



Revista Logos Ciencia & Tecnología

ISSN: 2145-549X

Policía Nacional de Colombia

Mosos-Paño, Fernando; Ospina-Perdigón, Liseth Andrea; Zambrano, Viviana; Ávila-Prada, Leidy Tatiana; Gómez-Carvajal, Johnny Walter
Determinación de la concentración de actividad de 131I en la cuenca media del río Bogotá
Revista Logos Ciencia & Tecnología, vol. 13, núm. 3, 2021, Septiembre-Diciembre, pp. 20-29
Policía Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517769783003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Determinación de la concentración de actividad de ^{131}I en la cuenca media del río Bogotá

Determination of the activity concentration of ^{131}I in the middle basin of the Bogotá river

Determinação da concentração de atividade de ^{131}I na bacia média do rio Bogotá

Fernando Mosos-Patiño^{a*} | Liseth Andrea Ospina-Perdigón^b | Viviana Zambrano^c
| Leidy Tatiana Ávila-Prada^d | Johnny Walter Gómez-Carvajal^e

^a<https://orcid.org/0000-0003-1218-1219> Servicio Geológico Colombiano – SGC, Bogotá D. C., Colombia

^b<https://orcid.org/0000-0003-3578-7678> Servicio Geológico Colombiano – SGC, Bogotá D. C., Colombia

^c<https://orcid.org/0000-0002-3055-478X> Servicio Geológico Colombiano – SGC, Bogotá D. C., Colombia

^d<https://orcid.org/0000-0002-3983-2395> Servicio Geológico Colombiano – SGC, Bogotá D. C., Colombia

^e<https://orcid.org/0000-0002-8071-8201> Servicio Geológico Colombiano - SGC, Bogotá D. C., Colombia

- Fecha de recepción: 2021-06-02
 - Fecha concepto de evaluación: 2021-07-17
 - Fecha de aprobación: 2021-08-13
- <https://doi.org/10.22335/rlct.v13i3.1466>

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Mosos, F., Ospina, L., Zambrano, V., Ávila, L.T., & Gómez, J. (2021). Determinación de la concentración de actividad de ^{131}I en la cuenca media del río Bogotá. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 13(3), 20-29. <https://doi.org/10.22335/rlct.v13i3.1466>

RESUMEN

Esta investigación presenta una aproximación para determinar la presencia de ^{131}I (isótopo radiactivo usado en el diagnóstico y la terapia metabólica del cáncer de tiroides) en el río Bogotá, cuerpo de agua ubicado en el límite de la capital colombiana. Se tomaron muestras a lo largo de la cuenca media del río, las cuales fueron analizadas por medio de espectrometría de rayos gamma de alta resolución. Se obtuvo una concentración máxima de 16.8 Bq L⁻¹ en el punto denominado Puente de Guadua, cercano a la PTAR El Salitre, seguido por la medición en el punto Gibraltar, con 16.1 Bq L⁻¹. Estos resultados se consideran relevantes por ser cercanos a la concentración máxima establecida para vertimientos en forma líquida a alcantarillas, ríos y otras grandes masas de agua, estipulados en la normativa colombiana, además de que superan el valor de referencia para agua de consumo señalado por la Organización Mundial de la Salud. La presencia de ^{131}I se puede asociar a las actividades del sector médico, como consecuencia del transporte del radioisótopo desde las instalaciones donde se aplica, pasando por las redes de alcantarillado, a la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad y finalmente al río.

Palabras clave: Medicina nuclear, espectrometría gamma, vertimientos.

* Autor de correspondencia. Correo electrónico: fmosos@sgc.gov.co



ABSTRACT

This research presents an approximation to determine the presence of ^{131}I (a reagent used in diagnosis and metabolic therapy of thyroid cancer) in the Bogota River, the body of water located on the border of the Colombian capital. Samples were taken along the middle river basin and analyzed using the high-resolution gamma-ray spectrometry technique. A maximum concentration of 16.8 Bq L⁻¹ was obtained at the point called Guadua bridge, near the PTAR El Salitre, followed by the measures in point Gibraltar, with 16.1 Bq L⁻¹. These results are considered relevant because of their proximity to the maximum concentration established for discharges in liquid form to sewers, rivers and other large bodies of water, stipulated in the Colombian regulations. They also exceed the World Health Organization reference value for drinking water. The presence of ^{131}I can be associated to the activity of the medical sector, as a consequence of the transport of the radioisotope from the facilities where it is applied, through the sewerage networks, to the wastewater treatment plant of the city and finally to the river.

Keywords: Nuclear medicine, gamma spectrometry, discharges.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma abordagem para determinar a presença de ^{131}I (um reagente usado no diagnóstico e terapia metabólica do câncer de tireoide) no rio Bogotá, um corpo de água localizado no limite da capital colombiana. As amostras foram coletadas ao longo da bacia média do meio, as quais foram analisadas por meio de espectrometria de raios gama de alta resolução. A concentração máxima de 16,8 Bq L⁻¹ foi obtida no ponto denominado Puente de Guadua, próximo à PTAR de El Salitre, seguida da medição no ponto de Gibraltar, com 16,1 Bq L⁻¹. Esses resultados são considerados relevantes por serem próximos da concentração máxima estabelecida para a propagação em forma líquida em esgotos, rios e outros grandes corpos de água, estipulados na regulamentação colombiana, além de ultrapassar o valor de referência para água potável indicado pela Organização Mundial da saúde. A presença do ^{131}I pode ser associada às atividades do setor médico, como resultado do transporte do radioisótopo das instalações onde é aplicado, passando pelas redes de esgoto, à estação de tratamento de águas residuais da cidade e finalmente até o rio.

