC bajo estudio (aproximadamente 20 km), así como los puntos de muestreo, en tanto que la Tabla 2 muestra, la localización, coordenadas, elevación y descripción de cada punto en el RSC.

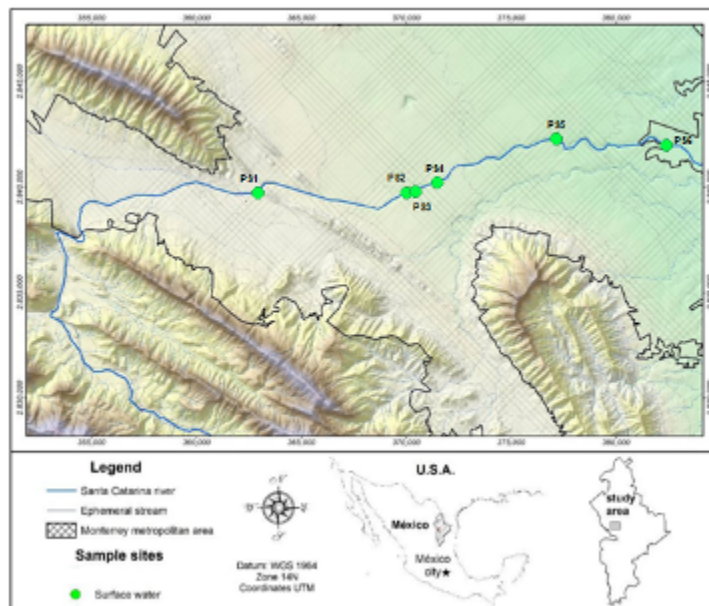


Figura 2. Puntos de muestreo en el río Santa Catarina (Cruz-López *et al.*, 2020).
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Localización, coordenadas, elevación y descripción de los muestreos en el RSC.

M	Localización	Coordenadas/Elevación (m)	Descripción
PS1	Parque Fundidora	371335E; 2840247mN; 503	Descarga provenía del Parque Fundidora de Monterrey, en décadas pasadas esta descarga provenía del proceso propio de fundición. Actualmente se desconoce su origen.
PS2	Tiradero Municipal de Guadalupe	382427E; 2842032mN; 428	Este sitio se encuentra aguas debajo de los tiraderos clandestinos, se ubica sobre la margen sur del lecho del río, cerca de la Av. Maestro Isael Cavazo, intersección con la carretera Reynoso.
PS3	Hospital Materno Infantil	377137E; 2842346mN; 455	El sitio colinda con la Avenida Constitución, frente al hospital infantil.
PS4	Pabellón Ciudadano	370407E; 2839745mN; 512	El sitio colinda con la Av. Morones Prieto a la altura del edificio Pabellón M., ubicada sobre la lateral de la Av. Constitución.
PS5	Hospital IMSS	370053E; 2839971mN; 507	Zona de hospitales: Hospital General No. 33, Unidad Médica de alta especialidad No. 21, IMSS No. 2, Unidad física y Rehabilitación No.1, Clínica y Centro de Seguridad Social del IMSS.
PS6	Colector San Pedro	362921E; 2829712mN; 584	El sitio donde se recolecta el agua del Municipio San Pedro.

Fuente: Elaboración propia.

Se recolectaron muestras puntuales por conveniencia (acceso complicado) directamente en salidas de descargas, se tomaron seis muestras durante la época de estiaje (febrero) y seis muestras en la época de lluvia (julio). Se tomó 3.8 L de agua en recipientes de polietileno, se midió la temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto de cada muestra *in situ*. Se acidularon inmediatamente con HNO₃ concentrado hasta alcanzar un pH de 2.

La determinación de los emisores alfa y beta totales se llevaron a cabo mediante la técnica de centelleo líquido en las instalaciones de ABC Laboratorio Analítico.

Resultados

Los resultados *in situ* de las muestras de agua se presentan en la Tabla 3. Las emisiones radiactivas alfa y beta conforme a la temporada se observan en las Figuras 3 y 4.

Tabla 3. Temperatura, pH, CE y OD en las muestras de agua.

Clave Muestra	Temp (°C) feb - jul	pH feb - jul	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) feb - jul	OD (mg L^{-1}) feb - jul
PS1	22.3 - 26.6	8.6 - 7.9	897 - 857	5.6 - 4.0
PS2	20.9 - 27.0	8.9 - 8.2	750 - 810	7.3 - 9.3
PS3	22.8 - 29.4	8.4 - 8.0	850 - 664	5.1 - 5.1
PS4	17.9 - 30.9	9.0 - 6.1	1880 - 2150	3.8 - 1.5
PS5	20.3 - 25.9	7.9 - 7.8	956 - 874	4.7 - 3.9
PS6	24.3 - 24.3	8.2 - 7.06	1184 - 21495	0.01 - 0.01

Fuente: Elaboración propia.

