

PROPUESTA DE UN PLAN DE MUESTREO Y DETECCIÓN DE RADIOISÓTOPOS
PARA EL ESTABLECIMIENTO DE ZONAS CON ACTIVIDAD DE ¹³¹I EN LA RED
DE SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE AGUAS SANITARIAS CON DESCARGAS
A LA CUENCA SALITRE EN BOGOTÁ.

SEBASTIAN MATEUS CASTILLO
DANIELA FERNANDA RODRIGUEZ VALENCIA

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
JACKSON FERNANDO MOSOS PATIÑO
Ingeniero Químico

Codirector
JUAN CAMILO CELY GARZÓN
Ingeniero Químico

Asesor
DAVID LEONARDO SOTELO TOBON
Químico

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado 1: Oscar Lombana

Jurado 2: Claudio Moreno

Bogotá D.C., Agosto 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de Facultad

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Directora de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a nuestras familias por apoyarnos durante todo el proceso de formación académica que nos permitió adquirir los conocimientos y forjar el ímpetu para culminar este proyecto superando todas sus etapas y sus retos de la mejor manera posible.

Extendemos este agradecimiento al Servicio Geológico Colombiano y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá por brindar su apoyo logístico y operativo para la realización del proyecto, siempre con la mejor disposición en aras de impulsar el campo de la investigación.

Al Ingeniero Jackson Fernando Mosos por guiarnos en este camino y permitirnos internar en este campo de investigación, siempre con la mejor disposición al compartir su amplio conocimiento con nosotros.

Al ingeniero Juan Camilo Cely por presentarnos esta línea de investigación aportando al desarrollo y evolución de la ingeniería química con sus posibles nuevos horizontes; así mismo, por establecer contacto, vincularnos con el proyecto, acompañarnos y apoyarnos durante toda la investigación obteniendo un proyecto diferencial y de calidad.

A las Ingenieras Evelin Tatiana Mora y Ana Milena Velásquez del SGC por sus esfuerzos al compartir su conocimiento con nosotros y acompañarnos en la mayor parte del proceso, por la disposición y la ayuda en cada etapa mediante consejos con base en su expertise exhibiendo lo mejor de nosotros como ingenieros para la recolección y análisis de la información.

Por otro lado, un agradecimiento especial al Ingeniero Jorge Flórez de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá por su apoyo en la etapa más difícil del proyecto al posibilitar el trabajo de campo con el acompañamiento de la empresa. De igual forma, a los colaboradores de la EAAB involucrados en la campaña de muestreo que con muy buena disposición apoyaron el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas por el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
OBJETIVOS	16
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1. Yodo	19
1.2. Radiación	21
1.2.1. <i>Tipos de radiación</i>	21
1.2.2. <i>Unidades de la radiación</i>	23
1.3. Radioisótopos	23
1.3.1. <i>Radioisótopo ¹³¹I</i>	24
1.3.2. <i>Vida media del ¹³¹I</i>	28
1.4. Radio de Incidencia	28
1.5. Espectrometría Gamma	30
1.5.1 <i>Técnica</i>	30
1.6. Manejo De Los Desechos Radiactivos	32
1.7. Sistema De Alcantarillado	34
1.7.1. <i>Alcantarillado pluvial</i>	35
1.7.2. <i>Alcantarillado sanitario</i>	35
1.8. PTAR Salitre	37
1.9. Usos del Agua Saneada	38
1.10. Normatividad Legal	39
2. METODOLOGÍA DE LA PROPUESTA DE MUESTREO	42
2.1. Consideraciones del Muestreo	42
2.1.1. <i>Ubicación de las instalaciones</i>	43
2.1.2. <i>Criterios para la selección de los puntos de muestreo</i>	45
2.1.3 <i>Factores que influyen en la determinación de la actividad</i>	47
2.1.4. <i>Tipo de muestras</i>	48
2.1.5. <i>Plan de muestreo</i>	50
2.2. Equipos e insumos de muestreo [58]	50
2.3. Procedimiento de muestreo	51
2.3.1. <i>Determinación del caudal de agua en tránsito por la tubería</i>	55

3.	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS POR ESPECTROMETRÍA GAMMA	56
3.1.	Adecuación de las Muestras	56
3.2.	Calibración de los Equipos	58
3.2.1.	<i>Preparación solución referencia</i>	60
3.3.	Desarrollo de la Técnica	61
4.	ZONAS CON ACTIVIDAD DETECTABLE DE ¹³¹ I	63
4.1.	Cálculos y Resultados	63
4.1.1.	<i>Medición de caudal</i>	63
4.1.2.	<i>Calibración del equipo</i>	66
4.1.3.	<i>Actividad de ¹³¹I en las muestras</i>	68
4.2.	Análisis	72
4.2.1.	<i>Efecto de las precipitaciones</i>	73
4.2.2.	<i>Estimación poblacional de los puntos de muestreo zonales por UPZ</i>	75
4.2.3.	<i>Influencia de los pozos zonales.</i>	77
4.3.	Establecimiento de Zonas con Actividad	79
4.3.1.	<i>Categorización de las zonas</i>	79
4.3.2.	<i>Demarcación de las zonas</i>	82
5.	COSTOS ASOCIADOS AL MONITOREO	88
5.1.	Definición del Plan de Monitoreo	90
5.1.1.	<i>Prueba de identificación</i>	91
5.1.2.	<i>Transporte</i>	91
5.1.3.	<i>Personal requerido</i>	92
5.1.4.	<i>Insumos</i>	92
5.1.5.	<i>Convenios</i>	93
5.2.	Costo por Día de Campaña	93
5.3.	Costos Anuales Totales	93
	CONCLUSIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA	96
	ANEXOS	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Penetración en materiales de diferentes tipos de radiaciones</i>	22
Figura 2. <i>Absorción del ^{131}I en el cuerpo humano</i>	26
Figura 3. <i>Fotones gamma característicos del ^{131}I</i>	27
Figura 4. <i>Decaimiento del ^{131}I</i>	28
Figura 5. <i>Incidencia del ^{131}I en la cuenca media del río Bogotá</i>	29
Figura 6. <i>Estructura general de un espectrómetro gamma</i>	31
Figura 7. <i>Gestión de desechos radiactivos</i>	34
Figura 8. <i>Usos del agua del río Bogotá para la alimentación de vacunos</i>	38
Figura 9. <i>Ruta hídrica y ubicación hospitales autorizados a inspeccionar</i>	44
Figura 10. <i>Gráfico de isopletas para Bogotá</i>	48
Figura 11. <i>Diagrama de flujo del procedimiento de muestreo</i>	51
Figura 12. <i>Señalización del área</i>	53
Figura 13. <i>Recolección de muestras</i>	54
Figura 14. <i>Rotulado de las muestras</i>	54
Figura 15. <i>Medición de profundidad en el pozo de alcantarillado</i>	55
Figura 16. <i>Montaje de filtración</i>	56
Figura 17. <i>Muestra acidificada</i>	57
Figura 18. <i>Estabilidad del espectrómetro portátil GL 0515</i>	58
Figura 19. <i>Fuente puntual ^{131}I en el espectrómetro portátil GL 0515.</i>	59
Figura 20. <i>Peso balón 2 aforado.</i>	60
Figura 21. <i>Espectro gamma en detector de Ge-Hp para la fuente puntual de ^{131}I</i>	62
Figura 22. <i>Corte transversal de un cilindro</i>	64
Figura 23. <i>Muestras con actividad entre 1 y 5.1 Bq/L</i>	79
Figura 24. <i>Muestras con actividad entre 1,9 y 56 Bq/L.</i>	80
Figura 25. <i>Muestras con actividad entre 48 y 1100 Bq/L.</i>	81
Figura 26. <i>Distribución de la actividad de ^{131}I entre los pozos</i>	82
Figura 27. <i>Conexiones de red sanitaria de alcantarillado parte 1</i>	85
Figura 28. <i>Conexiones de red sanitaria de alcantarillado parte 2</i>	86
Figura 29. <i>Zonas con clasificación riesgo bajo</i>	89
Figura 30. <i>Zonas con clasificación riesgo moderado</i>	89
Figura 31. <i>Zonas con clasificación riesgo elevado</i>	90

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Dosis recomendadas de ingesta de yodo estable</i>	20
Tabla 2. <i>Radioisótopos del yodo</i>	25
Tabla 3. <i>Fotones gamma característicos del ¹³¹I</i>	27
Tabla 4. <i>Clasificación y opciones de gestión de los desechos radiactivos</i>	33
Tabla 5. <i>Valores permitidos de ¹³¹I según la U.S. NRC</i>	39
Tabla 6. <i>Vertido en forma líquida en alcantarillas, ríos y grandes masas de agua.</i>	40
Tabla 7. <i>Ubicación técnica de los puntos de muestreo</i>	46
Tabla 8. <i>Históricos de precipitación promedio mensual en Bogotá</i>	47
Tabla 9. <i>Caudal de agua en los pozos de inspección</i>	65
Tabla 10. <i>Valores obtenidos técnica gravimétrica.</i>	66
Tabla 11. <i>Actividad procesada con evaluación en software Hypelab</i>	69
Tabla 12. <i>FWHM de los espectros</i>	71
Tabla 13. <i>Precipitaciones diarias en cada punto de muestreo.</i>	73
Tabla 14. <i>Estimación poblacional de pozos zonales</i>	77
Tabla 15. <i>Categorización de los pozos según los resultados</i>	81
Tabla 16. <i>Actividad media que afecta a la población en cada pozo</i>	83
Tabla 17. <i>Costo insumos consumibles por muestra analizada</i>	92
Tabla 18. <i>Costo por día de campaña</i>	93
Tabla 19. <i>Costo anual de monitoreo</i>	94

LISTA DE ABREVIATURAS

A: actividad

Bq: becquerel

Ch: canales

Cant: cantidad

Ci: curie

COP: pesos colombianos

ρ : densidad

d: días

G3: geometría específica #3

g: gramos

h: horas

HCl: ácido Clorhídrico

J: joule

kBq: kilo Becquerel

keV: kilo Electronvoltio

kg: kilogramo

km: kilometro

L: litros

MeV: mega electronvoltio

m: metros

m²: metros cuadrados

m³: metros cúbicos

ml: mililitros

min: minutos

M: molar

mol: moles

μg : microcurio

μg : microgramo

μm : micrómetro

μs : microsegundos

***mbar*:** milibar

***mm*:** milímetro

***nm*:** nanómetro

Ref.: referencia

Sv: sievert

Und: unidades

UV: ultravioleta

Y: years

¹³¹I: Yodo – 131

¹³¹Xe: Xenón – 131

LISTA DE SIGLAS

CSN: Consejo de Seguridad Nuclear

EAAB-ESP: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

FWHM: Full Width at Half Maximum

Ge-HP: Germanio Hiperpuro

IQ: Ingeniero Químico

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

ISO: International Organization for Standardization

LRA: laboratorio de Radiometría Ambiental

NTC: Norma Técnica Colombiana

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

ROI: Region of Interest

SGC: Servicio Geológico Colombiano

TRM: Tasa de cambio Representativa de Mercado

UPZ: Unidad de Planeamiento Zonal

GLOSARIO

Actividad: número de núcleos que desaparecen por unidad de tiempo y representa la velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva [1].

Alcantarillado combinado: es el sistema que capta y conduce simultáneamente el 100% de las aguas de los sistemas pluvial y sanitario [2].

Becquerel: es la unidad de radiactividad del Sistema Internacional, equivalente a una desintegración por segundo [3].

Decaimiento: consiste en la desintegración de núcleos atómicos inestables que se descomponen en otro más estable que él [4].

Electronvoltio: energía cinética que adquiere un electrón al atravesar en el vacío una diferencia de potencial de un voltio [5].

Espectro: distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica como la longitud de onda, la energía o la temperatura [6].

Fotopico: es el pico más pronunciado del espectro y corresponde al fotón emitido en la desintegración nuclear de la fuente [7].

Límite de detección: cantidad o concentración mínima de sustancia que puede ser detectada con fiabilidad por un método analítico determinado [8].

Nivel de dispensa: conjunto de valores determinados por la autoridad reguladora, los cuales son expresados en concentraciones de actividad y/o actividades totales, por debajo de los cuales los materiales son liberados de control [9].

Pozo de inspección: son cámaras verticales que permiten el acceso a las alcantarillas y colectores [10].

Radiactividad: propiedad de ciertos cuerpos cuyos átomos, al desintegrarse espontáneamente, emiten radiaciones, y cuya unidad de medida en el sistema internacional es el becquerel [11].

Radio de incidencia: medida de la propagación de un fenómeno en un espacio determinado, que ayude a una mejor visualización de los efectos producidos [12].

Red de alcantarillado: consiste en una serie de tuberías y obras complementarias, para recibir y evacuar las aguas residuales de la población y la escorrentía superficial producida por lluvia [10].

Vida media: cantidad de tiempo que le toma a un isótopo dado perder la mitad de su radiactividad [13].

RESUMEN

Este trabajo se centra en la determinación de zonas con actividad de ^{131}I en Bogotá debido a resultados de anteriores investigaciones con actividad del mismo cercana y por encima del límite permitido (19 Bq/L en el caso del ^{131}I) a la salida y dentro de la PTAR Salitre respectivamente. Se desarrolla mediante la construcción de una metodología de muestreo enfocada al alcantarillado sanitario, abarcando instituciones autorizadas que emplean ^{131}I en medicina nuclear y zonas residenciales sin influencia de estas en 13 puntos de la ciudad con triple repetición; la caracterización de las muestras se da por espectrometría gamma con detector de Ge-HP y se analizan los espectros con el software especializado Hyperlab; finalmente, la elaboración de un plan de monitoreo por nivel de riesgo para las zonas según la actividad detectada para ejercer control radiológico.

Se detecta actividad de ^{131}I en 11 puntos de muestreo afectando espacios aledaños a parques, hospitales, centros educativos, zonas residenciales, entre otros de la zona centro, norte, oriental y occidental de Bogotá, con descarga a la PTAR Salitre, por la radiación gamma emitida por este radioisótopo; destacan 3 pozos provenientes de instituciones en los que se registró actividad mayor al límite legal permisible en Colombia para vertimientos al alcantarillado sanitario (19 Bq/L) de modo que el plan de monitoreo propuesto se divide por clasificación de riesgo en base a la actividad detectada para cada pozo generando costos anuales totales por \$ 61,956,959 COP.

Palabras Clave. Actividad, Alcantarillado sanitario, Espectrometría gamma, Muestreo, Radioisótopo, Vertimiento, Zonas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar una propuesta de un plan de muestreo y detección de radioisótopos para el establecimiento de zonas con actividad de ^{131}I en la red de sistema de alcantarillado de aguas sanitarias en Bogotá con descargas a la cuenca Salitre.

Objetivos Específicos

- Estructurar una metodología de muestreo que permita la medición de la actividad del radioisótopo ^{131}I en el alcantarillado sanitario.
- Caracterizar los puntos con actividad de ^{131}I en el sistema de alcantarillado que descargan a la cuenca Salitre.
- Calcular los costos del monitoreo en zonas con actividad de ^{131}I .

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la medicina nuclear emplea dosis de radiación para el tratamiento de diversas enfermedades, específicamente, el radioisótopo ^{131}I es utilizado para el tratamiento del cáncer de tiroides. El uso de estas radiaciones ionizantes genera desechos radiactivos dados principalmente por la absorción parcial de las mismas en el cuerpo, estos desechos son excretados por la orina y posteriormente vertidos a los sistemas de alcantarillado sanitario [14].

Las aguas saneadas de la cuenca media del río son implementadas en sistemas de riego y de alimentación de vacunos lo cual genera exposición de la población a este tipo de sustancias, la sobreexposición al ^{131}I puede llegar a tener importantes afectaciones en la salud a mediano y largo plazo según la Organización Mundial de la Salud [15]. En la ciudad de Bogotá existen aproximadamente 28 instituciones que emplean tratamientos con ^{131}I de carácter hospitalario y ambulatorio de las cuales, 13 tienen vertimientos a la cuenca Salitre y las demás a las cuencas Torca y Fucha [16].

Siendo así, estos desechos deben ser controlados tanto por las instituciones autorizadas, en la medida de la responsabilidad adquirida para emplear este tipo de material radiactivo, como por los entes reguladores bajo sistemas de monitorización, lo cual no está siendo efectivo con base en investigaciones anteriores donde se han detectado niveles cercanos y superiores al límite legal establecido en 19 Bq/L [17].

En este trabajo se presenta la teoría empleada para el desarrollo del proyecto considerando temas importantes como precipitaciones, el sistema de alcantarillado de Bogotá, la normatividad legal, entre otros. Posteriormente se propone y emplea una metodología de muestreo para la detección de ^{131}I enfocada al sistema de alcantarillado sanitario considerando criterios para la selección de los puntos de muestreo, los factores que influyen en la determinación de la actividad, procedimiento de muestreo, entre otros. Se desarrolla la caracterización de actividad de ^{131}I en las muestras recolectadas considerando los factores en torno a la medición como la adecuación de las muestras y la calibración del equipo siguiendo las NTC ISO 5667.

Seguidamente se presentan los cálculos de medición de caudal, los resultados obtenidos por el software empleado y las zonas con actividad de ^{131}I en la red de alcantarillado.

Finalmente, el trabajo realizado presenta el costo diario de la campaña y el costo total de un plan de monitoreo anual propuesto que permita efectuar control radiológico según la clasificación de riesgo asignada en base en los resultados obtenidos.

1. MARCO TEÓRICO

Actualmente la medicina nuclear emplea el radioisótopo ^{131}I para el tratamiento del cáncer de tiroides en centros hospitalarios. Dado que este es eliminado del cuerpo por procesos fisiológicos, es vertido a las aguas sanitarias que son canales dispuestos por toda la ciudad de Bogotá y que dirigen gran parte del agua recolectada a la planta de tratamiento de aguas residuales.

Este radioisótopo emite radiación contaminante la cual ha sido rastreada hasta la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) saliente de la ciudad de Bogotá con valores cercanos a los niveles de despesa máximos permitidos del mismo [16], el agua tratada en esta PTAR se utiliza posteriormente en sistemas de riego de cultivos o actividades ganaderas alrededor de la ciudad y en zonas aledañas. Una sobreexposición de este radioisótopo en el cuerpo humano por encima de los límites permitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) puede llegar a provocar importantes afectaciones a la salud [15].