Palavras chave: Medicina nuclear, espectrometria gama, vertedouro.

La presencia de pequeñas cantidades de isótopos radiactivos en descargas realizadas al sistema de alcantarillado de las ciudades es relativamente frecuente (Ortiz, 2004). Dentro de los radionúclidos artificiales que se han encontrado en estos sistemas están ^{99}mTc , ^{85}Sr y ^{131}I (Rahman, 2011), este último ampliamente usado en medicina nuclear para el diagnóstico y tratamiento de lesiones relacionadas con la tiroides.

La concentración de ^{131}I en los residuos líquidos proviene de la orina de los pacientes tratados, así como de pequeños volúmenes de preparación y tratamiento descargados al sistema de alcantarillado (Ren et al., 2008). La Dirección de Asuntos Nucleares (DAN), dependencia del Servicio Geológico Colombiano (SGC), reporta 122 establecimientos dedicados a la práctica de medicina nuclear en el territorio colombiano. De estos, para mediados de 2017, la DAN identifica 33 establecimientos con emplazamiento en Bogotá, de los cuales el 67 % corresponden

a terapia metabólica y el 33 % restante a diagnóstico. Además, el 81 % de los establecimientos que desarrollan su práctica en Bogotá emplean ^{131}I (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Las concentraciones de este radionúclido en el sistema de alcantarillado público del país se encuentran reguladas por la Resolución 180005 de 2010 del Ministerio de Minas y Energía, con un valor máximo de tasa de emisión mensual en concentración de actividad de $1.90\text{E}+01\text{ BqL}^{-1}$.

En nuestro país, un estudio previo se realizó en el río Medellín, donde se detectó presencia de ^{131}I en tres de los seis puntos muestreados, con valores de concentración de actividad que oscilan entre 4.14 y 6.27 BqL⁻¹ (Navia, 2015).

Es necesario tener en cuenta que la exposición a ^{131}I aumenta la probabilidad de ocurrencia de afectaciones a

la salud, como la aparición de cáncer de tiroides, con dosis de radiación tan bajas como 0.1 sievert (Committee on Thyroid Screening Screening Related to I-131, 1999).

Así pues, considerando la presencia de estas 33 instalaciones de medicina nuclear en la ciudad de Bogotá, se evidenció la necesidad de realizar un estudio preliminar de las concentraciones de ^{131}I en el río Bogotá, el cual recibe los vertimientos generados por los sectores comercial, industrial, hospitalario, institucional y doméstico, tras haber sido tratados en las plantas de tratamiento destinadas para tal fin. El 90% de la carga contaminante del río Bogotá se encuentra distribuida así: un 30% proviene de la cuenca Salitre, 39% corresponde al Fucha, 21% al río Tunjuelo y el 10% restante a las subcuencas Torca, Conejera, Jaboque, Tintal y Soacha (DPAE, 2006). Parte de estas aguas son empleadas en el distrito de riego y drenaje La Ramada, para la agricultura en la sabana de Bogotá (CAR, 2010).

En el contexto existente nace de este modo la necesidad de conocer la presencia y concentración de ^{131}I en el río Bogotá, con el propósito de determinar si los valores obtenidos se encuentran por debajo de los límites permisibles.

Metodología

La metodología empleada para la toma, preparación y análisis de muestras se describe a continuación:

Área de estudio

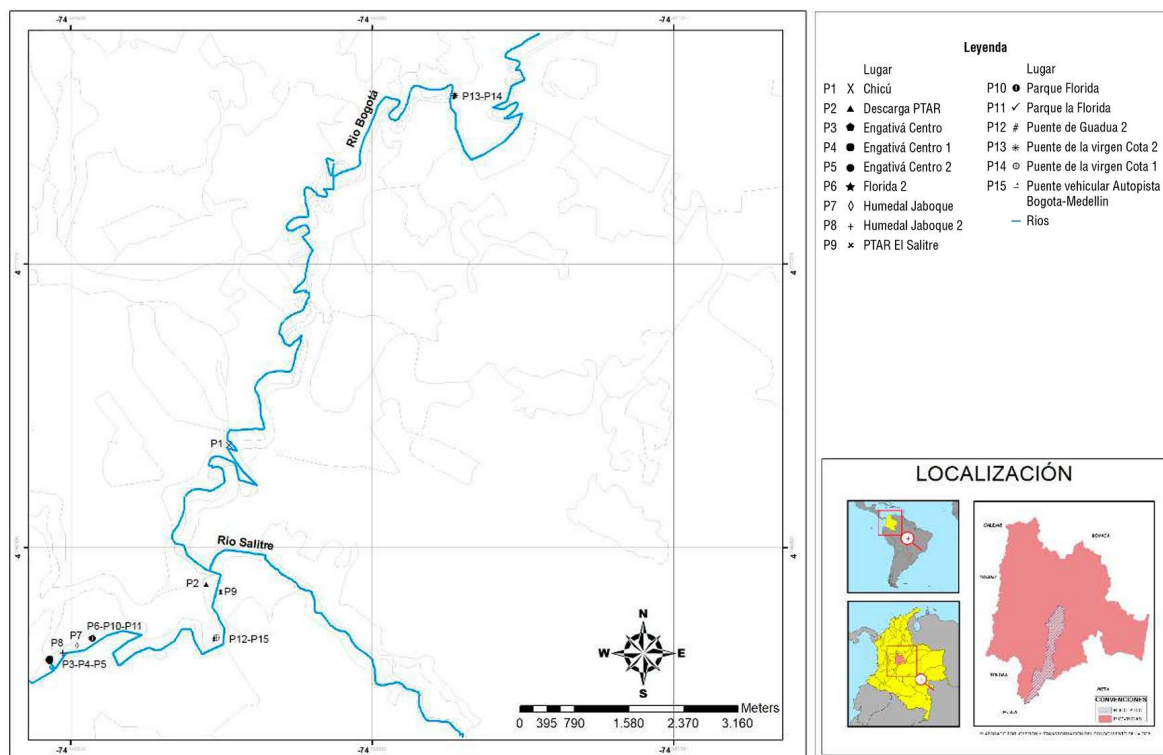
La delimitación del área de estudio se llevó a cabo seleccionando treinta puntos de muestreo a lo largo de la cuenca media del río Bogotá (figuras 1 y 2), desde el municipio de Cota en el puente de La Virgen hasta antes del embalse de Muña en Soacha. Los vertimientos de la cuenca media provienen de los tres principales ríos de la ciudad, el Salitre, el Fucha y el Tunjuelo, y son de tipo doméstico, industrial y hospitalario, entre otros.

Se tuvo en cuenta la facilidad de acceso, la seguridad y la logística de los puntos de muestreo seleccionados, debido a lo cual se solicitó apoyo de la Dirección de Investigación Criminal e Interpol (DIJIN) y de la Unidad de Operaciones Especiales en Emergencias y Desastres de la Policía Nacional (PONALSAR).

Las figuras 1 y 2 presentan la ubicación de los puntos de muestreo a lo largo de la cuenca media del río Bogotá.

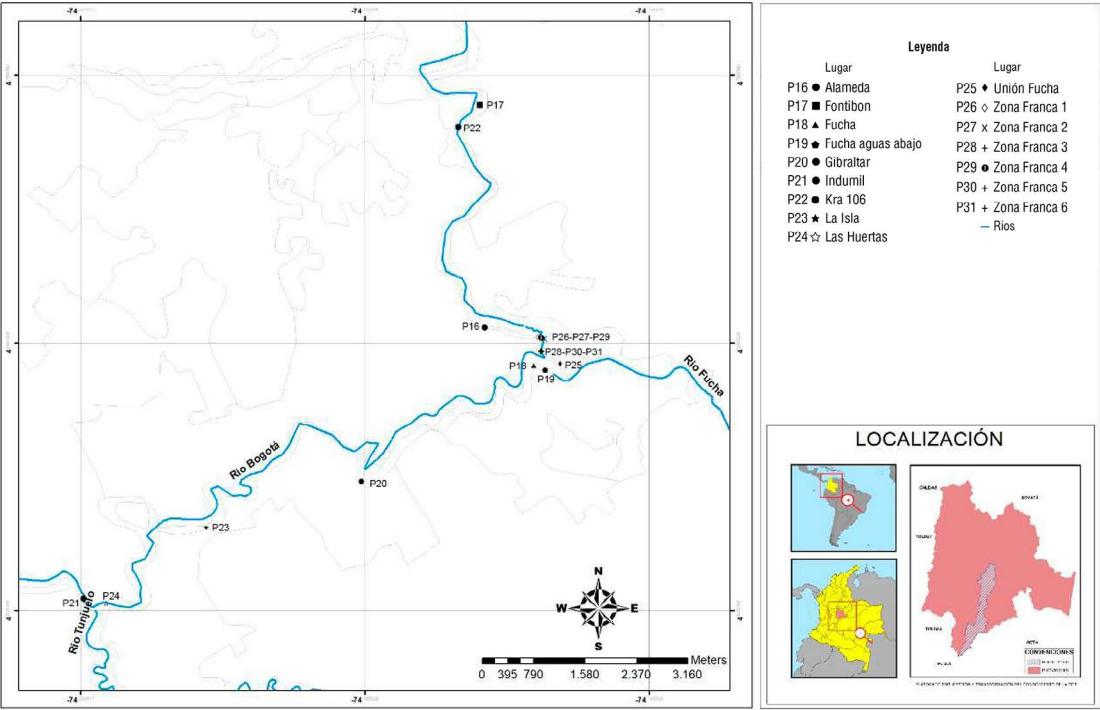
Figura 1

Ubicación puntos de muestreo, sección superior de la cuenca media del río Bogotá



Nota: El punto P9 hace referencia a la ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre, la cual se incluye como geolocalización, aunque no se tomaron muestras dentro de la misma.