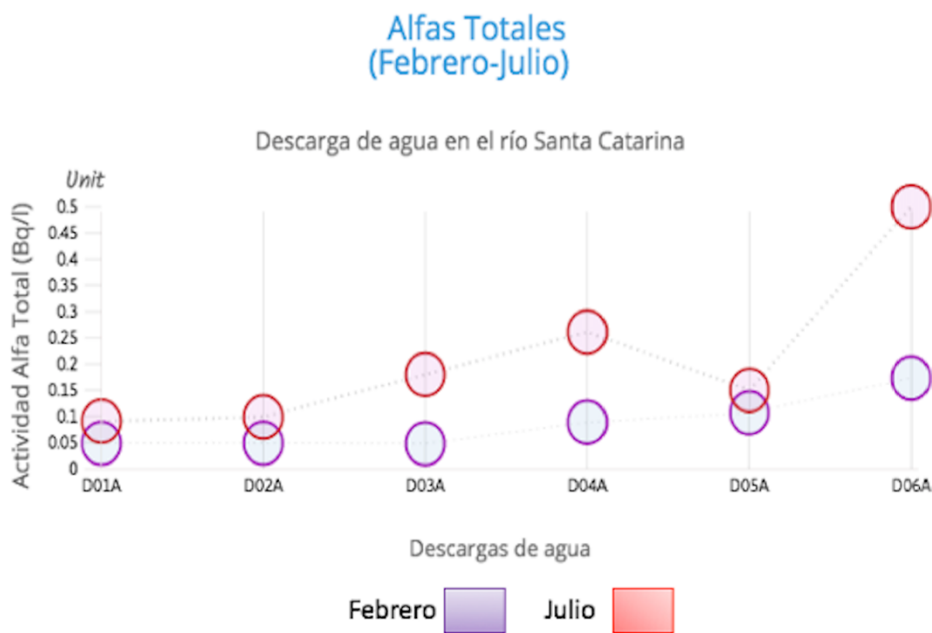


Figura 3. Emisiones alfas totales en descargas en RSC (invierno-verano).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Emisiones betas totales en descargas en RSC (invierno-verano).
Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Las temperaturas de las descargas variaron conforme la temporada; en invierno el rango fue de 17.9 °C a 24.3 °C, mientras que en verano fue de 24.3 °C a 30.9 °C. En general estas son mayores que las encontradas en el agua de suministro (Metcalf & Eddy, 2000) debido a la incorporación de agua caliente doméstica e industrial. Las temperaturas registradas en verano se encuentran entre el rango de la temperatura óptima (25 °C y 35 °C) para el desarrollo de la actividad bacteriana. El rango de pH (6.5 y 8.5) encontrado tanto en invierno como en verano reflejan que las descargas no son del área industrial. Por otro lado, la CE suele variar entre 500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y 1500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en descargas residuales (Trapote, 2011). La PS4 (Pabellón) mostró valores por arriba de este rango en temporada de invierno como en verano, en tanto que PS6 (Colector San Pedro) mostró una CE de 21 495 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en verano. Esto se debe a la presencia de minerales que, al encontrarse disueltos en el agua, producen iones libres que pasan corriente eléctrica (Robledo *et al.* 2017); la alta CE está relacionada con la cantidad de sólidos disueltos. El oxígeno disuelto está estrechamente interrelacionado con la temperatura, del cual se encontraron concentraciones más altas en verano, ya que las bacterias y microorganismos se desarrollan rápidamente en agua caliente (Sardiñas *et al.*, 2006).

Los principales emisores alfa encontrados en agua desde que es considerada como potable son ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{226}Ra y ^{222}Rn ; y los emisores beta son ^{14}C , ^{40}K , ^{228}Ra y ^{210}Pb , estos varían de un lugar a otro en función de factores como altitud sobre el nivel del mar, tipo y cantidad de radionúclidos presente en el suelo, la geología local (factor primordial debido a la pureza, tamaño del cristal, textura de la roca y porosidad), estructura regional, grado de fisuramiento, intemperismo, entre otros (Vázquez, 2011). Estos emisores naturales se suman a los elementos radiactivos que se liberan en las descargas de agua, producto de actividades domésticas, industriales, comerciales y hospitalarias.