1.1. Yodo

Es un elemento no metálico sólido, color gris o morado, número atómico 53, símbolo I y masa atómica 126.9 g/mol. Existe como molécula biatómica en fases sólida, líquida y vapor. Presenta fuerzas intermoleculares de tipo Van der Waals, se caracteriza por ser el halógeno más electropositivo y menos reactivo, este se sublima fácilmente al calentarse generando un vapor morado, por último, es capaz de disolverse en solventes como tetracloruro de carbono y tiene poca solubilidad en agua [18].

En su forma natural se puede hallar en la tierra, sedimentos, agua de mar e incluso algunos alimentos. Existen dos modos en los cuales se puede encontrar, los cuales son el modo radiactivo (el cual en su mayoría proviene del sector manufacturero) y no radiactivo. Su forma radiactiva proviene principalmente de medicina nuclear y en menor proporción de la operación de plantas nucleares que pueden proporcionar pequeñas cantidades al aire y agua, la principal fuente de exposición a este tipo de yodo son los tratamientos relacionados a las enfermedades de tiroides [19].

Es un mineral esencial en el cuerpo en pequeñas cantidades (20 a 30 mg) para la producción de hormonas tiroideas T3 y T4, por medio de la absorción de este en el intestino delgado y posterior almacenamiento en la glándula tiroidea, las cuales son las encargadas principalmente del control de la actividad metabólica en los adultos además del desarrollo mental y óseo tanto en la etapa prenatal como en el crecimiento de los niños [20].

Tabla 1.

Dosis recomendadas de ingesta de yodo estable

Etapas de la Vida	Cantidad Recomendada
Bebés hasta los 6 meses de edad	110 µg
Bebés de 7 a 12 meses de edad	130 µg
Niños de 1 a 8 años de edad	90 µg
Niños de 9 a 13 años de edad	120 µg
Adolescentes de 14 a 18 años de edad	150 µg
Adultos	150 µg
Mujeres y adolescentes embarazadas	220 µg
Mujeres y adolescentes en periodo de lactancia	290 µg

Nota. Se muestran los valores de ingesta recomendada de yodo según la etapa de vida de cada persona. Tomado de: National Institute of Health Office of Dietary Supplements, “yodo”. NIH, [En línea] <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Iodine-DatosEnEspañol/> [Acceso: Oct. 20, 2020]

La principal fuente de ingesta de este mineral se encuentra en los alimentos de proveniencia marina, lácteos e incluso el agua potable puede ser portadora de este, las cantidades que presenta cada uno de estos alimentos depende directamente de las zonas de crecimiento de los mismos [21].

El yodo puede generar problemas a la salud por exceso y por una deficiencia del mismo. La deficiencia de este mineral en el cuerpo puede llegar a provocar un crecimiento de la glándula tiroidea (bocio endémico) lo que se verá reflejado en mayor medida en niños causando retrasos de crecimiento, discapacidades y reducción en el coeficiente intelectual, en el caso de adultos puede provocar problemas de concentración. Por otro lado, el exceso del mismo puede desencadenar el cáncer de tiroides tal que, la dosis máxima recomendada para adultos es inferior a 1,100 µg [22].

1.2. Radiación

De acuerdo con el consejo de seguridad nuclear de España (CSN) “la radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas” Un claro ejemplo es el Sol que mediante la transferencia de calor por radiación proporciona el calor requerido al planeta .

1.2.1. Tipos de radiación

La radiación se puede clasificar según su naturaleza (Electromagnéticas o Corpusculares) y/o por su efecto biológico, es decir en radiaciones ionizantes (de alta energía) o radiaciones no ionizantes (de baja energía) [24].

Se entiende por radiación ionizante como la capacidad de la onda o partícula que transporta energía suficiente para ionizar el medio por el que pasa y expulsar electrones ligados a los átomos presentes en el mismo. Si bien este tipo de radiación se puede considerar perjudicial o dañina en muchos sentidos, está presente en todo nuestro entorno y también es capaz de brindar soluciones para aplicaciones beneficiosas como es el caso de los rayos X para el diagnóstico de pacientes en el campo de la medicina, material radiactivo en operaciones de registro de pozos petrolíferos y los radiofármacos para el tratamiento de cáncer e hipotiroidismo [25]. Entre la radiación ionizante se destaca:

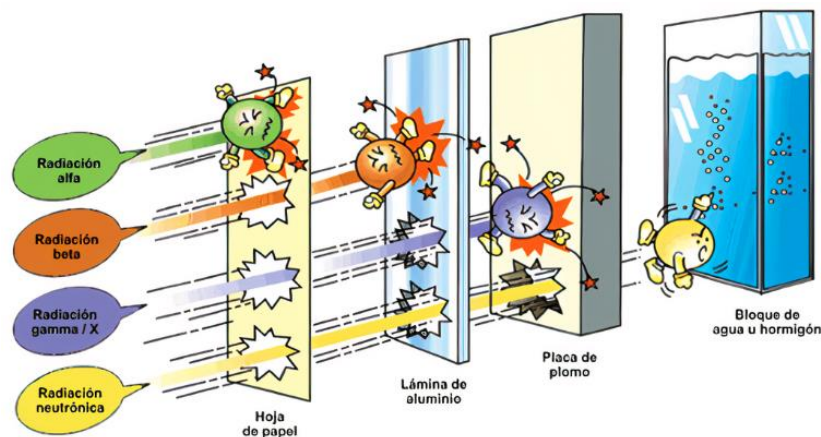
- *Radiación Alfa*: consiste en núcleos de Helio (He) ionizados que se caracterizan por tener un bajo poder de penetración lo que hace que no puedan recorrer grandes distancias en el ambiente, pero con gran capacidad para ionizar la superficie que choca [26].
- *Radiación Beta*: “La desintegración beta comprende tres procesos nucleares. En uno de ellos se emiten electrones, en otros positrones y en el tercero se produce la captura de un electrón por parte de núcleos alejados de la línea de estabilidad” [16]. Las partículas beta poseen menor masa y por tanto menor energía, pero mayor poder ionizante en comparación con las partículas emitidas por la radiación alfa; es capaz de afectar la piel e irradiar tejidos internos en caso de entrar al cuerpo por ingestión o inhalación [26].

- *Radiación Gamma*: este tipo es un tipo de radiación que no tiene masa al ser un flujo de ondas electromagnéticas con gran poder de penetración debido a que tienen una corta longitud de onda, pero con menor poder de ionización respecto a las anteriores puesto que se da, a menudo, luego de que un átomo emite radiación alfa o beta y el núcleo aún tiene energía en exceso por liberar [24].

La figura 1 ilustra el poder de penetración en diferentes materiales que actúan como barrera ante los diferentes tipos de radiaciones mencionados siendo aquellos con menor poder de penetración los de mayor poder energético.

Figura 1.

Penetración en materiales de diferentes tipos de radiaciones



Nota. La figura 1 presenta y compara de forma ilustrada la capacidad que tienen las radiaciones mencionadas para penetrar diferentes materiales. Tomado de: E. T. Mora C., C. D. Tello R., *Propuesta para la remoción de ¹³¹I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la PTAR Salitre*, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020.

Como ya se mencionó, las radiaciones no ionizantes son de baja energía y por tanto no tienen la suficiente capacidad para ionizar. Entre las radiaciones no ionizantes se encuentran algunas de gran importancia como lo es la radiación ultravioleta (UV), la radiación infrarroja, radiación láser, entre otros [24].

- Radiación ultravioleta (UV): este tipo de radiación se puede clasificar en UV-A la cual tiene la capacidad de penetrar los tejidos y posee longitud de onda que desde los 320 *nm* hasta 380 *nm* en donde comienza la percepción del color violeta en la luz visible; UV-B con longitud de onda entre 280 *nm* y 320 *nm* es empleada para la formación de vitamina D y finalmente, la radiación ultravioleta UV-C posee corta longitud de onda que va desde 200 *nm* hasta 280 *nm* y tiene la capacidad de producir muerte celular al destruir proteínas y ácidos nucleicos por efecto fotoquímico [24].
- Radiación infrarroja (IR): este tipo de radiación hace parte del espectro de radiación que se encuentra entre las microondas y la luz visible. La longitud de onda de la IR está comprendida entre 780 *nm* y 1 *mm* subdividida en 3 grupos: IR-A (780 *nm* hasta 1.4 μm); IR-B (1.4 μm hasta 3 μm); IR-C (3 μm hasta 1 *mm*) [27].

1.2.2. Unidades de la radiación

En el sistema internacional de unidades (S.I.), el Becquerel se clasifica como una unidad de medición derivada que cuantifica la magnitud de la actividad de un radioisótopo, se simboliza con *Bq* y representa la desintegración radiactiva por segundo; encuentra equivalencias con otras unidades de medición como el Curie (Ci) la cual es una antigua unidad de radiactividad que no hace parte del S.I. y fue reemplazada por el *Bq* ($3.7 \text{ E}+10 \text{ Bq} = 1 \text{ Ci}$); por otro lado, el Sievert (Sv) es la unidad de la dosis equivalente y de la dosis efectiva en el S.I.: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ [16].

1.3. Radioisótopos

Los radioisótopos son elementos los cuales en su núcleo atómico tiene igual número de protones, pero diferente número de neutrones y además de esto emiten radiación. Estos son clasificados principalmente por el tipo de radiación que emiten y el tiempo en el cual permanecen emitiendo esta radiación. Existen en la naturaleza ya que provienen de la corteza terrestre y además se pueden obtener de manera artificial por medio de reactores nucleares. Algunos de ellos son utilizados en medicina nuclear donde cumplen funciones de diagnóstico y tratamiento ya que la radiación les concede un carácter medible y rastreable [28].

Dentro de sus aplicaciones se pueden encontrar como “trazadores, tratamientos médicos, estudios del agua, industria (alimentos y elaboración de pólvora), agricultura, fechación y armamento nuclear, estas aplicaciones deben ser controladas ya que tienen usos negativos como el caso de las bombas nucleares y en dosis inadecuadas pueden ocasionar daños a la salud de organismos” [29].

Para sus usos industriales se utilizan principalmente radioisótopos de carácter artificial ya que tienen periodos de semidesintegración (tiempo de decaimiento de la actividad a la mitad del valor original) más cortos. Los radioisótopos utilizados en medicina nuclear se clasifican de acuerdo al tipo de radiación que emiten, aquellos que emiten radiación alfa o beta se utilizan en el tratamiento de enfermedades (tiroides) e incluso de algunos cánceres (próstata, mama etc.) y por otro lado los que emiten radiación gamma se utilizan para la toma de imágenes diagnósticas. Estos son utilizados principalmente debido a dos factores [30]:

- La respuesta producida en el cuerpo humano a los mismos, generando mayores absorciones y mayor selectividad para que lleguen al órgano deseado.
- Reducen las técnicas quirúrgicas riesgosas utilizadas anteriormente, sin conllevar riesgos tanto para los pacientes como para el personal alrededor de ellos, esto siempre que se mantengan las dosis recomendadas y los cuidados post tratamiento [30].

En el caso del yodo radiactivo, la mayoría de sus radioisótopos se transforman en elementos no radiactivos en un periodo comprendido desde segundos hasta días con la excepción de la forma ^{129}I la cual toma años en decaer hasta su forma estable como se observa en la tabla 2.

1.3.1. Radioisótopo ^{131}I

Cuenta con 53 protones y 78 neutrones, fue descubierto por Glenn Seaborg y John Livingood en 1938. Es uno de los radioisótopos radiactivos en los que el yodo elemental se puede transformar y es ampliamente utilizado en la medicina nuclear al igual que los radioisótopos ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I , ^{129}I presentados en la tabla 2 [16].

Tabla 2.*Radioisótopos del yodo*

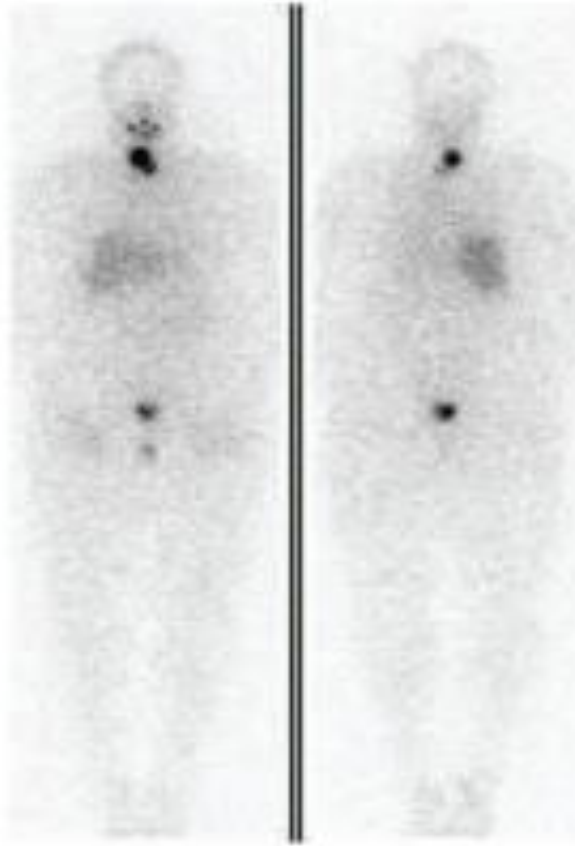
Nombre del Núclido	Vida Media	Nombre del Núclido	Vida Media
¹⁰⁸ I	0.036 s	¹²⁷ I	Estable
¹⁰⁹ I	92.8 μs	¹²⁸ I	24.99 min
¹¹⁰ I	0.664 s	¹²⁹ I	1.57x10 ⁷ Y
¹¹¹ I	2.5 s	¹³⁰ I	12.36 h
¹¹² I	3.34 s	¹³¹ I	8.0252 d
¹¹³ I	6.6 s	¹³² I	2.295 h
¹¹⁴ I	2.1 s	¹³³ I	20.83 h
¹¹⁵ I	1.3 min	¹³⁴ I	52.5 min
¹¹⁶ I	2.91 s	¹³⁵ I	6.58 h
¹¹⁷ I	2.22 min	¹³⁶ I	83.4 s
¹¹⁸ I	13.7 min	¹³⁷ I	24.5 s
¹¹⁹ I	19.1 min	¹³⁸ I	6.26 s
¹²⁰ I	81.6 min	¹³⁹ I	2.28 s
¹²¹ I	2.12 h	¹⁴⁰ I	0.86 s
¹²² I	3.63 min	¹⁴¹ I	0.43 s
¹²³ I	13.22 h	¹⁴² I	0.222 s
¹²⁴ I	4.176 d	¹⁴³ I	0.130 s
¹²⁵ I	59.407 d	¹⁴⁴ I	0.300 μs
¹²⁶ I	12.93 d	¹⁴⁵ I	0.407 μs

Nota. Esta tabla muestra los diferentes radioisótopos del yodo y su vida media. Entre ellos se destaca el ¹²⁷I al ser el único estable. Tomado de: E. T. Mora C., C. D. Tello R., *Propuesta para la remoción de ¹³¹I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la PTAR Salitre*, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020.

En cuanto al uso del ^{131}I para el tratamiento de enfermedades, se sabe que el paciente debe ingerir una cápsula con una dosis del radioisótopo que irá rápidamente por medio del torrente sanguíneo hacia la glándula tiroides (principalmente) y consecuentemente, al cáncer tiroideo presente el cual lo absorberá. La cantidad de ^{131}I que no absorba el cuerpo será eliminada pasadas entre 24 horas y 48 horas [31].

Figura 2.

Absorción del ^{131}I en el cuerpo humano



Nota. Imágenes tomadas por una cámara de medicina nuclear que evidencia las áreas oscuras con presencia de ^{131}I . Tomada de: L. C. Alba Martínez., *Medición de límites de descarga para vertimientos generados en medicina nuclear*, tesis pre. Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica, Tunja, Colombia, 2015.

El ^{131}I es un emisor de radiación gamma y en menor proporción de radiación beta, el cual presenta fotónicos de emisión gamma característicos de acuerdo al efecto Compton con diversos niveles de energía como se presenta en la tabla 3 e ilustra en la figura 3, presentando el fotónico con mayor rendimiento gamma (81.2%) a 364 keV.

Tabla 3.

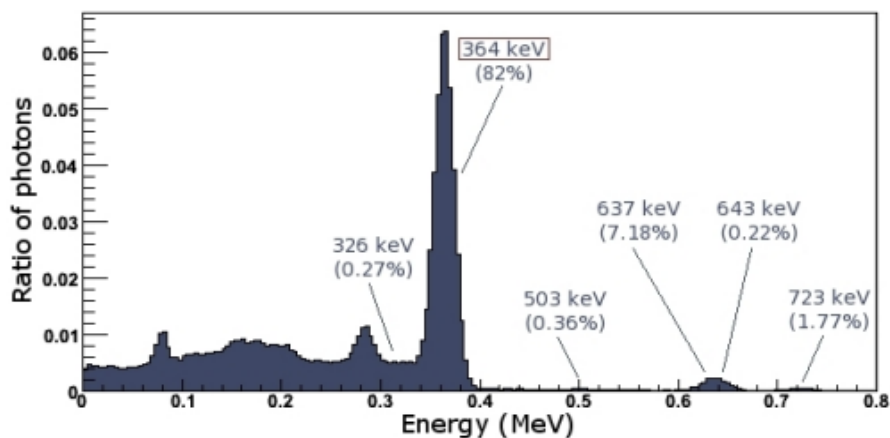
Fotones gamma característicos del ^{131}I

Energía [keV]	Rendimiento Gamma	Energía [keV]	Rendimiento Gamma
80.1850	0.02607	636.989	0.07260
284.305	0.06060	722.911	0.01960
364.489	0.81200	-	-

Nota: la tabla presenta los diferentes niveles de energía en los que se transforman los electrones liberados del ^{131}I por el efecto Compton. Tomado de: F. Mosos, A. Abadía, J. W. Gómez, y P. Casallas, "Montaje para la determinación in situ por espectrometría gamma de descargas líquidas de ^{131}I en servicios de terapia", rev. investig. apl. nucl., n.º 1, pp. 30-37, nov. 2017, Disponible: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/view/19>. [Acceso: marzo 03, 2021].

Figura 3.