Figura 2
Ubicación puntos de muestreo, sección inferior de la cuenca media del río Bogotá



Muestreo

Se realizó un muestreo compuesto, tomando tres muestras por punto y unificándolas. Se tuvo en cuenta el caudal reportado diariamente por las diferentes estaciones de monitoreo que posee la Empresa de Acueducto y Alcantarilla-

do de Bogotá (EAAB, s.f.) a lo largo de la cuenca media. La tabla 1 presenta las coordenadas de los puntos, las fechas de realización del muestreo y el caudal reportado para esas fechas, información que se consolidó desde inicios del mes de agosto hasta finales del mes de noviembre de 2017.

Tabla 1
Localización de los puntos de muestreo

No	Punto	Identificación figuras 1 y 2	Coordenadas: Latitud - Longitud	Localización	Fecha de muestreo	Caudal (m3/s)
1	Puente La Virgen Cota 1	P14	4.799586 - 74.096018	Suba - Cota	08-oct-17	2.091
2	Puente La Virgen Cota 1		4.799586 -74.096018	Suba - Cota	08-oct-17	2.091
3	Puente La Virgen Cota 2	P13	4.799586 -74.096018	Suba - Cota	24-oct-17	2.018
4	Chicú	P1	4.753191 - 74.125158	Suba	24-oct-17	No reporta
5	Descarga PTAR	P2	4.736421 -74.126579	Engativá	24-oct-17	No reporta
6	Puente de Guadua 2	P12	4.728772 -74.126701	Engativá	24-oct-17	16.3
7	Puente vehicular autopista Bogotá-Medellín	P15	4.728772 -74.126701	Engativá	04-ago-17	13.99
8	Parque La Florida	P6	4.72772 -74.14422	Engativá	07-ago-17	No reporta
9	Engativá centro	P3	4.72882 -74.14337	Engativá	09-ago-17	No reporta
10	Engativá centro 1	P4	4.72882 -74.14337	Engativá	14-ago-17	No reporta
11	Engativá centro 2	P5	4.728903 -74.142877	Engativá	14-ago-17	No reporta
12	Parque La Florida	P10	4.728843 -74.1417	Engativá	11-sep-17	No reporta
13	Parque La Florida	P11	4.723673 -74.112687	Engativá	11-sep-17	No reporta
14	Humedal Jaboque	P7	4.725821 -74.148837	Engativá	24-oct-17	No reporta

No	Punto	Identificación figuras 1 y 2	Coordenadas: Latitud - Longitud	Localización	Fecha de muestreo	Caudal (m3/s)
15	Humedal Jaboque 2	P8	4.72882 -74.14337	Engativá	24-oct-17	No reporta
16	La Alameda	P16	4.669754 -74.170337	Fontibón	01-nov-17	2.17
17	Fontibón	P17	4.676469 -74.174585	Fontibón	01-nov-17	2.17
18	Kra 106	P22	4.666803 -74.160337	Fontibón	01-nov-17	2.17
19	Zona Franca 1	P26	4.664450 -74.160380	Fontibón	21-ago-17	2.17
20	Zona Franca 2	P27	4.664450 -74.160380	Fontibón	23-ago-17	2.17
21	Zona Franca 3	P28	4.663210 -74.158449	Fontibón	13-sep-17	2.17
22	Zona Franca 4	P29	4.664450 -74.160380	Fontibón	09-oct-17	2.17
23	Zona Franca 5	P30	4.662825 -74.158706	Fontibón	09-oct-17	2.17
24	Zona Franca 6	P31	4.662825 -74.158706	Fontibón	16-ago-17	2.17
25	Unión Fucha	P25	4.663006 -74.160698	Fontibón	21-ago-17	2.17
26	Fucha aguas abajo	P19	4.663006 -74.16069	Fontibón	01-nov-17	2.17
27	Indumil	P21	4.634117 -74.217623	Soacha	19-oct-17	4.1
28	Gibraltar	P20	4.64869 -74.182477	Kennedy	19-oct-17	No reporta
29	La Isla	P23	4.6310989 -74.23862	Bosa	19-oct-17	39.77
30	Las Huertas	P24	4.590362 -74.247638	Soacha	19-oct-17	No reporta

Toma de muestras y preparación

Para la toma y preparación de las muestras se tuvo como referencia el trabajo de tesis para la determinación del radio de incidencia del ^{131}I , a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá (Ospina, 2018) y su adaptación con las normas técnicas colombianas NTC-ISO 5667 (de la 1 a la 4), así como el instructivo de toma de muestras de aguas residuales del IDEAM (IDEAM, 2007) y el procedimiento para el muestreo, recepción y conservación de muestras de agua para la determinación de la radiactividad ambiental del Consejo de Seguridad Nuclear Española (CSN, 2009).

Se recolectaron treinta muestras a lo largo de la cuenca media del río. En seis puntos se tomaron muestras en el centro y en la orilla, a una profundidad de aproximadamente 50cm y a una separación de orillas de aproximadamente 30cm, donde las condiciones logísticas y de seguridad lo permitieron.