Las emisiones alfa totales encontradas en las descargas en febrero fueron de 0.0487 Bq/l a 0.173 Bq/l, con un valor promedio de $0.086 \text{ Bq/l} \pm 0.045 \text{ Bq/l}$; y en julio las concentraciones fueron de 0.091 Bq/l a 0.551 Bq/l, con un valor promedio de $0.321 \text{ Bq/l} \pm 0.24 \text{ Bq/l}$. Por otro lado, las emisiones betas totales en febrero mostraron valores de 0.118 Bq/l a 0.818 Bq/l, con valor promedio de $0.343 \text{ Bq/l} \pm 0.17 \text{ Bq/l}$; mientras que en el periodo de verano fueron de 0.177 Bq/l a 0.842 Bq/l, con valor promedio $0.330 \pm 0.25 \text{ Bq/l}$. Las descargas mostraron una correlación lineal entre las alfas y betas totales de $R^2 = 0.96307$.

Las descargas en la temporada de lluvia (verano) mostraron mayor radiactividad, esto probablemente se debe a que durante las precipitaciones la contaminación acumulada en la superficie urbana es lavada y arrastrada hacia la red de drenaje, aunado al lavado de sedimentos que han sido depositados en la temporada de estiaje en la misma red.

El colector de agua del municipio de San Pedro (PS6) presentó la concentración más alta de alfa de 0.551 Bq/l en verano, valor que supera el indicado en la nueva modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021(DOF, 2022), que entró en vigor el 27 de abril del 2023 para el agua potable, la cual señala el cambio de concentración de emisores alfa de 0.56 Bq/l a 0.5 Bq/l. Los emisores beta en invierno como en verano en todas las descargas analizadas se encontraron por debajo de lo señalado por la nueva modificación a la misma norma, que cambió de 1.86 Bq/l a 1.0 Bq/l. Además, esta misma descarga PS6 mostró las concentraciones más altas de beta en ambas temporadas, producto probablemente de desechos (orina y excremento) de pacientes; ya que este colector transporta aguas residuales del municipio de San Pedro, reconocido por las condiciones de mejor calidad de vida en la ZMM y donde se ubican grandes e importantes hospitales en los cuales se diagnostican y tratan enfermedades mediante medicina nuclear con radionúclidos que emiten radiación beta. Ningún punto de descarga superó los 100 Bq/l, límite establecido por la NOM-006-NUCL-1994 (criterios para limitar la incorporación de material radiactivo en efluentes y vertimientos) (DOF, 1996). Sin embargo, es importante llevar a cabo un monitoreo constante de las descargas de agua, documentar las cantidades de radiación emitidas (alfas y betas), con inclusión de información relativa a los puntos de descarga, los periodos de muestreo, los procedimientos e instrumentos radioanalíticos y los datos conexos sobre la calibración de los instrumentos. También es necesario registrar las tasas de flujo de descarga correlacionadas con las mediciones de radionucleidos conforme lo sugiere la IAEA en las Normas de Seguridad No. RS-G-1.8, que comprende buenas prácticas internacionales para la seguridad radiológica (https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216s_web.pdf) (Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA], 2010).

Conclusiones

Las emisiones alfa y beta totales provenientes de las soluciones acuosas de las actividades domésticas, industriales, comerciales y hospitalarias que se liberan en los seis puntos de descarga analizados a lo largo del río Santa Catarina de la ZMM, no presentan un riesgo para la salud de la comunidad regiomontana. La emisión alfa del colector PS6 que superó el valor establecido por la nueva modificación a la NOM-127-SSA1-2021 para agua potable tampoco genera un problema, pues los límites radiactivos para descargas son diferentes; la NOM-006-NUCL-1994 establece los criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos de público en efluentes y vertimientos (DOF, 1996). Por otro lado, también el colector PS6 mostró las emisiones betas más altas durante el periodo de invierno y verano, esto debido a la contribución hospitalaria (diagnósticos y tratamientos de medicina nuclear) que se realiza todo el año.

Finalmente, se concluye la urgencia de establecer normas en México que señalen los parámetros radiactivos alfas y betas totales en descargas de agua residual, considerando la suma de los emisores naturales y los antropogénicos.