Fotones gamma característicos del ^{131}I



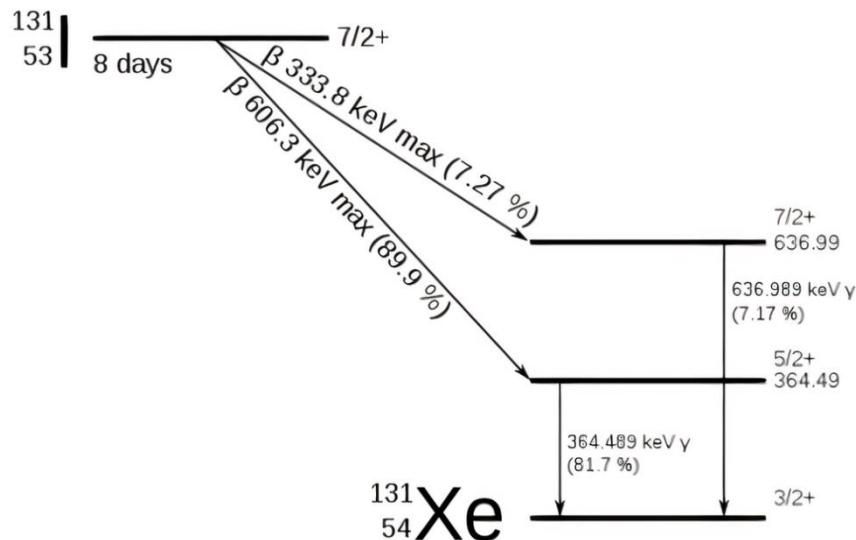
Nota. Espectro de los fotones característicos del ^{131}I con su rendimiento gamma destacando el pico ubicado a 364 keV. Tomado de: E. Rault, S. Vandenberghe, R. Van Holen, J. De Beenhouwer, S. Staelens, y I. Lemahieu, "Comparison of image quality of different iodine isotopes (I-123, I-124, and I-131)", *Cancer Biother. Radiopharm.*, vol. 22, núm. 3, pp. 423–430, 2007.

1.3.2. Vida media del ^{131}I

Como se muestra en la tabla 2 el radioisótopo ^{131}I presenta un tiempo de vida media de 8,02 días, este decae como muestra la figura 4 gracias a la emisión de rayos beta hasta que se convierte en ^{131}Xe [34].

Figura 4.

Decaimiento del ^{131}I



Nota. Esquema de desintegración del radioisótopo ^{131}I con sus respectivas energías de liberación beta hasta ^{131}Xe estable. Tomado de: E. T. Mora C., C. D. Tello R., *Propuesta para la remoción de ^{131}I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la PTAR Salitre*, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020.

1.4. Radio de Incidencia

El radio de incidencia se ha definido como “la distancia, el radio y longitud en donde hay presencia de ^{131}I ” [12], y será determinado según la interacción que se presente con diferentes elementos ambientales principalmente el hídrico y atmosférico, se determina generalmente por medio de modelación de contaminantes [35].

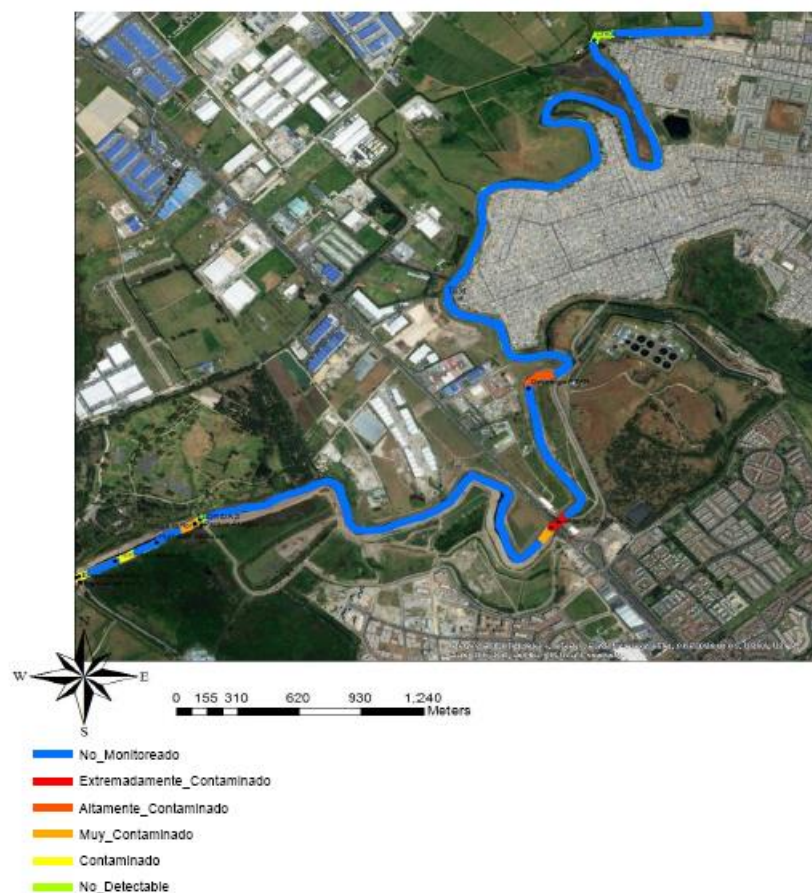
En aguas residuales el radio de incidencia del ^{131}I se encuentra influenciado por los vertimientos de pacientes que son tratados en los centros hospitalarios, pacientes ambulatorios, desechos de equipos radiológicos y las radio farmacias [16], esto afectará el sistema de alcantarillado y consecuentemente al río Bogotá.

Dicho concepto permite determinar niveles de referencia, los cuales demarcan las magnitudes en las cuales se debe tomar alguna acción determinada. En áreas sanitarias e investigativas se clasifican en niveles de registro (constituyen únicamente un informe) y los niveles de investigación (aquellos que requieren la revisión de las causas dado un posible desvío de los niveles seguros) [36].

En las investigaciones generadas anteriormente, se han logrado determinar algunos de estos niveles de referencia denominados como zonas de incidencia como se ilustra en la figura 5, donde se logran determinar niveles de investigación en la descarga de la PTAR salitre con radios de incidencia desde 349,99 m a 511,18 m [12].

Figura 5.

Incidencia del ^{131}I en la cuenca media del río Bogotá



Nota. Zonas con afectación de ^{131}I en la cuenca media del río Bogotá. Tomado de: L. A. Ospina P., *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 pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018.

1.5. Espectrometría Gamma

La espectrometría gamma es un método analítico que consiste en la identificación y cuantificación de los rayos gamma emitidos por los radioisótopos, esta técnica se basa en la respuesta de un detector, lo cual permite establecer la presencia de uno o varios radioisótopos que se encuentran en una misma muestra mediante el espectro de energías; es altamente utilizada debido a que se considera no destructiva.

1.5.1. Técnica

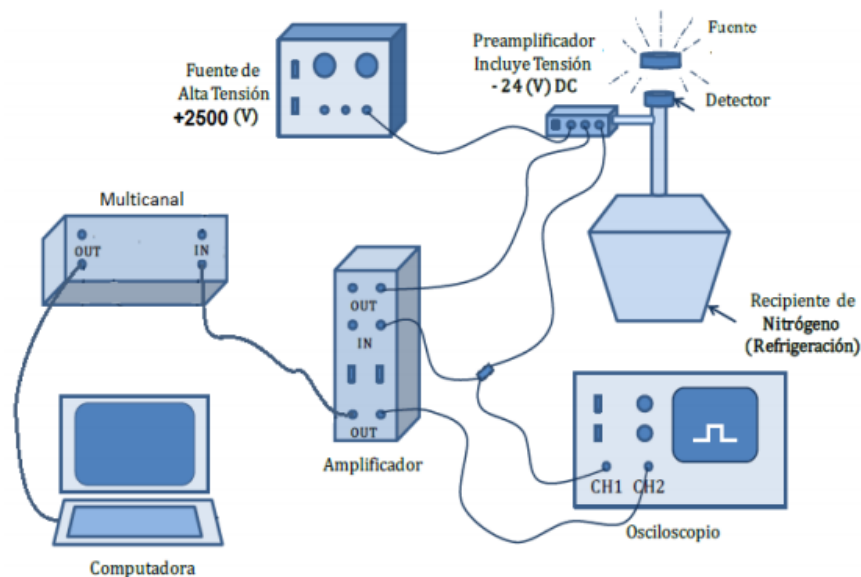
En esta técnica “se pueden encontrar factores que influyen sobre la determinación del espectro, entre ellos, tipo de detector, energía de radiación, tamaño del detector, materiales que rodean la muestra y otras radiaciones de la muestra” [37]. Cada espectrómetro gamma consta al menos de los siguientes componentes:

- *Detector*: estos tienen volúmenes que varían entre 50 y 150 cm³ cuentan con un preamplificador unido a un fotomultiplicador dependiendo del tipo de espectrómetro y un soporte adecuado para la geometría de la muestra a analizar. Deben contar con “un ancho total a la mitad del pico máximo inferior a 2,2 keV a 1332 keV certificado por el fabricante” [38], lo anterior se refiere al valor de FWHM.
- *Escudo*: dada la radiación emitida por las muestras es importante que el equipo tenga un escudo hecho de metal denso, está cubierta se debe encontrar a una distancia adecuada del detector para evitar el fenómeno de retro dispersión (en el cual, “generalmente el fotón proveniente del efecto Compton tiene una distribución angular de 180°, o sea es enfocado hacia la fuente emisora de fotones” [39]) con el fin de evitar una lectura errónea del equipo por la superposición entre diferentes fenómenos, normalmente este recubrimiento se encuentra fabricado en plomo con algunas capas extras de otros materiales como el cobre y debe contar con la disposición para que se puedan ingresar y extraer las muestras del equipo [38].
- *Fuente de alto voltaje*: dependiendo del tipo de detector la fuente puede proveer un voltaje de 0 a 5000 voltios y hasta 100 microamperios. “La fuente de alimentación debe estar regulada y el revestimiento causado por otros equipos debe ser eliminado con filtros de RF (modificadores de magnitud y fase de las frecuencias) y reguladores adicionales” [38].

- *Preamplificador*: este dispositivo cumple con la función de entregar señales de tensión al amplificador teniendo en cuenta los crecimientos y decrecimiento de estas [40].
- *Amplificador*: la función de este es adecuar las señales que provee el preamplificador con el fin de ser analizados por el equipo colector de datos [40].
- *Recolector de datos*: se trata de un sistema que consta del almacenamiento de datos donde se tiene una amplia gama de entradas y salidas y un analizador multicanal de altura de impulsos que se encarga de transformar las señales analógicas provenientes del amplificador a digitales. Estos pulsos son la representación de la energía emitida por la radiación, el número de pulsos en un tiempo determinado da como resultado una amplitud que será asociada a un nivel energético [38].

Figura 6.

Estructura general de un espectrómetro gamma



Nota. La figura muestra la estructura general de cómo se realiza la lectura de la radiación de una muestra por medio de un espectrómetro gamma. Tomado de: L. F. Guarín, *Calibración del espectrómetro gamma en eficiencia absoluta con el programa Hypermet- PC*, tesis esp. Facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 2016.

Los tipos de detectores existentes para espectrometría gamma son clasificados como:

- Gaseosos
- De centelleo
- Químicos
- Termo Luminiscentes
- De semiconductor

Los más utilizados son los de semiconductor ya que tienen una alta precisión en la medida de la actividad, requiere operar a bajas temperaturas y un detector encerrado al vacío; y los de centelleo ya que estos tienen una alta luminosidad y rapidez.

Entre los equipos que emplean centelladores destacan algunos compuestos por Bromuro de lantano dopado con cerio, Oxi-Ortosilicato de lutecio con itrio dopado con cerio y Yoduro de sodio dopado con talio, la eficiencia en estos equipos es dependiente directamente del tamaño del detector [42]. Los espectrómetros semiconductores son generalmente de Germanio Hiperpuro (Ge-HP).

1.6. Manejo De Los Desechos Radiactivos

De acuerdo con la normatividad colombiana que se expone en la sección 1.10, la regulación sobre el manejo y la disposición del material radiactivo está guiado principalmente por la resolución 18-1434 y la resolución 41178 donde se modifica el cuadro 2 del apéndice I de la resolución 18 0005 modificando los valores dispensa de líquidos.

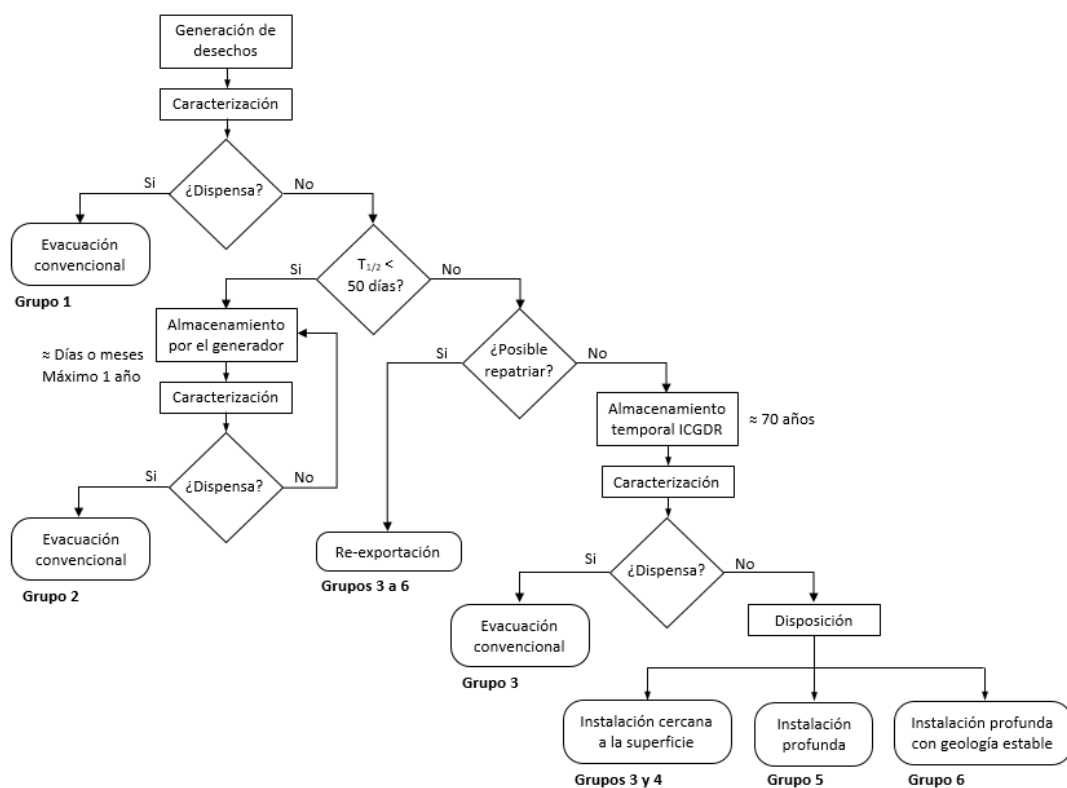
Tabla 4.*Clasificación y opciones de gestión de los desechos radiactivos*

CATEGORÍA	DENOMINACIÓN	RIESGO POR CERCANÍA AL MATERIAL	RIESGO POR DISPERSIÓN DE MATERIAL
1	Extremadamente peligrosas	Si no se maneja o protege con seguridad, podría causar lesiones permanentes a la persona que esté en contacto por pocos minutos. Probablemente fatal por estar junto a la fuente no blindada por minutos a una hora.	Si se dispersa, podría lesionar o poner en peligro la vida de personas en su proximidad. La superficie contaminada podría ser de un kilómetro cuadrado o mayor.
2	Muy peligrosas	Si no se maneja o protege con seguridad, podría causar lesiones permanentes a la persona que esté en contacto por minutos a horas. Probablemente fatal por estar junto a la fuente no blindada por horas a días.	Si se dispersa, podría (aunque es muy improbable) lesionar o poner en peligro la vida de personas en su proximidad. La superficie contaminada no sobrepasaría un kilómetro cuadrado.
3	Peligrosas	Si no se maneja o protege con seguridad, podría causar lesiones permanentes a la persona que esté en contacto por unas horas. Podría ser fatal (si bien es improbable) el estar junto a la fuente no blindada por días a semanas.	Si se dispersa, podría (aunque es sumamente improbable) lesionar o poner en peligro la vida de personas en su proximidad. La superficie contaminada no sobrepasaría una pequeña parte de un kilómetro cuadrado.
4	Improbable que sea peligrosa	Es muy improbable que lesione permanentemente a alguien. Si no se maneja o protege con seguridad, podría (aunque sería improbable) causar lesiones temporales a la persona que esté en contacto por muchas horas o que se hallase cerca a la fuente no blindada por muchas semanas.	Si se dispersa, no podría lesionar permanentemente a nadie.
5	Sumamente improbable que sea peligrosa	Nadie podría resultar lesionado permanentemente por esta fuente.	Si se dispersa, no podría lesionar permanentemente a nadie.

Nota. Se presentan 5 categorías según la OIEA para el nivel de riesgo de las fuentes radiactivas. Tomado de: J. F. Mosos P., *Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia*, tesis maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2018.

Finalmente, la figura 7 presenta una estrategia general para la gestión de los desechos radiactivos de todos los grupos por medio de unas pruebas lógicas que faciliten su disposición. En el caso particular los desechos de ^{131}I provenientes de su uso en medicina nuclear con concentraciones de actividad por encima del nivel de dispensa, se encuentran clasificados en el grupo 2 el cual hace referencia a la clase de desechos radiactivos de muy corta vida, bajo la descripción de radioisótopos con un periodo de semidesintegración menor a 100 días [14].

Figura 7.
Gestión de desechos radiactivos



Nota. Se muestra la secuencia de pruebas lógicas que permiten decidir la gestión de los desechos radiactivos en Colombia. Tomado de: J. F. Mosos P., Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia, tesis maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2018.

1.7. Sistema De Alcantarillado

El sistema de alcantarillado de la ciudad está bajo la administración de la Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) y se conforma actualmente por el alcantarillado sanitario, pluvial y una combinación de estos.