Las muestras fueron recolectadas en botellas de vidrio de 400mL, previamente lavadas con jabón y secadas. Una vez recolectadas, las muestras fueron filtradas al vacío empleando tres filtros diferentes: un primer papel filtro cualitativo (grado medio 102) de diámetro 12.5 cm, un segundo filtro de membrana de nitrato de celulosa de 47 mm de diámetro, con un tamaño de poro de 1.20 micras, y un tercer filtro de membrana de nitrato de celulosa, de diámetro 47 mm y tamaño de poro de 0.45 micras,

debido a la presencia de sólidos suspendidos en las muestras. Los filtros empleados no fueron analizados por espectrometría gamma, debido a que la fracción sólida fue mínima, y se dispusieron entonces como desecho convencional.

Se acondicionó el contenido de las muestras en una geometría uniforme de 100 mL de polietileno, usada para el análisis, y posteriormente las mismas muestras fueron aciduladas con ácido clorhídrico 1N hasta alcanzar un pH de 2 (American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation, 2017; ICONTEC, 2004), para evitar la proliferación de microorganismos y minimizar la precipitación y adsorción de los cationes por las paredes del recipiente. La verificación de acidez se realizó con papel de medición de pH, luego las botellas fueron rotuladas con: número de muestra, nombre de la persona que tomó la muestra, fecha, lugar de toma de la muestra, observaciones del sitio de muestreo y características de la muestra.

Finalmente, las mismas fueron refrigeradas y transportadas en la geometría usada para análisis hasta el Laboratorio de Radiometría Ambiental, para su procesamiento y análisis.

Procesamiento y análisis

Para el análisis de las muestras obtenidas dentro del marco de la presente investigación se empleó la espectrometría por rayos gamma de alta resolución, a través del

servicio prestado por el Laboratorio de Radiometría Ambiental del Servicio Geológico Colombiano.

Este método permite obtener la distribución energética de las radiaciones gamma emitidas por la muestra, basándose en la interacción de los fotones con la materia y en la naturaleza electromagnética de los mismos, que les permite interactuar fuertemente con los electrones cargados presentes en los átomos de la muestra. La frecuencia del fotón emitido depende tanto de la diferencia de energías entre el estado inicial y final del radionúclido como del elemento al cual pertenece el átomo, lo que permite determinar los elementos presentes en un material midiendo el patrón que produce la radiación gamma a lo largo del tiempo (Gonzalo Uribarri, 2011).

Se emplearon dos detectores semiconductores de estado sólido de germanio hiperpuro (GeHP): el primero marca Canberra, modelo GC7020, con una eficiencia relativa del 70%, y el segundo marca Ortec, modelo GEM-10195, con eficiencia relativa del 30%. La tabla 2 presenta los valores de eficiencia e incertidumbre obtenidos con el material de referencia certificado, para el fotópico del ^{131}I ubicado en 364.49 keV.

Tabla 2

Eficiencia de los sistemas espectrométricos

Espectrómetro	Canberra (70 %)	Ortec (30 %)
Eficiencia (364.49 keV)	4.37E-02 +/- 1.2E-03	1.11E-02 +/- 1.1E-04

Determinación de la actividad del ^{131}I

La calibración de los sistemas espectrométricos en energía, resolución y eficiencia se realizó empleando materiales de referencia, los cuales tienen actividades conocidas y emiten fotones gamma con energías características. El material de referencia se preparó a partir de una *cápsula puntual* de ^{131}I , la cual fue caracterizada mediante un equipo de espectrometría gamma calibrado para la determinación de actividad de fuentes puntuales. La calibración por eficiencia de los sistemas espectrométricos en el laboratorio se hizo inmediatamente después de la preparación de la solución, a fin de eliminar los posibles efectos de pérdida de actividad por evaporación de yodo y obtener la eficiencia para la geometría de la muestra y en la energía correspondiente al isótopo de interés.

Esta es una metodología que garantiza la trazabilidad metrológica a partir de las fuentes puntuales certificadas

empleadas para calibrar la *cápsula puntual* de ^{131}I . Las características del material de referencia empleado para el ^{131}I se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Características del material de referencia ^{131}I

Radionúclido	Concentración de actividad (BqL ⁻¹)	Incetidumbre (BqL ⁻¹)	Fecha de referencia
^{131}I	10.820	652	31/07/2017

La calibración por eficiencia establece la relación entre la tasa de recuento del detector y la tasa de emisión de la muestra para cada energía gamma, lo que quiere decir que la eficiencia es la fracción de fotones detectados por el sistema espectrométrico. Su aplicación permite la determinación de la actividad del radionúclido objeto de análisis en la muestra. Se empleó el material de referencia descrito en la tabla 3 y se aplicó la ecuación 1, lo que permitió utilizar una eficiencia punto a punto.

$$\varepsilon = \frac{R_{S+B} - R_B}{Ac * \gamma * Cf * m} \quad (1)$$

En la ecuación, R_{S+B} corresponde a la tasa bruta de conteo en el fotópico de interés de la muestra y el fondo, R_B a la tasa bruta de conteo en el fotópico de interés del fondo, Ac a la concentración de actividad del radionúclido en el material de referencia, γ a la probabilidad de emisión gamma para la energía de interés, Cf al factor de corrección y m a la masa del MRC, respectivamente.

La configuración empleada para la calibración de los sistemas de espectrometría gamma consiste en la disposición de un envase de 100 mL de polietileno por un tiempo de 18.000 segundos sobre el detector de germanio hiperpuro.