Agradecimientos

Agradecimiento al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (Prodep), por el apoyo financiero para el desarrollo de la investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Álvarez-Rico, Y. (2010). *Caracterización de desechos contaminados con material radiactivo en medicina nuclear* (Tesis de Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas. <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/6035/1/ALVAREZ%20RICO%20YESICA%20Tesis%202010.pdf>
- Calvo, C. (2018). Detección de fugas en canalizaciones enterradas mediante isótopos radiactivos. *Tradición, Segunda Época*, (18), 59-64. doi: <https://doi.org/10.31381/tradicion.v0i18.2655>
- Castro-Pastrana, L. I., Baños-Medina, M. I., López-Luna, M. A. & Torres-García, B. L. (2015). Ecofarmacovigilancia en México: perspectivas para su implementación. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 46(3), 16-40. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/579/57945705003.pdf](https://www.redalyc.org/pdf/579/57945705003.pdf)
- Cruz-López, A., Dávila-Pórcel, R. A., de León-Gómez, H., Rodríguez-Martínez, J. M., Suárez-Vázquez, S. I., Cardona-Benavides, A., Castro-Larragoitia, G. J., Boreselli, L., Villalba, M. L., Pinales-Munguía, A., Silva-Hidalgo, H., De la Garza, R., & Espino-Valdes, M. S. (2020). Exploratory study on the presence of bisphenol A and bis (2-ethylhexyl) phthalate in the Santa Catarina River in Monterrey, N.L., Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(488). doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08446-4>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (20 de febrero de 1996). Norma Oficial Mexicana NOM-006-NUCL-1994, *Criterios para la aplicación de los límites anuales de incorporación para grupos críticos del público*. Secretaría de Energía. <https://www.tecnofisica.com/images/documents/nucl/nom-006-nucl-1994.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (02 de mayo de 2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Secretaría de Salud. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=
- García-Ortega, R. (2021). Área Metropolitana de Monterrey. Problemática ecológica, servicios urbanos y medio ambiente (antecedentes y situación actual). En Colegio de México (ed.), *Servicios urbanos, gestión local y medio ambiente*. (pp. 399-414). doi: <https://www.jstor.org/stable/j.ctv3dnrg9.25>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2010). *TC1003.1 Remoción de contaminantes emergentes de importancia ambiental y sanitaria. Segunda Etapa*. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1467/TC-1003.1.pdf>
- Manrique, W., Rodríguez, E., Cabañas, D., & Basulto, Y. (2015). Cuantificación de yodo-131 en descargas de aguas residuales de laboratorio de medicina nuclear en Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*, 19(3), 137-146. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750926001>
- Martínez-Quiroga, G. E. (2018). *Caracterización geológica del río Santa Catarina como base para la elaboración de estudios ambientales de contaminación y abastecimiento de agua potable para el área metropolitana de Monterrey (AMM)* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil. <http://eprints.uanl.mx/16176/1/1080290211.pdf>
- Metcalf & Eddy. (2000). *Ingeniería de Aguas Residuales* (3a ed.). McGraw-Hill
- Mulas, D., Camacho, A., Garbayo, A., Devesa, R., Duch, M. A. (2019). Medically-derived radionuclides levels in seven heterogeneous urban wastewater treatment plants: The role of operating conditions and catchment area. *Science of the Total Environment*, 663, 818-829. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.349>

- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2010). *Normas de Seguridad del OIEA. Protección para las personas y el medio ambiente*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216s_web.pdf
- Robledo, V. H., Velázquez, M. A., Montañez, J. L., Pimentel, J. L., Vallejo, A. A., López, M. D., & Venegas, J. (2017). Hidroquímica y contaminantes emergentes en residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(2), 221-235.
doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.02.04>
- Salinas, N. (2022). *Estudio de los valores radiológicos ambientales en agua y dieta en España* (Tesis de Grado). Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco. <http://hdl.handle.net/108>
- Sardiñas, O., Chiroles, S., Fernández, M., Hernández, Y., & Pérez, A. (2006). Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 6, 202-206.
[https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc51015aa031684_Hig.Sanid_Ambient.6.202-206\(2006\).pdf](https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc51015aa031684_Hig.Sanid_Ambient.6.202-206(2006).pdf)
- Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR). (2011). *Foro sobre protección radiológica en el medio sanitario*.
<https://www.sepr.es/profesionales/descargables/category/77-foro-de-pr-en-el-medio-sanitario>
- Torres-Carranza, M. A., & Ortiz-Oliveros, H. B. (2019). Desechos radiactivos de vida media corta en hospitales públicos en México: estado Actual. *CIENCIAS ergo-sum*, 26(2), 1-15.
doi: <https://doi.org/10.30878/ces.v26n2a8>
- Trapote, A., (2011). *Depuración de aguas residuales urbanas* (1a ed.). Publicaciones Universidad de Alicante
- Vázquez, I. (2011). *Estudio geoquímico de suelos y aguas como base para evaluar la contaminación: relación Roca-Suelo-Agua* (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/837>