1.7.1. Alcantarillado pluvial

Este sistema se caracteriza por no tener redes independientes de las de alcantarillado sanitario en varios sectores de la ciudad. Alrededor del 20% del sistema en la zona urbana se compone por un sistema de alcantarillado combinado. Las redes pluviales pueden presentar problemáticas como filtraciones de agua subterráneas, descargas no autorizadas, agua de lavado de calles y filtraciones de los sistemas sanitarios o conexiones erradas [43].

Por esta razón, en el año 2017 la EAAB-ESP propuso un plan de intervención de estas redes, que en la cuenca salitre equivalen a 1136 km, por medio de acciones correctivas y preventivas en el sistema con un tiempo estimado de implementación de 10 años a partir de su aprobación [44].

1.7.2. Alcantarillado sanitario

El alcantarillado sanitario de la ciudad de Bogotá cuenta con 59 subcuentas, 467 unidades de gestión de alcantarillado, 123 interceptores, 11 estaciones de bombeo con descarga a dos plantas de tratamiento la primera a la PTAR salitre y la segunda a la PTAR canoas que se encuentra aún en etapa de construcción; actualmente el alcantarillado sanitario de la ciudad cuenta con 4970,90 km de tubería [45]. En la ciudad existen 4 cuencas troncales, Tunjuelo, Fucha, Torca y la de interés la cuenca Salitre, las cuales están compuestas por interceptores, sub-cuencas y canales.

En la cuenca salitre el sistema de alcantarillado se encuentra dividido en tres zonas, (centro, norte y occidental), la zona central se compone principalmente del alcantarillado combinado y cuenta con [44]:

- Sub-cuenca arzobispo, conformada por el canal arzobispo e interceptores. En cuanto a los interceptores, los cuales están ubicados a los costados del canal, reciben colectores troncales combinados del sector.
- Sub-cuenca Sears, esta sub-cuenca también trabaja con colectores troncales que descargan aguas lluvias en el canal salitre y las aguas residuales en el interceptor que lleva por nombre CAN, en este sector las aguas hacen su recorrido sentido oriente- occidente hasta su desembocadura en la PTAR salitre.

- Sub-cuenca delicias, las aguas en esta zona son transportadas por medio de un colector principal que realiza las descargas igual que la cuenca anterior, las aguas lluvias al canal salitre y las aguas residuales al interceptor derecho.
- Sub-cuenca vieja, descarga al canal salitre y se realiza la separación de aguas como se ha mencionado anteriormente.
- Sub-cuenca río negro, esta sub-cuenca al igual que arzobispo está conformada por colectores e interceptores derecho e izquierdo, esta además tiene dos sub-cuencas que reciben y conducen las aguas.
- Sub-cuenca río nuevo es la última parte del sistema combinado de la ciudad, descarga en intercepto de bombeo el salitre.

La sub-cuenca salitre se encarga de drenar todos los canales y colectores mencionados anteriormente, está constituido por el canal salitre e interceptores que dirigen las aguas lluvias y residuales respectivamente, y el interceptor de bombeo con sus respectivas estructuras de separación y alivio para realizar la división del sistema combinado de alcantarillado [44].

En la zona norte de la cuenca salitre se puede encontrar 4 principales sub-cuencas:

- Subcuenta callejas, conformada por los canales calleja y contador y sus respectivos interceptores, estos dos canales se unen en un tramo de recorrido de las aguas donde el canal callejas pasa a ser el canal contador.
- Sub-cuenca norte, este canal junta sus aguas con el canal contador, conformado por sus respectivos interceptores descarga posteriormente en el canal callejas y sus interceptores.
- Sub-cuenca Córdoba, esta recolecta las aguas lluvias del canal molinos y el canal contador para formar el río Juan Amarillo, los interceptores derecho e izquierdo recolectan las aguas sanitarias de los interceptores molino y contador.

- Sub-cuenca Molinos, en esta se encuentra el canal molinos, este tiene tramos subterráneos y cuenta con los interceptores derecho e izquierdos del mismo nombre que recolectan 2 redes troncales del sistema sanitario y continúan el recorrido hasta llegar a los interceptores del canal córdoba.

Por último, en la zona occidental de la cuenca salitre, se encuentra la sub-cuenca Juan amarillo y Jaboque.

- Sub-cuenca Juan Amarillo, en esta se descargan todas las aguas lluvia que provienen de la estación de bombeo salitre en el humedal o el río. Las aguas sanitarias por otro lado las aguas residuales son entregadas a la PTAR salitre por medio de conductos o del interceptor San Marcos.
- Sub-cuenca Jaboque, ubicado en Engativá lo conforma el canal Jaboque y sus interceptores, las aguas sanitarias recorren en dirección norte hasta llegar a la PTAR salitre por medio del interceptor Engativá- cortijo y las aguas lluvias son dirigidas al humedal del mismo nombre.

Según lo anterior el sistema sanitario que desemboca en la cuenta salitre recolecta las aguas residuales de las localidades Usaquén, Suba, Engativá, Barrios Unidos y Chapinero [46].

1.8. PTAR Salitre

Es la planta de tratamiento de aguas residuales cuya función principal es el saneamiento del río Bogotá, a su vez cumple con el tratamiento de aguas residuales provenientes de las cuencas salitre, humedal torca y humedal la conejera, generadas por un estimado de dos millones ochocientos cincuenta mil doscientos (2,850,200) habitantes [47].

El sistema de alcantarillado conduce las aguas hacia la PTAR desde “la calle 26 hasta la calle 200 y desde los cerros orientales hasta las inmediaciones del río Bogotá”, como se puede comprobar con el mapa sanitario habilitado por la EAAB-ESP [43].

1.9. Usos del Agua Saneada

La mayor fuente de consumo de ^{131}I proveniente del ambiente para humanos es principalmente comida contaminada y en menor medida por inhalación. “Dentro de las principales fuentes que pueden proveer ^{131}I se encuentran animales marinos, plantas, verduras de hoja y leche” [34].

De acuerdo con el reporte realizado por L. Ospina, 2018, la CAR estima una población en la cuenca media y alta del río Bogotá de 1,7 millones de habitantes que se ven condicionados a usar los recursos naturales para subsistir debido a la distribución entre los asentamientos rurales y en cascos urbanos [12].

Además de lo anterior, se tiene que el agua de la cuenca media del río Bogotá es empleada principalmente en el sector agroindustrial y agropecuario, siendo también afectada entre otras razones por los desechos industriales de la producción de cuero, papel, fertilizantes, abonos, exploración minera, entre otros [12].

Figura 8.

Usos del agua del río Bogotá para la alimentación de vacunos



Nota. Alimentación de hato con agua del río Bogotá. Tomado de: L. A. Ospina P., *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 pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018.

Se han realizado diversas investigaciones dirigidas por la Universidad Nacional, la Universidad de los Andes, entre otras instituciones que han encontrado presencia de metales pesados en alimentos y ciertas legumbres. La figura 8 evidencia una problemática de acuerdo a una investigación realizada por la *revista semana* al encontrar que “desde la calle 80 hasta Soacha, emplean el riego de cultivos con esta agua, contaminando verduras, hortalizas, leche y pescado” [12].

Así mismo la leche de vaca es la mayor fuente de ^{131}I de los alimentos antes mencionados, el 70% del radioisótopo consumido por una vaca es absorbido en la tiroides y el 1% es encontrado en la leche, de este hasta el 91% se constituye en forma inorgánica libre [34].

1.10. Normatividad Legal

Según la Comisión de Regulación Nuclear de Estados Unidos (U.S NRC) se reportan en la tabla 5 los valores de ^{131}I para la exposición ante este radioisótopo.

Tabla 5.

Valores permitidos de ^{131}I según la U.S. NRC

Atomic No.	Radionuclide	Air (Bq/L)	Water (Bq/L)	Monthly Average Concentration (Bq/L)
53	Iodine- 131	7.4E-3	37	370

Nota. Valores máximos de actividad permitida de ^{131}I por la U. S. NRC, en los efluentes de agua $1\text{e-}6 \mu\text{Ci/ml}$ equivalentes a 37 Bq/L. Tomado de: United States Nuclear Regulatory Commission. (2021). “Iodine-131”. United States Nuclear Regulatory Commission, [En línea]. Disponible: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/appb/iodine-131.html> [Acceso: marzo 28, 2021].

A nivel nacional por medio de la Resolución 18 0052 del 23 de enero de 2008, el Ministerio de Minas y Energía adopta el sistema de categorización de las fuentes radiactivas modificando la resolución 9 0874 de agosto de 2014 [49].

Además, la Resolución 18 0005 del 2010 establece el reglamento para la gestión de desechos radiactivos en Colombia [50], en el cual se dispone lo siguiente:

- CAPÍTULO III. CLASIFICACIÓN DE LOS DESECHOS RADIACTIVOS.
- CAPÍTULO VI. REQUISITOS TÉCNICOS
- APÉNDICE I: NIVELES DE DISPENSA.

Por último, por medio de la Resolución 41178 de 2016 [17] se modifica la Resolución 18 0005 del 2010 donde se reemplaza el cuadro 2 del apéndice I actualizando los valores para su dispensa en líquidos como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6.

Vertido en forma líquida en alcantarillas, ríos y grandes masas de agua.

Radionúclido	Tasa de Emisión Mensual en Concentración de Actividad (Bq/L)	Límite de Emisión Anual (Bq/año)
H-3	1,90E+04	1,00E+12
C-14	5,60E+02	1,00E+10
Na-22	1,10E+02	1,00E+05
Na-24	9,30E+02	1,00E+08
P-32	1,70E+02	1,00E+06
S-35	1,90E+03	1,00E+09
Cl-36	3,70E+02	1,00E+10
K-42	1,10E+03	1,00E+09
Ca-45	3,70E+02	1,00E+10
Ca-47	1,90E+02	1,00E+08
Cr-51	9,30E+03	1,00E+08
Fe-59	1,90E+02	1,00E+06
Co-57	1,10E+03	1,00E+09
Co-58	3,70E+02	1,00E+08
Ga-67	1,90E+03	1,00E+08
Se-75	1,30E+02	1,00E+06
Sr-85	7,40E+02	1,00E+06
Sr-89	1,50E+02	1,00E+09
Y-90	1,30E+02	1,00E+10
Mo-99	3,70E+02	1,00E+08
Tc-99	1,10E+03	1,00E+10
Tc-99m	1,90E+06	1,00E+09
In-111	1,10E+03	1,00E+08
I-123	1,90E+03	1,00E+09
I-125	3,70E+01	1,00E+08

Tabla 6. Continuación

Radionúclido	Tasa de Emisión Mensual en Concentración de Actividad (Bq/L)	Límite de Emisión Anual (Bq/año)
I-131	1,90E+01	1,00E+07
Pm-147	1,30E+03	1,00E+10
Er-169	9,30E+02	1,00E+10
Au-198	3,70E+02	1,00E+08
Hg-197	1,50E+03	1,00E+09
Hg-203	1,30E+02	1,00E+07
Tl-201	3,70E+03	1,00E+08
Ra-226	1,10E+00	1,00E+06
Th-232	5,60E-01	1,00E+06

Nota. Se presentan los límites en concentración de la actividad del vertimiento en forma líquida a alcantarillas y masas de agua para diferentes radioisótopos. Tomado de: Ministerio de Minas y Energía. (diciembre 2, 2016). "Resolución número (41178) de 2016

2. METODOLOGÍA DE LA PROPUESTA DE MUESTREO

La metodología de muestreo es desarrollada tomando como punto de partida el trabajo realizado por L. Ospina, 2018 en la determinación del radio de incidencia del ^{131}I presente en la cuenca media del río Bogotá y haciendo uso de las NTC - ISO 5667– 01, 02, 03 (Anexos 1, 2 y 3 respectivamente) [51, 52, 53].

La metodología propuesta se encuentra enfocada a la red de alcantarillado sanitario de Bogotá para lograr realizar un muestreo efectivo que permita determinar zonas con actividad del radioisótopo dentro de la ciudad y que alimentan la PTAR Salitre.

2.1. Consideraciones del Muestreo

De acuerdo con la sociedad nuclear española, se considera muestreo ambiental como la toma de muestras en el entorno de una instalación para detectar la presencia de contaminantes radiactivos en aire, agua, vegetación, suelos o superficies [54]. La principal variable a considerar es la actividad de ^{131}I presente en la muestra de agua; sin embargo, también se consideran otras variables como el pH, caudal y la presencia de otros posibles radioisótopos en el agua. Como ya se mencionó, la NTC-ISO 5667 – 03 (Anexo 3) es empleada para la construcción del procedimiento de muestreo pues brinda los procesos para la adecuación y conservación de las muestras recolectadas como lo son la acidificación, filtración y cadena de frío que se describen a detalle en la sección 3.1

Para realizar un muestreo es importante identificar el tipo de programa a implementar con el fin de planificar de manera correcta los procedimientos a cumplir. En este caso, se implementa un programa dirigido a la identificación de las fuentes de contaminación que se basa principalmente en el conocimiento de la naturaleza de los contaminantes y de la periodicidad de aparición de estos para realizar un análisis de segmentación de las zonas con actividad de los contaminantes [51].

Dado que el muestreo se realiza en aguas residuales se deben tener ciertas consideraciones dadas por la NTC-ISO 5667-1 (Anexo 1), en donde se menciona que los puntos de muestreo ubicados en alcantarillas deben tener en cuenta la medición del caudal y sus variaciones durante el muestreo y como lo menciona E. Mora y D. Tello, 2020, la localización de los puntos debe basarse en información histórica

obtenida la cual, se relaciona con los hospitales que practican medicina nuclear en la ciudad de Bogotá [16]. También debe tenerse en cuenta la dirección del flujo, ya que en los drenajes suele cambiar las direcciones de estos, para efectos de verificar la dirección de flujo se realiza un contraste con mapas del alcantarillado del distrito.

Por último, en este tramo de la preparación del programa de muestreo es importante tener en cuenta que para obtener resultados representativos se deben tomar de dos a tres muestras, que deben ser tomadas por debajo de la superficie para que no haya ningún material flotante en la muestra que pueda interferir en los procesos de adecuación de la muestra o de la técnica utilizada.

Con estas consideraciones se procede a realizar el diagrama de flujo del programa de muestreo presentado en la sección 2.4 que detalla la metodología empleada en cada etapa del proceso.

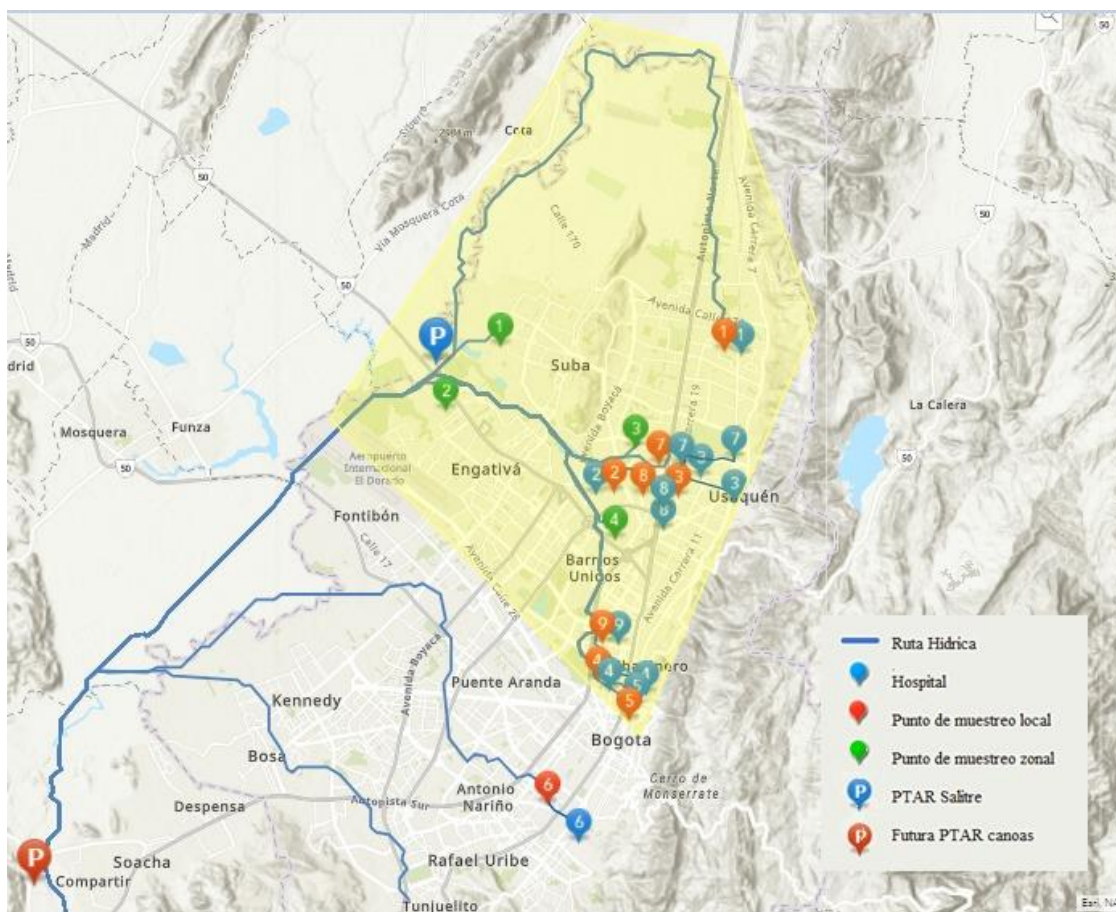
2.1.1. Ubicación de las instalaciones

Este proceso inicia con la identificación de los hospitales que cuentan con autorización para el uso del radioisótopo ^{131}I en tratamientos cancerológicos con medicina nuclear en la ciudad Bogotá, haciendo uso de la información oficial que reposa en las bases de datos del SGC [55], la cual incluye los niveles de vertimiento máximos permitidos, el número de habitaciones disponibles para hospitalizaciones, si posee sistema de gestión de vertidos y la ubicación de cada institución.

Posteriormente, se cruza esta información con los mapas disponibles por medio del programa ArcGIS en la página web de la EAAB-ESP entre los que se incluye la red sanitaria de alcantarillado de Bogotá para seleccionar qué instituciones descargan a la cuenca que alimenta la PTAR Salitre mediante una revisión exhaustiva de la dirección de flujo de agua sanitaria por los canales locales y troncales de la red. Se obtiene la figura 9 que presenta la ubicación de los hospitales y de los puntos de muestreo seleccionados.