La actividad mínima detectable (AMD) varía con la naturaleza de la muestra (Gascó et al., 2009), pues para su cálculo se consideran variables como la concentración de actividad de la misma, la eficiencia del sistema espectrométrico y el tiempo de análisis. Para su determinación se empleó la ecuación suministrada por la norma ISO 11929:2010. La tabla 4 presenta la AMD obtenida en los sistemas espectrométricos empleados con la geometría de análisis característica.

Tabla 4

Actividad mínima detectable ^{131}I en los sistemas espectrométricos empleados

Espectrómetro	Canberra (BqL-1)	Ortec (BqL-1)
Actividad mínima detectable (AMD) para la energía de 364.49 keV	0.08	0.48

Por su parte, el cálculo de la incertidumbre para el método de espectrometría gamma se realizó empleando la ecuación 2. Las variables que contribuyen en mayor medida a la incertidumbre de la actividad son la tasa de conteo de la muestra y el fondo, así como la incertidumbre del material de referencia certificado empleado para el cálculo de la eficiencia.

$$u^2 A = \left(\frac{1}{\varepsilon * y * m * C_f} \right)^2 * (u_{R_{s+B}}^2 + u_{R_B}^2) + A^2 * \left(\frac{u_{\varepsilon}^2}{\varepsilon^2} + \frac{u_m^2}{m^2} + \frac{u_y^2}{y^2} + \frac{u_{C_f}^2}{C_f^2} \right) \quad (2)$$

En esta ecuación, ε corresponde a la eficiencia de detección para la energía gamma de interés, γ a la probabilidad de emisión gamma para la energía de interés, m a la masa de la muestra (kg), C_f al factor de corrección, R_{s+B} a la tasa de conteo gruesa en el fotopico de interés [s-1] para la muestra y el fondo, y R_B a la tasa de conteo gruesa en el fotopico de interés [s-1] de la muestra, respectivamente.

Cálculo del decaimiento en tiempo: factor de corrección de decaimiento

El ^{131}I se caracteriza por contar con un periodo de semi-desintegración de 8.02 días, lo cual implica que durante el tiempo transcurrido entre el muestreo y análisis, así como en el mismo tiempo de análisis la concentración de actividad de las muestras puede presentar variaciones, por lo que en consecuencia se aplicó un factor de corrección de decaimiento dado por la ecuación 3.

$$C_f = \frac{1 - e^{-\ln(2) * \left(\frac{t}{T_{1/2}} \right)}}{\ln(2) * \left(\frac{t}{T_{1/2}} \right) * e^{-\ln(2) * (A-B) * \left(\frac{86400}{T_{1/2}} \right)}} \quad (3)$$

Aquí, t corresponde al tiempo de análisis de la muestra, $T_{1/2}$ al periodo de semi-desintegración, A a la fecha y hora de inicio del análisis de la muestra en el sistema de espectrometría gamma y B a la fecha y hora de muestreo, respectivamente.

Resultados

El muestreo realizado a lo largo de la cuenca media del río Bogotá permitió determinar la presencia de ^{131}I en algunos puntos del cuerpo de agua, con valores máximos de concentración de actividad de 16.8 BqL-1. De los treinta puntos muestreados, trece presentaron resultados inferiores a la actividad mínima detectable.

La concentración de actividad reportada en la tabla 5 corresponde a la presencia de ^{131}I en la fecha y hora de toma de la muestra.

Tabla 5

Actividad (BqL-1), incertidumbre y actividad mínima detectable del ^{131}I identificada en los puntos de muestreo en la cuenca media del río Bogotá

No	Punto	Actividad BqL-1	Incertidumbre BqL-1	Actividad mínima detectable BqL-1
1	Puente La Virgen Cota 1	<0.40		0.40
2	Puente La Virgen Cota 1	<0.40		0.40
3	Puente La Virgen Cota 2	<0.40		0.40
4	Chicú	<0.40		0.40
5	Descarga PTAR	9.66	0.38	0.02
6	Puente de Guadua 2	16.76	0.82	1.25
7	Puente vehicular autopista Bogotá-Medellín	7.26	0.48	1.06
8	Parque La Florida	<0.40		0.40
9	Engativá centro	<0.08		0.08
10	Engativá centro 1	<0.08		0.08
11	Engativá centro 2	<0.08		0.08
12	Parque La Florida	2.61	0.23	0.49
13	Parque La Florida	4.50	0.55	0.95
14	Humedal Jaboque	3.42	0.19	0.06
15	Humedal Jaboque 2	6.89	0.68	1.41
16	La Alameda	9.87	0.40	0.02
17	Fontibón	7.67	0.47	1.06

No	Punto	Actividad BqL-1	Incertidumbre BqL-1	Actividad mínima detectable BqL-1
18	Kra 106	3.80	0.44	0.95
19	Zona Franca 1	<0.08		0.08
20	Zona Franca 2	<0.08		0.08
21	Zona Franca 3	7.25	0.47	1.06
22	Zona Franca 4	4.71	0.29	0.34
23	Zona Franca 5	2.20	0.30	0.83
24	Zona Franca 6	4.61	0.29	0.06
25	Unión Fucha	<0.08		0.08
26	Fucha aguas abajo	7.14	0.30	0.78
27	Indumil	4.30	0.40	0.34
28	Gibraltar	16.10	0.74	0.08
29	La Isla	<0.40		0.40
30	Las Huertas	<0.40		0.40