Figura 9.

Ruta hídrica y ubicación hospitales autorizados a inspeccionar



Nota. Ubicación y ruta hídrica de los puntos de muestreo diferenciados entre zonales y los asociados a hospitales autorizados por el SGC para el uso de ^{131}I .

A continuación, se definen los elementos de la leyenda presentada en la figura 9:

- *Punto de muestreo zonal:* estas etiquetas presentan la ubicación de pozos que recolectan agua sanitaria sin conexión en la red de alcantarillado a instituciones autorizadas para el uso de ^{131}I .
- *Ruta hídrica:* ilustra el recorrido del agua sanitaria desde los hospitales autorizados hasta la PTAR Salitre pasando por los puntos de muestreo.
- *PTAR Salitre:* planta de tratamiento de aguas residuales Salitre
- *Punto de muestreo local:* hace referencia a la ubicación de los pozos de inspección del alcantarillado sanitario que debido a las conexiones de la red transporta agua sanitaria proveniente de algún hospital autorizado.

- *Hospital*: se refiere a la ubicación de las instituciones autorizadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) para el uso de ¹³¹I en medicina nuclear y el vertimiento del mismo a la red de alcantarillado sanitario dentro de niveles de actividad permitidos.
- *Futura PTAR Canoas*: planta de tratamiento de aguas residuales Canoas que se encuentra en fase de construcción cuyo objetivo será tratar el agua dirigida desde la calle 26 hacia el sur de la ciudad.

2.1.2. Criterios para la selección de los puntos de muestreo

Una vez ubicadas las instituciones, de acuerdo con la delimitación del proyecto, se hace necesario seleccionar diversos pozos de inspección de los canales que transportan las aguas sanitarias en cercanías de una o más instituciones seleccionadas debido a proximidad en el sector y/o la accesibilidad a ellos tanto por su ubicación en la malla vial de la ciudad como por la seguridad del sitio. Para lo anterior, se toma en consideración la información correspondiente a la instalación y operación de un sistema de gestión de vertidos para ¹³¹I, la actividad máxima de dispensa autorizada por semana y el número de habitaciones acondicionadas para hospitalizaciones en cada hospital.

En la selección de los puntos se descartan 2 hospitales en los que no se espera detectar actividad del radioisótopo pues cuentan con sistema de gestión de vertidos, únicamente realizan tratamientos de carácter ambulatorio y los niveles de uso autorizados de ¹³¹I por el SGC en dichas instituciones es menor a 0.3 Ci/mes; se descartan otras 2 instituciones ubicadas en el límite de captación del alcantarillado que descarga en la PTAR Salitre determinando que no conducen a la misma tras la exhaustiva revisión de la dirección de flujo.

Por otro lado, se selecciona un punto de muestreo por fuera de la delimitación del proyecto ubicado en la zona centro de Bogotá puesto que se desea tomar como referencia para los demás pozos dada su representatividad al ser la institución con mayor actividad de uso autorizada.

Para establecer la actividad del radioisótopo proveniente de tratamientos cancerológicos debido a pacientes ambulatorios, se establecen 4 pozos denominados *zonales* sin influencia de aguas residuales hospitalarias en diversas zonas de la ciudad que se dirigen hacia la PTAR Salitre y recolectan el mayor afluente posible. Finalmente, en el proceso de selección y ubicación de los pozos de inspección, se realiza una visita a cada uno de estos lugares validando la información de accesibilidad al sitio.

De esta forma, se presenta la tabla 7 con la información correspondiente a los puntos de muestreo locales y zonales, la cantidad de hospitales que recolecta y la ubicación técnica e ID para cada pozo.

Tabla 7.

Ubicación técnica de los puntos de muestreo

ID	Punto de muestreo	Ubicación técnica	N° de hospitales	N° de habitaciones
1	CL 165 # 14D - 13	D1-SA- Torca- Torca-047	1	1
2	DG 115A # 70B - 86	D1-SA- Salitre-Córdoba Izq-242	1	2
3	CL 114 # 21 - 01	D1-SA- Salitre-Molinos Der-097	2	> 1
4	CL 49A # 28 BIS - 11	D2-CO- Fucha-InArzobisIz-191	2	1
5	DG 40A # 7 - 01	D2-CO- Fucha-InArzobisDr-187	1	1
6	CL 5 # 21 - 88	D3-CO- Fucha-Col Calle 3-112	1	3
7	CL 127 # 48 - 14	D1-SA- Salitre- Callejas-096	2	1
8	CL 108 # 48 - 65	D1-SA- Salitre-Molinos Izq-098	2	8
9	DG 61D # 28 - 99	D2-CO- Salitre-Salitre Der-071	1	0
10	CL 139 BIS # 126C - 03	D1-SA-Salitre-LasMercedes-479		Zonal 1
11	CL 78b # 119 - 2	D2-SA- Salitre- Jaboque-481		Zonal 2
12	KR 56 # 127D - 75	D1-SA- Salitre-Córdoba Der-240		Zonal 3
13	CL 90 # 64 - 08	D1-SA- Salitre-R Negro Der-170		Zonal 4

Nota. Esta tabla presenta la información referente a los pozos zonales y locales seleccionados junto con la cantidad de hospitales que recolecta y la ubicación técnica (Di: *Zona interna de EAAB a la que pertenece* - SA/CO: *Red sanitaria o combinada con pluvial* - Interceptor al que conecta) para cada uno.

Finalmente, se requiere solicitar los permisos necesarios a la EAAB-ESP que se obtienen mediante una concesión con el director de la red de alcantarillado y una persona encargada de seguridad y salud en el trabajo, adjunto en el anexo 4, para coordinar el cierre parcial y delimitación del área de trabajo así como, el levantamiento de las tapas en cada pozo de inspección y el acompañamiento durante el tiempo de ejecución que permita el cierre y control de la zona para la recolección de las muestras garantizando la seguridad de los entes que transitan (peatones o vehículos) y de los demás actores involucrados en el muestreo.

2.1.3. Factores que influyen en la determinación de la actividad

Según las investigaciones anteriores realizadas por el SGC se puede comprobar que con un aumento de caudal se ve afectada la detección del radioisótopo ¹³¹I y dado que el sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad de Bogotá tiene tramos donde se intercepta con el alcantarillado pluvial se decide tomar en consideración los datos del IDEAM con relación a los meses y horas de mayor precipitación históricamente. Para esto se utilizan los promedios climatológicos desde el año 1981 al año 2010 en donde se encuentran los siguientes datos:

Tabla 8.

Históricos de precipitación promedio mensual en Bogotá

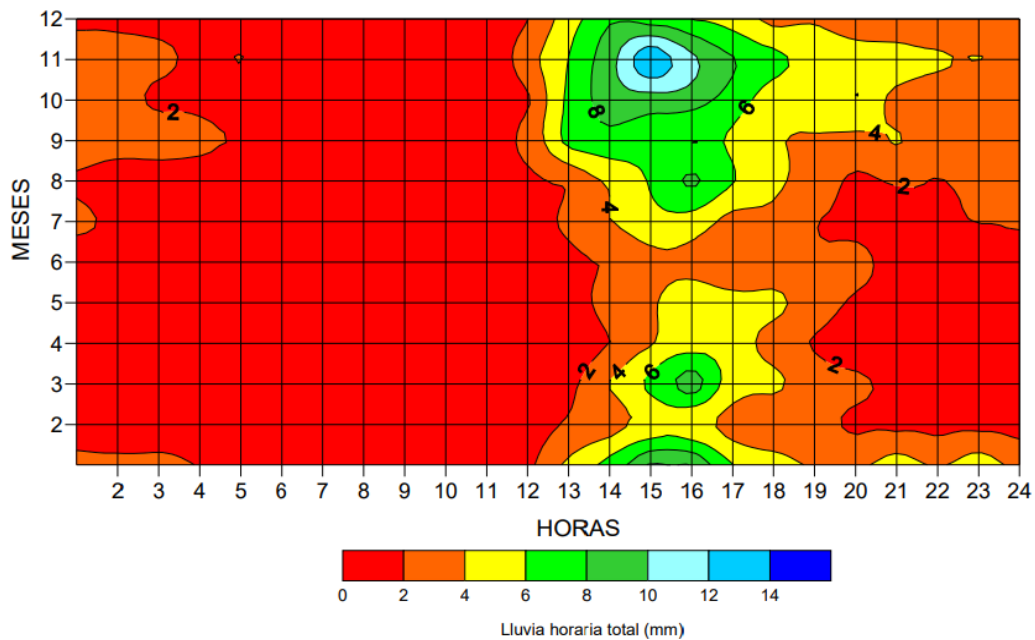
Mes	Precipitación Media (mm)	Mes	Precipitación Media (mm)
Enero	39,70	Julio	82,91
Febrero	52,96	Agosto	69,62
Marzo	79,07	Septiembre	64,54
Abril	106,06	Octubre	106,68
Mayo	119,52	Noviembre	101,49
Junio	86,21	Diciembre	58,51

Nota. Precipitación promedio mensual con datos históricos de estaciones meteorológicas en la ciudad de Bogotá desde el año 1981 hasta el año 2010. Tomado de: IDEAM, "Promedios climatológicos 1981-2010". IDEAM, [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima> [Acceso: Dic. 10, 2021].

Con esta información se estructura el plan de muestreo alrededor de los meses con menor precipitación, el inicio se da en el mes de febrero para realizar la mayor cantidad de muestreos antes de que estos se vean afectados por un aumento considerable en los caudales dentro del alcantarillado, , ya que no es posible realizar los muestreos en los aliviaderos utilizados para la separación de las corrientes de agua lluvia y sanitaria debido a su ubicación en puntos de alto tránsito de la ciudad y lejanía de los hospitales de interés. Así mismo, se observa la variación de precipitación por mes y hora a partir de la información suministrada por el IDEAM que se presenta en la figura 10.

Figura 10.

Gráfico de isopletas para Bogotá



Nota. La gráfica muestra que las precipitaciones se dan mayormente en horas de la tarde a lo largo del año. Tomado de: Subdirección de Meteorología, “Análisis de las precipitaciones horarias en Colombia”, Bogotá, Colombia [PDF]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Horarios.pdf/f62fdf60-a35f-42b6-b8e8-4e8b5aca93d4> Acceso: dic,18,2020.

2.1.4. Tipo de muestras

La selección del tipo de muestreo se realiza de acuerdo con lo establecido en la NTC - ISO 5667 – 02 (Anexo 2) comparando los diferentes tipos que se mencionan en el numeral 4 de la norma como se muestra a continuación:

- *Muestras en el sitio:* muestras discretas representativas de la calidad del agua únicamente en el tiempo y lugar que se toma. Son utilizadas para el establecimiento de programas de muestreo muy amplios en la determinación de cloro residual, pH, sulfuros solubles, entre otros.
- *Muestras periódicas:* pueden ser tomadas a intervalos de tiempo o de flujo fijos de manera dependiente o independiente del volumen usando un mecanismo de cronometraje para iniciar y terminar la recolección de agua en determinados lapsos de tiempo.
- *Muestras continuas:* con base en la norma se puede dar de 2 formas descritas a continuación:
 - A velocidades de flujo fijas: dichas muestras contienen todos los constituyentes presentes en un tiempo t de muestreo, pero usualmente no proporciona información sobre la variación de parámetros específicos en el transcurso del tiempo t del muestreo
 - A velocidades de flujo variables: se considera el método más preciso cuando el flujo y la composición del fluido varían dado que revela información que no se observa cuando se tienen muestras en el sitio siempre y cuando las muestras sean discretas.
- *Muestreo en serie:* consiste en una serie de muestras tomadas a una masa de agua que se puede dar: de perfil profundo, variando la profundidad del muestreo en una localización específica; o de perfil de área, tomadas a una profundidad específica a lo largo de la masa de agua en diversas localizaciones.
- *Muestras compuestas:* se obtienen independientemente del tipo de muestreo al combinar las muestras recogidas verificando que se desean esos datos y/o que los parámetros de interés no variaron significativamente durante el tiempo t de muestreo
- *Muestras de volúmenes grandes:* empleada cuando los métodos de análisis requieren de un gran volumen de la muestra. Por ejemplo, en el análisis de pesticidas o microorganismos que no se pueden cultivar.

De este modo se establece que la campaña se debe componer de muestras discretas o individuales para la búsqueda de una posible contaminación por sobre los límites legales de contenido radiactivo del agua en un plan de vigilancia radiológica mediante el muestreo continuo a velocidad de flujo variable dado que permite obtener muestras de agua cuando la velocidad de flujo y concentración de los contaminantes varían en función del tiempo.

2.1.5. Plan de muestreo

Para obtener resultados representativos del radioisótopo ^{131}I con la información suministrada anteriormente y los resultados obtenidos por E. Mora y D. Tello, 2020 encontrando que, en horas de la mañana se registra mayor actividad de ^{131}I en la PTAR Salitre con tendencia de aumento esperándose mayor actividad al final de la semana [16], así como la información sobre la frecuencia de lluvias junto con la disponibilidad de equipos para el análisis en el SGC y la coordinación de horario con la EAAB-ESP, se decide realizar el muestreo en los puntos presentados en la tabla 7 los días jueves y viernes de cada semana con un pozo al día tomando tres muestras entre 9 a.m. y 11 a.m. con intervalo de 1 hora entre muestras.

2.2. Equipos e insumos de muestreo [58]

A continuación, se enlistan los equipos necesarios para realizar el muestreo en el alcantarillado de Bogotá:

- Balde plástico de 5 L
- Cronómetro.
- Nevera de poliestireno expandido (Icopor) o poliuretano.
- Bolsas sustituto de hielo o gel refrigerante.
- Frasco lavador
- Toallas
- Cinta adhesiva
- Bolsas de basura.
- Esfero y marcador.
- Agua destilada o de botella
- Recipientes de plástico de 500 ml y de geometría 3 (G3)
- Embudo.

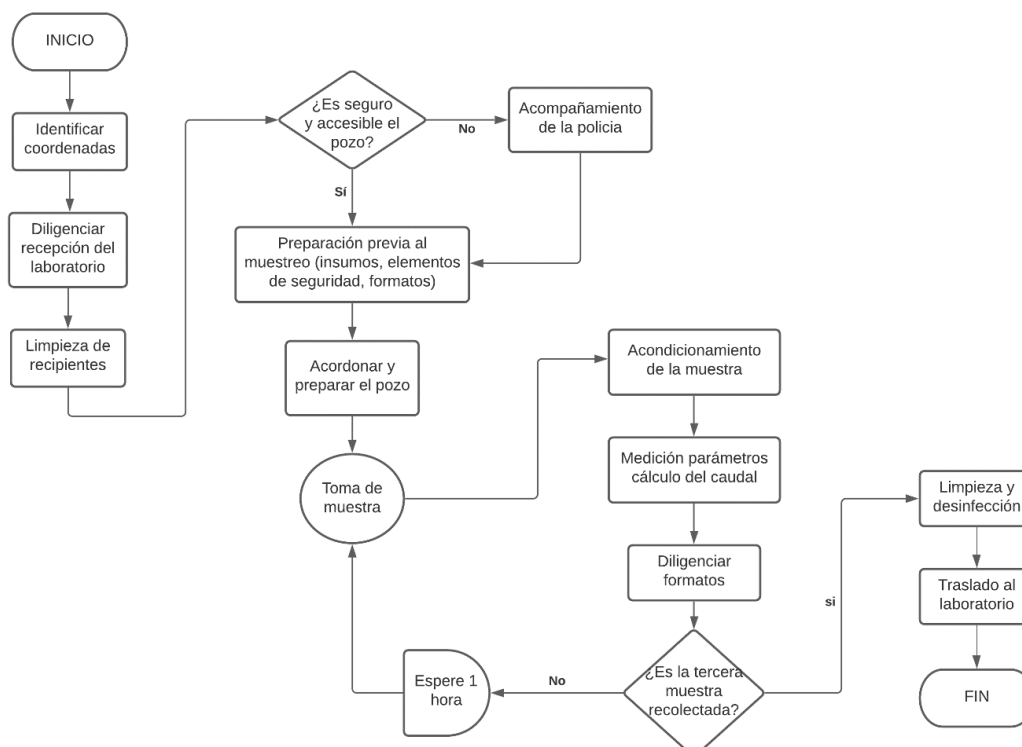
- Cuerdas de hasta 8 metros de longitud
- pH-metro
- Barretón de hierro o zapapico
- Documentos de identificación (Carnet estudiantil, EPS y ARL).
- Overol y botas
- Gafas y casco de seguridad industrial.
- Tapabocas.
- Flexómetros 3 m y 10 m
- Señalización vial/peatonal y conos de tránsito
- Barra de longitud conocida.
- Flotadores

2.3. Procedimiento de muestreo

A continuación, se presenta el procedimiento de muestreo empleado para la recolección de las muestras apoyado con el diagrama de flujo de la figura 11.

Figura 11.

Diagrama de flujo del procedimiento de muestreo



Nota. Diagrama de flujo con las acciones y decisiones durante la realización del procedimiento de muestreo.

- Identificar la localización de cada punto de muestreo a evaluar previamente a la visita del sitio haciendo uso de la información de la tabla 7 en la sección 2.1.2
- Diligenciar el formato de recepción de muestras del Laboratorio de Activación Neutrónica disponible en el anexo 5 con la información que se solicita y remitir al correo electrónico del laboratorio.
- Preparar los recipientes de plástico que se van a emplear antes de la visita a cada pozo limpiando y desinfectando cada uno de acuerdo a lo descrito en el anexo 3
- Evaluar las condiciones de seguridad y accesibilidad haciendo uso de mapas satelitales. En caso de ser requerido, solicitar acompañamiento de la Policía Nacional.
- Acordonar la zona de trabajo haciendo uso de conos de tránsito, cinta de seguridad y señalización vial, siguiendo los parámetros de seguridad especificados en la sección 7 del anexo 1. Este proceso lo lleva a cabo la EAAB-ESP. (ver figura 12)
- Vestir el equipo de protección (Overol, Botas, Casco de seguridad, Guantes, Tapabocas y Gafas de seguridad)
- Preparar los insumos descritos en la sección 2.2
- Asegurar el balde de plástico a emplear en el muestreo con cuerdas bien amarradas.
- Dar aviso al personal de la EAAB-ESP que realiza el acompañamiento para realizar el levantamiento de la tapa de alcantarillado e iniciar el proceso de muestreo en la hora que corresponda.
- Sumergir el balde de plástico sujetado de la cuerda, desechando las primeras 3 muestras para asegurar la purga del recipiente. (ver figura 13)
- Haciendo uso del embudo, trasvasar las muestras de agua a los envases de plástico hasta la boca del mismo evitando que queden cápsulas de aire y cerrar.
- Lavar con agua y desinfectar el recipiente con alcohol etílico 70%, secar y marcar el recipiente con el formato del anexo 7 (ver figura 14)
- Asegurar cadena de frío de cada muestra en la nevera para el transporte de la misma a los laboratorios del SGC. (ver anexo 6)
- Medir la profundidad de la corriente de agua con la barra por diferencia de alturas como se profundiza en la sección 2.3.1

- Levantar otra tapa de alcantarillado (con la señalización correspondiente), dejar caer un flotador, tomar el tiempo de recorrido y la distancia entre pozos. Realizar 3 repeticiones por cada muestra y sellar esta tapa de alcantarillado. Anotar la información en el anexo 8.
- Repetir los anteriores 6 pasos hasta obtener el número total de muestras requeridas en cada pozo.
- Sellar nuevamente el pozo regresando la tapa de alcantarillado a su posición inicial
- Realizar limpieza y desinfección de los insumos empleados
- Retirar los conos de tránsito y señalización que delimitaban la zona de trabajo.
- Registrar las observaciones que se hayan presentado durante el muestreo en el anexo 9.
- Trasladar las muestras a los laboratorios del SGC para su adecuación y posterior medición por espectrometría gamma

Figura 12.

Señalización del área



Nota. Se presenta cierre parcial de calzada en uno de los pozos de inspección.

Figura 13.

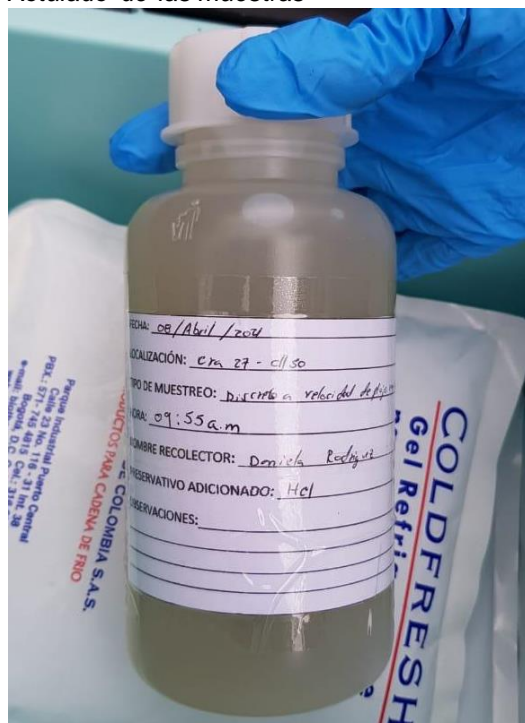
Recolección de muestras



Nota. Proceso de toma de muestra de agua en tránsito en alcantarillado.

Figura 14.

Rotulado de las muestras



Nota. Muestra envasada, desinfectada y rotulada con el anexo 7.

2.3.1. Determinación del caudal de agua en tránsito por la tubería

En la medición de caudal dado que no existen caídas de agua donde se pueda utilizar el método volumétrico mediante balde o el método del vertedero, se procede a estimar el caudal calculando la velocidad, el diámetro de la tubería y la altura del agua dentro de la misma para determinar el área transversal de flujo.

Se obtiene la velocidad utilizando un elemento con menor densidad que el agua el cual se deja caer desde el pozo inmediatamente anterior al pozo de inspección, se toma el tiempo de recorrido con 10 repeticiones para obtener resultados representativos y la distancia entre ambos pozos desde el centro de cada uno usando un flexómetro de 10m (decámetro), los datos se recolectan en el anexo 8.

La medición de la profundidad se lleva a cabo construyendo una vara compuesta por tubos de PVC sujetos por uniones con refuerzo de cinta adhesiva que permite marcar el nivel del agua dentro del pozo mediante el diferencial de altura que se da entre el fondo del pozo y la superficie del agua. Una vez fuera, se mide el diferencial de las marcas realizadas con la ayuda de un flexómetro.

Figura 15.

Medición de profundidad en el pozo de alcantarillado



Nota. Medición de la profundidad del agua en tránsito por la tubería

3. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS POR ESPECTROMETRÍA GAMMA

Las 39 muestras de agua recolectadas para los 13 puntos inspeccionados con sus respectivas 3 repeticiones fueron transportadas de inmediato, una vez concluía el muestreo del día en el pozo correspondiente, a los laboratorios del SGC asegurando cadena de frío entre 2-5°C con el uso de las bolsas de gel refrigerante presentadas en el anexo 6.

3.1. Adecuación de las Muestras

Una vez que se reciben las muestras, se procede a realizar el acondicionamiento teniendo en cuenta la NTC-ISO 5667-3 presentada en el anexo 3 en donde se estipulan los procesos descritos a continuación

- *Filtración:*

El proceso de filtración permite separar los sólidos suspendidos presentes en las muestras de agua hasta obtener alícuotas de entre 100 – 150 ml de cada muestra por medio de una filtración al vacío haciendo uso de una bomba de vacío marca Millipore capaz de generar vacío hasta 813 mbar [59], un erlenmeyer con desprendimiento lateral, un tapón, una manguera de laboratorio y un embudo de plástico de 45 mm de diámetro para el uso de papel de microfibra de vidrio marca Whatman grado cuantitativo 934-AH con diámetro de poro de 1.5 μm .

Figura 16.

Montaje de filtración



Nota. Montaje de filtración compuesto por bomba de vacío, erlenmeyer, embudo, tapón, papel de fibra de vidrio (dentro del embudo) y mangueras.

- *Acidificación:*

La acidificación de las muestras tiene como objetivo llevar a condiciones extremas el medio en que se encuentran las bacterias (provenientes de la materia orgánica). Dicho proceso se realiza después de la filtración empleando ácido clorhídrico 4M hasta obtener un pH cercano a 2.0 como se ilustra en la figura 17.

Figura 17.

Muestra acidificada



Nota. Validación de pH en una de las muestras de agua acidificadas

La preparación de la solución de HCl 4M se realiza sabiendo inicialmente que su peso molecular es 36,46 g/mol y se tiene una solución 37% w/w a temperatura ambiente, por tanto, $\rho = 1,19 \text{ g/ml}$ [60]; así pues, se preparan 300 ml de la siguiente forma:

$$\frac{0,37 \frac{\text{g}}{\text{g}} \times 1,19 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}{36,46 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,012076 \frac{\text{mol}}{\text{ml}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 12,08 \text{ M}$$

$$4 \text{ M} \times \frac{0,3 \text{ L}}{12,08 \text{ M}} = 99,37 \text{ ml}$$

Entonces, se debe tomar una alícuota de 99,4 ml de HCl 37% w/w y aforar con agua para obtener 300 ml de una solución de HCl 4 M.

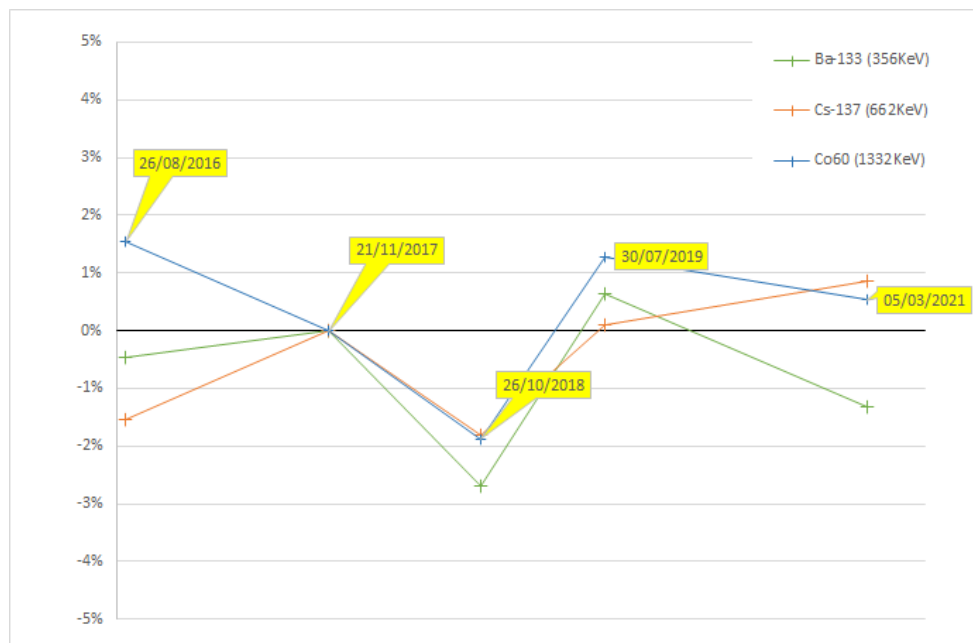
3.2. Calibración de los Equipos

Se analiza la estabilidad del espectrómetro portátil GL0515 el cual, es el equipo de referencia de los demás espectrómetros debido su eficiencia relativa del 10% en la energía de 1,33 MeV [32] garantizando que los equipos se encuentren calibrados.

En el análisis de estabilidad de este equipo se colocan fuentes puntuales que cuentan con una actividad certificada (incluida la incertidumbre generada por el decaimiento de cada uno). Estas fuentes son los radioisótopos Ba- 133, Cs- 137 y Co 60, el proceso consiste en ubicar la fuente a una distancia conocida del detector del equipo (10 cm) e iniciar la medición correspondiente; una vez realizada la lectura se extraen los datos al formato en Excel que conserva el historial de comportamiento del equipo y se verifica que no cuente con una desviación de más del 3% entre los datos obtenidos para cada radioisótopo como se muestra en la figura 18.

Figura 18.

Estabilidad del espectrómetro portátil GL 0515



Nota. Esta gráfica muestra el comportamiento de cada una de las fuentes puntuales en el equipo GL 0515, mostrando una desviación inferior al 3%. Tomado de: Laboratorio Servicio Geológico Colombiano.

Una vez comprobada la estabilidad del equipo se procede a calibrar el mismo con la fuente puntual de ^{131}I suministrada directamente al SGC por una radiofarmacia en la disposición que se observa en el anexo 10 en la cual, internamente se encuentra un blindaje de plomo que contiene la cápsula para el paciente con la respectiva certificación presentada en el anexo 11.

Figura 19.

Fuente puntual ^{131}I en el espectrómetro portátil GL 0515.



Nota. La imagen muestra la correcta posición de la fuente de ^{131}I frente al detector y la distancia establecida de 10 cm para realizar la lectura.

Para la lectura de actividad se procede a colocar la fuente puntual a distancia conocida del detector como se muestra en la figura 19. Este equipo portátil entrega directamente la actividad a diferencia de los utilizados para analizar las muestras recolectadas en la campaña debido a que en estos se debe realizar el cálculo por medio del espectro entregado por el equipo.

Conocida la actividad de esta fuente puntual se debe obtener una solución de referencia para la geometría específica (G3) con actividad conocida de ^{131}I , la cual se utiliza en el detector de Ge-HP, esta geometría es la misma utilizada para la medición de las muestras recolectadas y se presenta en el anexo 12.

3.2.1. Preparación solución referencia

Esta solución se realiza por medio de técnica gravimétrica (basado en la medida de masas) para poder obtener una mayor exactitud que por medio de las técnicas volumétricas. El desarrollo de esta técnica consiste en el pesado de un balón (1) aforado en el cual se realizará la desintegración de la cápsula de ^{131}I , este se pesa vacío y después se agrega la cápsula. Se afora con una solución de HCl de la misma concentración utilizada para la acidificación de las muestras y agua destilada, una vez realizado el aforo se pesa nuevamente el balón (1).

Para no saturar el equipo de medición debido a la elevada actividad entregada en la cápsula inicial, se realiza una dilución 1:50 de la siguiente forma: primero, se pesa el balón (2) vacío y se procede a tomar una alícuota de 2 ml del balón (1) que se traslada al balón (2), nuevamente se pesa el balón (2). Seguidamente se realiza el aforo nuevamente y se pesa el balón (2) como se muestra en la figura 20.

Figura 20.

Peso balón 2 aforado.



Nota. Solución de referencia final que será depositada en la G3 para la calibración del equipo de Ge-HP

Por último, después de trasvasar la solución de referencia del balón (2) a la geometría (G3) y sellarla correctamente se pesa nuevamente el balón (2) para calcular la masa de pérdidas y disminuir la propagación incertidumbre. Con los datos obtenidos de los pesos se procede a realizar el cálculo de la actividad de la geometría y determinar la eficiencia de los equipos como se describe en la sección 4.1.2.

3.3. Desarrollo de la Técnica

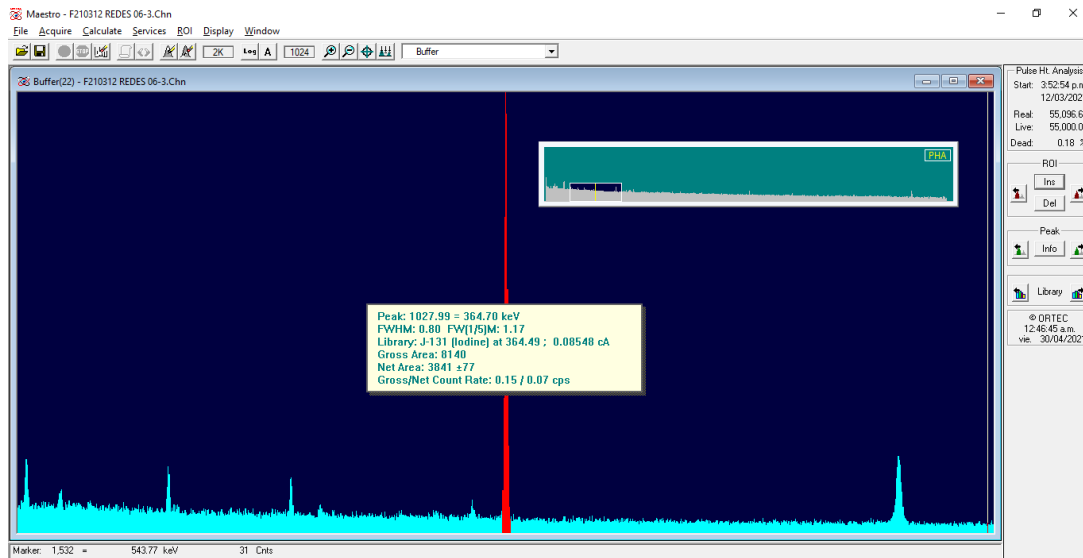
De cada muestra de agua recolectada, luego de ser acondicionada como se describió en la sección 3.1, se toma una alícuota de 100ml en la geometría 3 e ingresa en el detector de Ge-HP dando inicio a la cuantificación de los rayos gamma emitidos por el ^{131}I siendo reflejados en el valor de cuentas que presenta el equipo. Los tiempos de operación son programados para asegurar la correcta lectura a 55000 segundos y junto con un tiempo muerto menor al 5% reducir la incertidumbre de la muestra.

Se construye el espectro de cada una de las 39 muestras y una vez obtenidos se hace necesaria la extracción de la información en el fotópico de interés entre los demás detectados correspondientes a otros radioisótopos (como el detectado de $^{99\text{m}}\text{Tc}$) para los cálculos que se presentan en la sección 4.1.3.

Dicha información se obtiene marcando la *región de interés* (ROI) que corresponde a la zona que forma el fotópico de 364 keV como se muestra en la figura 21, allí los datos de interés son el área neta, incertidumbre e integral los cuales permiten calcular el factor de decaimiento desde la fecha y hora de muestra hasta el análisis de la muestra y posteriormente el cálculo de la actividad; también es importante conocer el límite de detección para poder realizar el análisis de cada una de las muestras.

Figura 21.

Espectro gamma en detector de Ge-HP para la fuente puntual de ^{131}I



Nota. La imagen presenta el espectro de una de las muestras analizadas junto con la región de interés marcada y sus respectivos datos para el cálculo de la actividad .

4. ZONAS CON ACTIVIDAD DETECTABLE DE ¹³¹I

Se presentan los cálculos para la medición del caudal y la calibración de los equipos al ser factores que pueden tener incidencia sobre la detección de la actividad de ¹³¹I en los puntos de muestreo. Adicionalmente, se presenta el análisis de las actividades registradas en cada pozo respecto al efecto de las precipitaciones y una estimación de la población recolectada en los denominados *pozos zonales* con el fin de establecer las zonas con actividad detectada del radioisótopo.

4.1. Cálculos y Resultados

Los cálculos desarrollados en esta sección permiten cuantificar los valores de caudal para cada pozo en base a los parámetros medidos durante la campaña de muestreo llevada a cabo entre el 18 de febrero y el 09 de abril de 2021 al ser uno de los factores relevantes mencionados en la sección 2.1.3. De igual forma, se presentan los cálculos realizados en la calibración del detector de Ge-HP y los resultados obtenidos por el procesamiento de datos en el software avanzado para la evaluación de espectros gamma (Hyperlab).