Discusión de resultados

Las mayores concentraciones de actividad de ^{131}I se encontraron en el punto conocido como Puente de Guadua, en la localidad de Engativá, y en el punto ubicado en la estación de bombeo de Gibraltar, situado en la localidad de Kennedy, con 16.8 y 16.1 BqL-1, respectivamente, seguido de puntos como La Alameda en Fontibón, con 9.87 BqL-1, y Lisboa en Suba, con 9.66 Bq L-1. Debido a que existen fluctuaciones espaciotemporales, por la descarga de aguas a la cuenca del río Bogotá a lo largo de su recorrido, dentro de las que se encuentran descargas hospitalarias y afluentes, no es posible establecer una correlación entre la actividad encontrada en los puntos de muestreo. También es importante considerar que no fue posible tomar todas las muestras en un mismo día.

Como se describe en la tabla 5, la concentración de actividad más alta se detectó en el punto de muestreo número 6 (Puente de Guadua), ubicado a 1.17 km aguas abajo de la descarga de la PTAR El Salitre, la cual realiza tratamiento a los aportes provenientes de las cuencas Torca y Salitre (Rincón, 2005), indicando que las aguas de las mismas presentan una alta concentración de ^{131}I .

En Colombia se realizó un estudio similar en el río Medellín, en donde se detectó presencia de ^{131}I en tres de los seis puntos muestreados, con valores de concentración

de actividad que oscilan entre 4.14 y 6.27 BqL-1 (Navia, 2015). Los resultados obtenidos en los dos estudios se encuentran en el mismo orden de magnitud, debido a que son escenarios similares en donde un río recibe las aguas servidas de una ciudad que cuenta con varias instalaciones en las que se emplea ^{131}I .

Las concentraciones de ^{131}I obtenidas en los dos estudios son inferiores al nivel de dispensa para vertidos en forma líquida a alcantarillas, ríos y otras grandes masas de agua establecido en la normativa nacional, correspondiente a 19 BqL-1 por mes (Ministerio de Minas y Energía, 2010); sin embargo, en el caso de Bogotá algunas concentraciones superan el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud para agua de consumo, definido en 10 BqL-1 (World Health Organization, 2017). De acuerdo a estudios realizados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, el agua del río Bogotá es empleada en el distrito de riego La Ramada, lo que implica su uso en actividades de riego de cultivo de pastos y forraje para consumo animal, cultivo de fibras celulósicas y derivados, y cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales. La captación del recurso hídrico se realiza a la altura de la desembocadura del río Chicú (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2010; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Adicionalmente, es importante considerar que no existe un control a lo largo de toda la cuenca media del río Bogotá que impida el acceso al recurso hídrico para consumo humano o animal.

La práctica de medicina nuclear es la única que emplea ^{131}I en la ciudad, por lo que la presencia de este material radiactivo en el río Bogotá solo se puede atribuir al sector médico, ya que, tras la administración de este radionúclido en los pacientes, se generan descargas continentales del material radiactivo al sistema de alcantarillado de la ciudad.

Con base en la presente investigación, se puede establecer que en el momento de la realización de la misma las concentraciones de ^{131}I en el río Bogotá se encuentran por debajo del límite normativo, a pesar de obtener concentraciones muy cercanas a este en algunos de los puntos muestreados. Es necesario en tal sentido realizar un número mayor de estudios, para evaluar la contribución de los diferentes actores a las concentraciones de actividad encontradas de este radionúclido en los cuerpos hídricos del país. La importancia de esta actividad aumenta, considerando que el ^{131}I puede concentrarse en gran medida en la cadena alimentaria humana cuando está presente

en el medioambiente (Committee on Thyroid Screening Screening Related to I-131, 1999).

Es importante considerar que las condiciones climáticas pudieron afectar la presencia del radionúclido en el río Bogotá, toda vez que la pluviosidad influye en la concentración del mismo por efecto de dilución. Sin embargo, los posibles cambios en el caudal del río Bogotá durante el estudio no alteraron el orden de magnitud de las concentraciones de ^{131}I medidas.

■ Conclusiones

Se determinó la presencia de ^{131}I en el río Bogotá con valores por encima de la actividad mínima detectable por los equipos empleados en diecisiete de los treinta puntos monitoreados. Es importante tener en cuenta que los valores máximos medidos se encuentran alrededor de 16BqL^{-1} y que el nivel de dispensa de las instalaciones usuarias para vertidos en forma líquida a alcantarillas, ríos y otras grandes masas de agua, establecido en las Resoluciones 180005 de 2010 y 41178 de 2016, corresponde a 19BqL^{-1} , cifra muy cercana al valor límite de descarga, a pesar de la dilución de los vertidos hasta su entrega en el río Bogotá.

Los puntos de muestreo denominados Puente de Guadua y Gibraltar presentaron niveles de concentración de ^{131}I superiores al valor de referencia para agua de consumo correspondiente a 10BqL^{-1} , establecidos por la Organización Mundial de la Salud, teniendo en cuenta que esta agua es empleada para riego en el distrito de La Ramada, lo que puede conllevar a un riesgo radiológico, afectando a los consumidores de estos productos agrícolas.