4.1.1. Medición de caudal

Tomando los datos recolectados en el anexo 8 de cada pozo, se calcula el caudal del agua en que fue tomada cada muestra como se muestra en la ecuación (1):

$$Q = V \times A \quad (1)$$

Donde:

Q: caudal ($\frac{m^3}{s}$)

V: velocidad lineal ($\frac{m}{s}$)

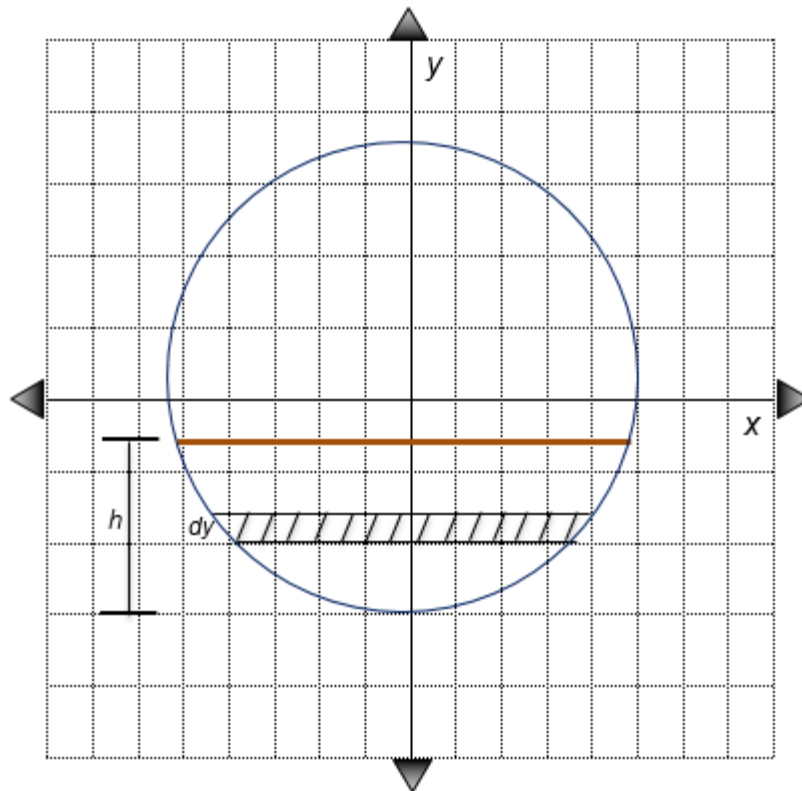
A: Área transversal de flujo (m^2)

4.1.1.i. Determinación del área transversal de flujo. El cálculo para el área transversal de flujo en cada tubería se obtiene a partir del siguiente despeje y consideraciones:

Sabiendo que el alcantarillado sanitario se compone de tuberías cilíndricas, se considera la vista superior de un cilindro ubicado en un plano cartesiano para observar el comportamiento de la tasa de cambio de la altura del agua en el eje de las ordenadas (dy).

Figura 22.

Corte transversal de un cilindro



Nota. Vista superior de un cilindro equivalente a la vista frontal de una tubería para analizar el área transversal de flujo

Se observa entonces que la figura geométrica corresponde a una circunferencia que de acuerdo con la definición matemática forma un cilindro cuando la recta denominada generatriz gira a lo largo de una recta paralela a esta denominada directriz [61]. Así pues, se tiene que, una circunferencia que se ubica en un plano cartesiano con centro (h,k) en el origen, se describe por la ecuación (2):

$$x^2 + y^2 = 1 \quad (2)$$

Despejando de la ecuación (2) para que quede en función de y , se obtiene que:

$$x = f(y) = \pm\sqrt{1 - y^2} \quad (3)$$

De este modo, se plantea el área transversal como la suma infinitesimal del cambio de la función $f(y)$ que describe la circunferencia entre 0 y h (profundidad, nivel o altura del agua en la alcantarilla).

$$A = \int_0^h f(y)dy \quad (4)$$

$$A = 2 \int_0^h \sqrt{1 - y^2} dy \quad (5)$$

La ecuación (5) añade el número “2” a la expresión puesto que corresponde a la representación del área simétrica de la circunferencia (sección positiva y sección negativa de $f(y)$). Esta ecuación se resuelve por sustitución trigonométrica y se obtiene que:

$$A = (h) + h\sqrt{1 - h^2} \quad (6)$$

Con base en el anterior despeje presentado, se calculó el área transversal de flujo y junto con los demás datos de velocidad promedio lineal tomados en cada uno de los pozos de inspección, se consolida la siguiente tabla de resultados para el caudal:

Tabla 9.

Caudal de agua en los pozos de inspección

Ubicación	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)	Ubicación	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)
	3.354		0.001
KR 56 # 127D - 75	4.069	DG 115A # 70B - 86	0.001
	3.496		0.001
	0.143		0.670
CL 165 # 14D - 13	0.120	CL 90 # 64 - 08	0.680
	0.135		0.675
	0.450		0.786
CL 127 # 48 - 14	0.442	CL 5 # 21 - 88	0.873
	0.437		0.673
	0.831		0.342
CL 114 # 21 - 01	0.931	CL 49A # 28 bis - 11	0.437
	0.873		0.405
	0.531		0.102
CL 108 # 48 - 65	0.535	DG 40A # 7 - 01	0.097
	0.550		0.101

Nota. Se presentan los caudales medidos en cada pozo. Se descartan los pozos CL 139 BIS # 126C – 03, CL 78B # 119 – 02 y DG 61D # 28 – 99 debido a la dificultad que presentaban los mismos por razones de profundidad y seguridad en las tuberías.

4.1.2. Calibración del equipo

A partir del procedimiento mencionado en la sección 3.2, se obtienen los datos que se consolidan en la siguiente tabla.

Tabla 10.

Valores obtenidos técnica gravimétrica.

Nomenclatura	Valor	Unidades
m_{B1}	55,31884	g
m_{B2}	53,806	g
m_{B1+I}	155,8909	g
$m_{B2+ALII}$	55,75829	g
m_{NB1}	100,57206	g
m_{ALIB1}	1,95229	g
m_{NP}	0,1024	g
m_{B2+P}	53,9084	g
m_{NALI}	1,84989	g
m_{B2+I}	153,4408	g
m_{NB2}	99,6348	g
A	1070	kBq

Nota. Datos requeridos para el cálculo de la actividad en la geometría específica por medio de la aplicación de la técnica gravimétrica y el dato de actividad obtenida por el equipo portátil para la cápsula de ^{131}I .

La nomenclatura de la tabla 10 hace referencia a:

m_{B1} : masa balón 1 vacío.

m_{B2} : masa balón 2 vacío.

m_{B1+I} : masa balón 1 aforado.

$m_{B2+ALII}$: masa balón 2 con alícuota del balón 1.

m_{NB1} : masa neta del balón 1.

m_{ALIB1} : masa trasvasada del balón 1 al balón 2.

m_{NP} : masa neta de pérdidas.

m_{B2+P} : balón 2 más pérdidas.

m_{NALI} : masa neta alícuota

m_{B2+I} : masa balón 2 aforado.

m_{NB2} : masa neta balón 2.

A : actividad de la cápsula ^{131}I .

Para determinar la fracción volumétrica perdida debido a las etapas de transvasado requeridas durante la preparación de las alícuotas entre el balón aforado y la geometría G3 para la calibración del equipo, se presenta la fracción de pérdidas (x) a partir del cociente entre la masa neta de pérdidas y la masa neta del balón 2 en la ecuación (7)

$$x = \frac{m_{NP}}{m_{NB2}} \quad (7)$$

$$x = \frac{0,1024}{99,6348} = 0,0010277$$

Por otro lado, para la determinación de la actividad en la geometría específica G3 se establece el producto entre la actividad conocida de la cápsula de ^{131}I , la diferencia del total de la muestra respecto a la fracción de pérdidas y el cociente entre la alícuota inmersa en el balón 1 y la masa neta del balón 1 representado en la ecuación (8).

$$A_{G3} = A \left(\frac{m_{ALIB1}}{m_{NB1}} \right) (1 - x) \quad (8)$$

$$A_{G3} = 1070000 \text{ Bq} * \frac{1,95229}{100,57206} * (1 - 0,0010277)$$

$$A_{G3} = 20749 \text{ Bq}$$

Dicho valor calculado corresponde a la actividad de la alícuota preparada el día 13 de abril de 2021 a las 15:39. Una vez se obtiene el valor de actividad en la geometría específica G3, se calcula la eficiencia del detector de Ge-HP de la siguiente forma presentada en la ecuación (9):

$$e = \frac{cts}{A_{G3} \gamma t f_d} \quad (9)$$

Donde:

Cts : cuentas

t : tiempo vivo o de conteo

A_{G3} : actividad de la geometría 3

f_d : factor de decaimiento

γ : rendimiento Gamma

$$e = \frac{35223276}{20749 * 0,815 * 70444,74 * 0,7890} = 0,0375$$

Durante el desarrollo de la campaña de muestreo el equipo fue calibrado con Co-60 y Am-241 cuando la diferencia entre el valor teórico y el experimental es mayor a 1keV para asegurar la correcta lectura de los diferentes fotónicos para los radioisótopos en el espectro. La calibración con la solución a partir de la fuente puntual permite la calibración del mismo específicamente para el fotónico de ¹³¹I en 364 keV cerciorando la información obtenida de cada muestra analizada.

4.1.3. Actividad de ¹³¹I en las muestras

Para la evaluación del espectro gamma de las muestras analizadas se emplea el software Hyperlab obteniendo el valor de actividad de ¹³¹I, dado que, tiene la capacidad de procesar la eficiencia del detector, así como los fotónicos con corrección de eficiencia [62]. Los resultados obtenidos en el informe de cada muestra generados por Hyperlab corresponden a la actividad al momento de análisis, siendo necesario realizar el ajuste a la fecha del muestreo debido al tiempo de decaimiento mediante la ecuación de decaimiento universal (10).

$$A_{(0)} = \frac{A_{(t)}}{e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot (t_2 - t_1)}} \quad (10)$$

Donde,

A₍₀₎: actividad en tiempo t=0 (fecha y hora de muestreo)

A_(t): actividad en determinado tiempo t=t (fecha y hora de análisis)

t_{1/2}: tiempo de vida media (8.02 días)

t₂: fecha y hora de análisis

t₁: fecha y hora de muestreo

Realizados dichos ajustes en el valor de la actividad, en la tabla 11 se consolidan los resultados que se obtienen de las tres muestras recolectadas en cada pozo inspeccionado.

Tabla 11.*Actividad procesada con evaluación en software Hypelab*

Punto de Muestreo	Muestra 1 [Bq/L]	Muestra 2 [Bq/L]	Muestra 3 [Bq/L]
(PZ ₃) KR 56 # 127D - 75	ND	ND	ND
CL 165 # 14D - 13	ND	4.17	ND
CL 127 # 48 - 14	ND	ND	ND
CL 114 # 21 - 01	4.23	11.58	8.44
CL 108 # 48 - 65	ND	1.32	4.16
DG 115A # 70B - 86	609.14	135.52	48.05
(PZ ₁) CL 139 BIS # 126C - 03	ND	1.31	2.76
(PZ ₄) CL 90 # 64 - 08	5.02	ND	1.04
(PZ ₂) CL 78b # 119 - 02	4.18	2.83	ND
DG 61D # 28 - 99	ND	ND	1.10
CL 5 # 21 - 88	39.98	48.53	55.82
CL 49A # 28 bis - 11	1.99	17.42	15.33
DG 40A # 7 - 01	769.66	1092.24	662.18

ND: No detectable = Actividad de ¹³¹I inferior al límite de detección

Nota. Se presentan los resultados obtenidos con el software Hyperlab y llevados al tiempo de muestreo ($t = 0$).

Adicionalmente, para corroborar los resultados del software se realiza el cálculo de la actividad de manera *manual*/apoyados en la herramienta Excel. Este método presenta menor exactitud principalmente al momento de extraer la información lo que recae directamente en la ejecución de los cálculos obteniendo límites de detección más restringidos de 0.73 Bq/L para el método manual (empleando Excel), respecto al obtenido por el software de 0.08 Bq/L.

Los resultados tienen errores relativos que oscilan entre el 0.15% y el 46% según los resultados de las muestras comparadas, el origen de dicha discrepancia radica en el método de análisis puesto que la extracción de la información necesaria requiere la marcación y corrección del ROI (por parte del analista) en el espectro generado induciendo el error humano mientras que, el software Hyperlab realiza un filtrado digital tomando directamente el espectro de la muestra y generando el reporte de los fotónicos detectados a diferentes energías entre 20 y 2700 keV.

Tomando en consideración la información previamente presentada y el origen de la variación entre los datos analizados para una misma muestra, se argumenta mayor certeza en los resultados suministrados por Hyperlab y por tal razón, se decide realizar el análisis con base en el informe final presentado por el software para las 39 muestras analizadas.

Resaltan los resultados obtenidos en los puntos de muestreo ubicados en la DG 115A # 70B – 86 y la DG 40A # 7 - 01 puesto que presentan una alta variabilidad entre las tres muestras de cada pozo, de modo que se ahonda en la información correspondiente a las instituciones que se recolectan para plantear las siguientes hipótesis sobre lo que puede estar sucediendo en cada sitio:

- Dado que la institución recolectada por el pozo ubicado en la DG 115A # 70B – 86 cuenta con un sistema de gestión de vertimientos, es posible que el mismo no esté funcionando correctamente ya que se obtienen resultados de actividad de ^{131}I mayores al límite de vertimientos permitido. Adicionalmente, dichos resultados presentan una tendencia a la baja sin justificación inicial aparente puesto que el caudal del agua en tránsito medido se mantiene constante en las muestras recolectadas.
- Considerando que la institución recolectada por el pozo de la DG 40A # 7 - 01 se encuentra en proceso de implementación de un sistema de gestión de vertidos para ^{131}I , es posible que exista una alta cantidad de pacientes tratados u hospitalizados en un mismo corto lapso que, por el uso de las instalaciones, estén generando una gran cantidad de desechos líquidos que son directamente vertidos al alcantarillado sanitario.

A partir del informe generado por Hyperlab se obtienen los datos de FWHM para cada espectro el cual, es un valor que permite conocer la resolución del detector a partir de la amplitud del ROI generado a la mitad de su altura en el fotópico de interés mediante el número de canales que lo conforman. Se obtiene, particularmente, anchura a media altura (FWHM, por sus siglas en inglés) entre 2 y 4 canales (Ch) para el fotópico de 364 keV.

Esto permite conocer que entre menor valor de FWHM habrá mayor precisión en la energía específica, es decir menor posibilidad de realizar lecturas erradas debido a rayos gamma provenientes de otras energías reduciendo el ruido por perturbaciones externas, teóricamente la idealidad en las lecturas se da cuando solo se tiene un canal en la energía específica [63]. La tabla 12 presenta el FWHM de cada espectro.

Tabla 12.

FWHM de los espectros

Punto de muestreo	Actividad (Bq/L)	FWHM (Ch)	E (keV)
KR 56 # 127D – 75 (PZ ₃)	ND	-	-
	ND	-	-
	ND	-	-
CL 165 # 14D – 13	ND	-	-
	4.17	4.06	364.57
	ND	-	-
CL 127 # 48 – 14	ND	-	-
	ND	-	-
	ND	-	-
CL 114 # 21 - 01	4.23	3.23	364.47
	11.58	3.28	364.49
	8.44	3.33	364.42
CL 108 # 48 - 65	ND	-	-
	1.32	2.28	364.42
	4.16	3.20	364.49
DG 115A # 70B - 86	609.14	3.20	364.58
	135.52	3.29	364.51
	48.05	3.28	364.45
CL 139BIS # 126C - 03 (PZ ₁)	ND	-	-
	1.31	3.20	364.31
	2.76	2.82	364.54
CL 90 # 64 – 08 (PZ ₄)	5.02	3.18	364.43
	ND	-	-
	1.04	2.73	364.53
CL 78B # 119 – 02 (PZ ₂)	4.18	3.05	364.34
	2.83	3.40	364.56
	ND	-	-

Tabla 12. Continuación

Punto de muestreo	Actividad (Bq/L)	FWHM (Ch)	E (keV)
	ND	-	-
DG 61D # 28 - 99	ND	-	-
	1.10	4.24	364.46
	39.98	3.17	364.33
CL 5 # 21 - 88	48.53	3.25	364.39
	55.82	3.20	364.55
	1.99	2.91	364.51
CL 49A # 28 bis - 11	17.42	3.29	364.47
	15.33	3.24	364.44
	769.66	3.24	364.52
DG 40A # 7 - 01	1092.24	3.15	364.48
	662.18	3.17	364.35

ND: No detectable = Actividad de ^{131}I inferior al límite de detección

Nota. Valores de FWHM para cada uno de los espectros analizados por Hyperlab con su respectiva energía del fotópico.

4.2. Análisis

Para comprender correctamente los resultados obtenidos en la sección 4.1.3 se observan en la calle 5 # 21 – 88 niveles por encima del límite permitido, sin embargo, otros resultados son hasta 20 veces mayores provenientes de instituciones con menor manejo de actividad autorizada generando principal atención en dichos lugares al sobrepasar considerablemente la actividad detectada respecto a la institución de referencia planteada.

De este modo, se consideran dos factores relevantes que se han mencionado anteriormente en el proyecto: el efecto de las precipitaciones en la detección de actividad cuando se realiza inspección en pozos de alcantarillado combinado; y el impacto de los desechos generados por pacientes ambulatorios que no pueden ser controlados por parte de los generadores o instituciones que emplean ^{131}I en tratamientos de medicina nuclear.

4.2.1. Efecto de las precipitaciones

Las precipitaciones generan afectaciones en los caudales siempre y cuando exista un sistema de alcantarillado combinado como se ha mencionado anteriormente, por esta razón se hace necesario examinar el registro durante las fechas y horas de muestreo como se presenta a continuación:

Tabla 13.

Precipitaciones diarias en cada punto de muestreo.