Finalmente, la presencia de ^{131}I se puede atribuir a la actividad del sector médico, como consecuencia del transporte del radioisótopo desde las instalaciones donde se aplica o desde las casas de los pacientes ambulatorios, pasando por las redes de alcantarillado, a la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad y finalmente al río.

■ Recomendaciones

Teniendo en cuenta las herramientas cartográficas que compilan las capas de las redes hidrosanitarias de Bogotá, se requiere realizar un análisis para efectos de correlacionar las descargas de los establecimientos que ejecutan la práctica de medicina nuclear, las descargas debidas a pacientes ambulatorios y los puntos de muestreo en el río Bogotá.

Es importante realizar seguimientos a pacientes, luego de recibir la administración del radionúclido y haber sido dados de alta en procesos ambulatorios y de hospitalización, a fin de conocer la actividad presente en sus excretas, y su posible relación con la presencia de ^{131}I en los ríos de incidencia determinados por medio de vertimientos domiciliarios.

Por último, se debe caracterizar la presencia de ^{131}I en los ríos que realizan sus descargas en el río Bogotá (como lo son el Salitre, el Fucha, el Tunjuelo y el Torca), así como en la PTAR, para estudiar las zonas con presencia de ^{131}I en sus caudales.

■ Agradecimientos

La presente investigación se realizó con el apoyo y la colaboración logística y operacional de la Dirección de Investigación Criminal e Interpol (DIJIN), quienes participaron en las jornadas de muestreo a modo de acompañantes, garantizando condiciones de seguridad física.

Por su parte, la Unidad de Operaciones Especiales en Emergencias y Desastres de la Policía Nacional (PONAL-SAR) aportó en la investigación la logística necesaria para la toma de las muestras mediante el empleo de un bote y el acompañamiento de sus técnicos.

Se extienden los agradecimientos a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, por la autorización brindada para el acceso a los predios administrados por ella, con el propósito de realizar la toma de muestras en los puntos de interés del río; al ingeniero Carlos Andrés Ávila Prada, por su apoyo en la elaboración de la representación gráfica para la ubicación de los puntos de muestreo a lo largo de la cuenca media del río Bogotá; y a los evaluadores de la revista *Logos Ciencia y Tecnología* de la Policía Nacional, por sus valiosos aportes que ayudaron a complementar este artículo.

■ Referencias

- American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *D4785-20, Standard test method for low-level analysis*

- of iodine radioisotopes in water. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4785-20>
- CAR. (2010). *Carta Ambiental. Distritos de riego CAR. Equilibrio entre productividad y ambiente*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Gascó, C., Martínez, M., & Heras, M. (2009). *Métodos para la Resolución del Problema de la Detección de Radiactividad en Muestras Ambientales*. CIEMAT.
- Committee on Thyroid Screening Screening Related to ^{131}I . (1999). *Exposure of the American people to iodine-131 from Nevada Nuclear-Bomb test*. National Academy of Sciences.
- CSN. (2009). *Procedimiento para el muestreo, recepción y conservación de muestras de agua para la determinación de la radiactividad ambiental*. Consejo de Seguridad Nuclear.
- DPAE. (2006). *Informe sobre la emergencia ocurrida en el río Bogotá y el sistema hídrico adyacente en mayo de 2006*. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias.
- EAAB. (s.f.). *Niveles río Bogotá EAB*. <https://eab-sigue.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7cd2224ceec4bc4b92a2303590326bc>
- Gonzalo Uribarri, F. B. (2011). *Espectroscopía de rayos gamma: Caracterización del Centellador NaI (TI) de Harshaw*. http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/G3nuclear.pdf
- ICONTEC. (2004). *Calidad del agua: Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- IDEAM. (2007). *Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución número 1207 de 25 de julio.
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). Resolución 180005 de 5 de enero.
- Navia, A. (2015). Concentración de actividad de ^{131}I en el río Medellín [Ponencia]. *X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica*. Buenos Aires, 12 al 17 de abril.
- Ortiz, J. (2004). Radioactivity study in a sewage treatment plant (STP). Radiological impact evaluation. https://www.researchgate.net/publication/228476658_Radioactivity_study_in_a_sewage_treatment_plant_STP_Radiological_impact_evaluation
- Ospina, L. (2018). *Propuesta para la determinación del radio de incidencia del ^{131}I a través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá* [Tesis de grado]. Fundación Universidad de América. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6727>
- Rahman, R. O.-t. (2011). Liquid Radioactive Wastes Treatment. *Water*, 3(2), 551-565. <https://doi.org/10.3390/w3020551>
- Ren, J., T., M., Zhang, W., & Yang, S. (2008). Effect of ingredients in waste water on property of ion exchange resin for uranium-contained waste water treatment. *Atomic Energy Science and Technology*, 42(1), 38-42.
- Rincón, N. (2005). *Análisis del esquema de integración de la PTAR Salitre al alcantarillado y al río Bogotá* [Tesis de grado]. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/1992/21823>
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Sistema de Información de la Autoridad Reguladora – Xue v1.0*. <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/Asuntos-Nucleares/Paginas/Sistema-de-Informacion-de-la-Autoridad-Reguladora-%E2%80%93Xue-v1-0.aspx>
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality*. WHO.