Punto de Muestreo	Fecha	Estación	Precipitación diaria (mm)	Clasificación	Precipitación en las horas de muestreo (mm)
KR 56 # 127D – 75	Feb 18	IED Gustavo Morales	0,1	Lluvias ligeras	0
CL 165 # 14D – 13	Feb 25	Cerro norte	0,9	Lluvias ligeras	0,3
		IED Agustín Fernández	1,5	Lluvias ligeras	0,2
CL 127 # 48 – 14	Feb 26	IED Gustavo Morales	17	Lluvias moderadas	0
CL 114 # 21 – 01	Marzo 04	IED Gustavo Morales	2,2	Lluvias ligeras	0,3
CL 108 # 48 – 65	Marzo 05	IED Gustavo Morales	0,1	Lluvias ligeras	0
DG 115A # 70B – 86	Marzo 11	IED Gustavo Morales	14,2	Lluvias moderadas	0
CL 139 BIS # 126C - 03	Marzo 12	I.E.D. Alberto Lleras Camargo	4	Lluvias ligeras	0
CL 90 # 64 - 08	Marzo 18	Colegio Magdalena Ortega De Nariño I.E.D.	1,8	Lluvias ligeras	0
CL 78b # 119 - 02	Marzo 19	Colegio Rodolfo Llinas	19,8	Lluvias moderadas	0

Tabla 13. Continuación

Punto de Muestreo	Fecha	Estación	Precipitación diaria (mm)	Clasificación	Precipitación en las horas de muestreo (mm)
DG 61D # 28 - 99	Marzo 25	Colegio Francisco I	0	Sin lluvias	0
CL 5 # 21 - 88	Marzo 26	Colegio Los Pinos	1,8	Lluvias ligeras	0
CL 49A # 28 bis - 11	Abril 08	Colegio Francisco I	7,2	Lluvias ligeras	0
DG 40A # 7 - 01	Abril 09	Colegio Manuel Elkin Patarroyo	0,3	Lluvias ligeras	0

Nota. Precipitaciones del día y durante las horas de muestreo en cada uno de los puntos considerando los registros de la estación más cercana. Tomado de: Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, “Catálogo de estación Red Hidrometeorológica de Bogotá”. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, [En línea]. Disponible: <https://www.sire.gov.co/web/sab/informacion-hidrometeorologica>. [Acceso: May. 10, 2021]

Tomando en consideración la información técnica de los pozos de inspección presentada en la tabla 7, se determina que cuatro de ellos hacen parte de una red de alcantarillado combinado los cuales se mencionan a continuación:

- CL 49A # 28 BIS - 11
- CL 5 # 21 - 88
- DG 40A # 7 - 01
- DG 61D # 28 – 99

Por tal motivo se analizan las columnas 4 y 6 de la tabla 13, en donde se evidencian precipitaciones a lo largo del día sin afectación durante el muestreo para los puntos en cuestión, dado que las mismas no se presentaron entre las horas de muestreo y en concordancia a las observaciones consignadas en el anexo 9 de estos días.

Específicamente en el caso de los días que se tomaron muestras de los pozos ubicados en la CL 114 # 21 – 1 y la CL 165 # 14D – 13 se registraron precipitaciones ligeras durante el transcurso del muestreo, sin embargo, no se tiene afectación directa

sobre los caudales dado que dichos pozos se encuentran en la red de alcantarillado sanitario, es decir, que no presenta conexiones con el alcantarillado pluvial evidenciando ligera variación en los datos de caudal para estos pozos presentados en la tabla 9.

Para todos los pozos las variaciones en el caudal son mínimas y se puede dar principalmente por diversas descargas realizadas a la red de alcantarillado conectada en los intervalos de tiempo del muestreo sin tener influencia de las precipitaciones durante los días que se presentaron; dicho factor es de difícil cuantificación debido a la cantidad de vertimientos posibles que se llegan a dar en una fracción de tiempo establecido para un área determinada.

4.2.2. Estimación poblacional de los puntos de muestreo zonales por UPZ

Se obtiene una estimación de la cantidad de personas que habitan en los puntos de muestreo catalogados como *zonales*, calculados mediante una revisión de las unidades de planeamiento zonal (UPZ) que conforman el área recolectada por el pozo inspeccionado, es decir, sobre el cual se tiene influencia del radioisótopo detectado. Esta consideración se realiza dada la ubicación de estos pozos sobre las redes troncales del sistema de alcantarillado sabiendo que no recogen la totalidad de las UPZ mencionadas debido a la estructura de las redes.

El pozo definido como *Zonal 1* se ubica en la CL 139 BIS # 126C – 03 y se estima que abarca la población de las UPZ mencionadas a continuación [65]:

- *La academia*: limita con las UPZ Guaymaral y San José de Bavaria, Paseo de los libertadores y Verbenal, por último, con zona rural de suba.
- *Suba*: limita con las UPZ el Rincón, Tibabuyes y Casa Blanca, también con zona rural de la localidad.
- *El rincón*: limita con las UPZ Suba, Niza, La floresta, Tibabuyes y Minuto de Dios.

El pozo definido como *Zonal 2* se ubica en la CL 78B # 119 – 02 y se estima que abarca la población de las UPZ mencionadas a continuación [66].

- *Garcés navas*: limita con las UPZ Bolivia, Minuto de Dios, Boyacá Real, Álamos y Engativá, además limita con el municipio de Cota, Cundinamarca.
- *Engativá*: limita con las UPZ Garcés Navas, Álamos, Aeropuerto El Dorado y con los municipios aledaños Funza y Cota.

El pozo definido como *Zonal 3* se ubica en la KR 56 # 127D - 75 y se estima que abarca la población de las UPZ mencionadas a continuación:

- *San José de Bavaria*: limita con las UPZ La Academia y Britalia, Verbenal, La Uribe y con la zona rural de Suba [65].
- *Britalia*: limita con San José de Bavaria, El Prado, Casa Blanca y Toberín [65].
- *El prado*: limita con las UPZ Britalia, Niza, La Alhambra y Country [65].
- *San Cristóbal Norte*: limita con la calle 165, calle 170 y calle 153, con la carrera 7ª y la carrera 9ª y el perímetro urbano por el oriente [67].
- *Toberín*: limita con calle 170, carrera 9, calle 153 y la autopista Norte [67].
- *Los cedros*: limita con la calle 153, con la carrera 7ª, con la calle 134, la autopista Norte y por último con el perímetro urbano por el oriente [67].

El pozo definido como *Zonal 4* se ubica en la CL 90 # 64 - 08 y se estima que abarca la población de las UPZ mencionadas a continuación:

- *Usaquén*: esta UPZ está delimitada por la calle 134, la calle 100, la carrera 9ª y el perímetro urbano de la ciudad por el oriente [67].
- *Santa Bárbara*: esta UPZ está delimitada por la Calle 127, la Carrera 9ª, la Calle 100 y la autopista Norte [67].
- *La Alhambra*: limita con las UPZ El Prado, Floresta, Niza, Santa Bárbara y Los Andes [65].
- *Chicó Lago*: limita con las UPZ Usaquén, Santa Bárbara, El Refugio, Pardo Rubio, Chapinero, Los Andes y Los Alcázares [68].
- *El refugio*: limita con la UPZ Usaquén, Chicó Lago y Pardo Rubio [68].

Tabla 14.*Estimación poblacional de pozos zonales*

Pozos Zonales	UPZ	Habitantes	Total
Zonal 1	La academia	4,953	472,818
	Suba	180,194	
	El rincón	287,671	
Zonal 2	Garcés Navas	167,267	308,690
	Engativá	141,423	
Zonal 3	San José de Bavaria	50,750	512,824
	Britalia	93,302	
	El prado	104,160	
	San Cristóbal	71,443	
	Toberín	61,776	
	Los cedros	131,393	
Zonal 4	Usaquén	42,163	234,618
	Santa Bárbara	72,349	
	La Alhambra	42,400	
	Chicó Lago	37,408	
	El Refugio	40,298	
Población recolectada			1,528,950

Nota. Proyección poblacional para el año 2021 en cada UPZ para los 4 pozos zonales. Tomado de: DANE, “Proyecciones de población desagregadas por localidades 2018-2035 y UPZ 2018-2024”, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, [En línea]. Disponible: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion/proyecciones-de-poblacion-bogota> [Acceso: Abr. 30, 2021]

4.2.3. Influencia de los pozos zonales.

Según los datos recolectados, al obtener la actividad se logra precisar que los pozos zonales se encuentran en los niveles de dispensa autorizada puesto que en ninguna de las tres muestras para los 4 pozos zonales inspeccionados se detectó una actividad de ^{131}I por fuera del límite legal.

Empleando la estimación poblacional del pozo zonal 1 presentado en la tabla 14, se infiere que, de las aproximadamente cuatrocientas setenta y dos mil ochocientos dieciocho (472,818) personas, una fracción de estas corresponde a pacientes ambulatorios tratados con ^{131}I y habitan esta zona aportando niveles mínimos de vertimiento al sistema de alcantarillado, ya que se detecta baja actividad del radioisótopo en 2 de las muestras analizadas como se evidencia en la tabla 11.

Siguiendo con el pozo zonal 2, se presenta mayor actividad en comparación con el pozo zonal 1 a pesar de tener menor cantidad de habitantes recolectados. Se detecta actividad de 4.18 Bq/L y 2.83 Bq/L para ^{131}I indicando una posible mayor cantidad de pacientes con tratamientos con ^{131}I que habitan en el occidente de la ciudad; en todo caso, estos niveles detectados no catalogan el pozo por encima del límite permitido.

Continuando con el pozo zonal 3, no se detecta actividad de ^{131}I en ninguna de las muestras tomadas a pesar de recolectar la mayor cantidad de habitantes, quinientos doce mil ochocientos veinticuatro (512,824), entre los cuatro pozos zonales seleccionados. Sin embargo, es posible plantear que exista dilución del radioisótopo al ser el pozo con mayor caudal medido entre los pozos, observando el comportamiento no se esperaría que en las aguas recolectadas por dicho pozo se detecte actividad mayor al límite de vertimiento.

En el caso del pozo zonal 4, se presenta la menor cantidad de personas recolectadas de acuerdo con la estimación poblacional presentada y cuenta con la mayor actividad detectada entre muestras de pozos zonales con valores para la primera y tercera muestra analizada de 5.02 Bq/L y 1.04 Bq/L respectivamente sin detección en la segunda muestra. Lo anterior puede indicar mayor densidad de pacientes ambulatorios en esta zona que generan impacto a los vertimientos en esta zona.

Con base en la información presentada se logra establecer que de los dos millones ochocientos cincuenta mil doscientos (2,850,200) habitantes atendidos por la PTAR Salitre, se recolectó aproximadamente el 53.64% equivalente a un millón quinientos veintiocho mil novecientos cincuenta (1,528,950) personas en total entre los 4 pozos zonales inspeccionados sin influencia de vertimientos generados por instituciones autorizadas que empleen ^{131}I . Por tal motivo, las acumulaciones del radioisótopo en la PTAR Salitre no se generan debido a los desechos generados por los pacientes ambulatorios de las zonas inspeccionadas sino, principalmente, por las instituciones que hacen uso de este radioisótopo en los tratamientos con medicina nuclear dando lugar al incumplimiento de la legislación colombiana por parte de algunas de estas entidades.

4.3. Establecimiento de Zonas con Actividad

Debido a los rangos de detección de actividad en los pozos muestreados se presenta un análisis con diagramas de cajas y bigotes los cuales exhiben la dispersión de los datos, en base a estos gráficos y a la sección 4.2 se establecen las zonas con actividad mediante clasificación de actividad detectable y representación gráfica.

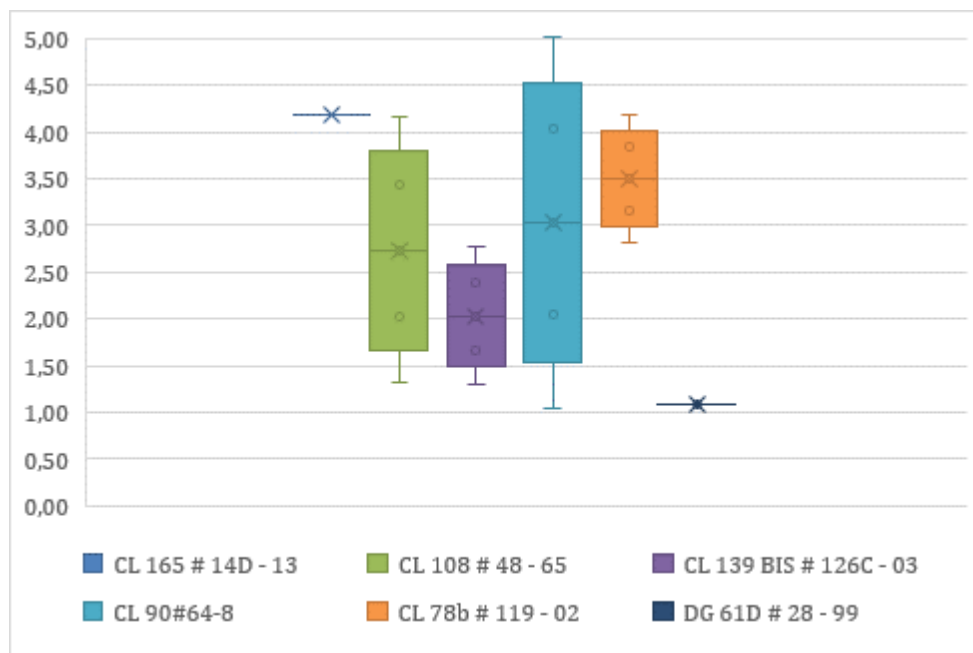
4.3.1. Categorización de las zonas

Se hace un análisis gráfico del comportamiento del ^{131}I en cada uno de los pozos para llegar a clasificar las zonas; ya que los pozos son independientes entre sí, no se encuentran muestras correlacionadas y por tanto se da gran dispersión entre datos

Es por esta razón que se decide graficar en diagramas diferentes para evidenciar correctamente la escala comparando los 13 puntos muestreados, se presentan a continuación las figuras 23, 24 y 25 con pozos que hayan presentado comportamiento similar en la actividad analizada.

Figura 23.

Muestras con actividad entre 1 y 5.1 Bq/L

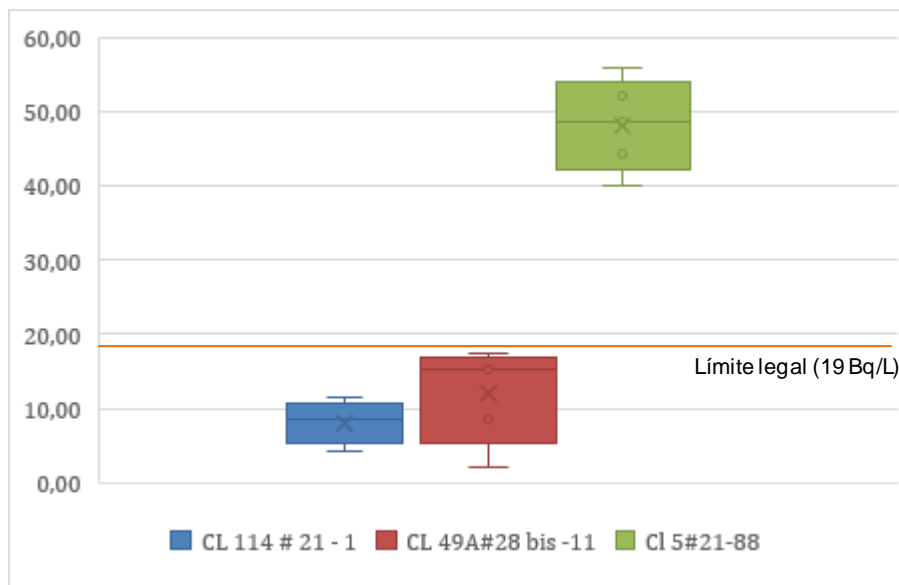


Nota. Conjunto de pozos con menor actividad detectada. Los datos sin dispersión se dan debido a la detección de actividad en menos de dos muestras.

En la figura 23 se evidencian dos pozos sin dispersión de datos por registro de actividad en tan solo una de las muestras, adicionalmente se encuentra que los pozos restantes tienen una media de 2.74 Bq/L, 2.03 Bq/L, 3.03 Bq/L y 3.50 Bq/L respectivamente con un dato atípico superior de todos los pozos inferior a 5.1 Bq/L evidenciando que ninguna de las muestras tiene tendencia a exceder el límite de vertimiento legal.

Figura 24.

Muestras con actividad entre 1,9 y 56 Bq/L.

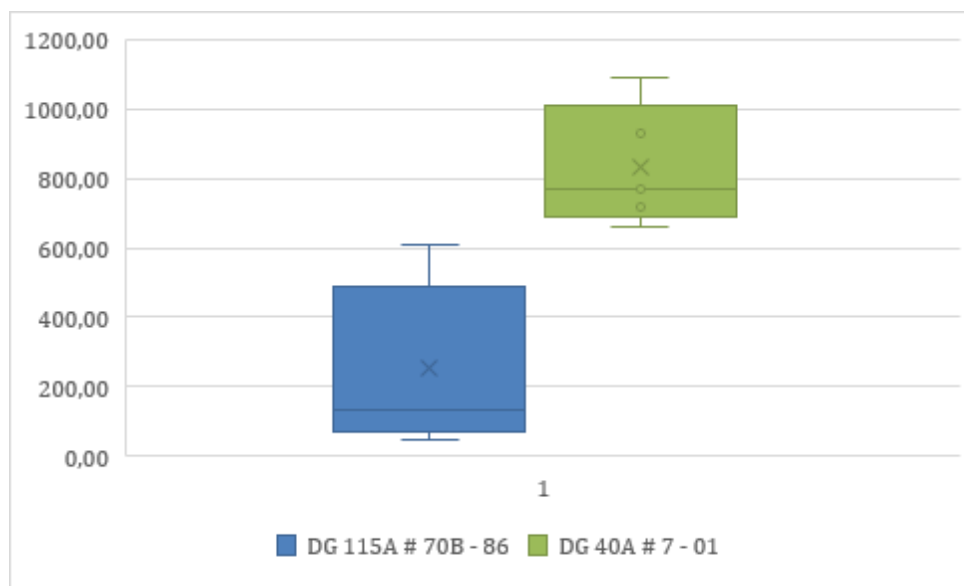


Nota. Se muestra el conjunto de pozos de actividad intermedia detectada y el límite legal permisible de vertimiento a alcantarillado.

En la figura 24 se encuentran dos pozos con media de 8.08 Bq/L y 11.58 Bq/L respectivamente, los valores atípicos de estos pozos son cercanos al tercer cuartil de los datos y tienen mayor cercanía al límite legal de vertimiento; por otro lado, el pozo de la calle 5 # 21- 88 supera el límite legal con media de 48.11 Bq/L y el menor valor de actividad detectado se mantiene aproximadamente 29 Bq/L por encima del permisible.

Figura 25.

Muestras con actividad entre 48 y 1100 Bq/L.



Nota. La figura muestra el conjunto de pozos de mayor actividad detectada.

Finalmente, en la figura 25 se encuentran dos pozos con media 264.24 y 841.36 Bq/L respectivamente, ambos pozos superan el límite legal de vertimiento en todas sus muestras; donde el valor atípico menor de los pozos supera el límite por aproximadamente 29 Bq/L. Así pues, se establecen las zonas con actividad del radioisótopo ^{131}I categorizadas de la siguiente manera:

Tabla 15.

Categorización de los pozos según los resultados

No detectable	Dentro del Nivel de Dispensa Autorizada	Mayor al Nivel de Dispensa Autorizada
	CL 165 # 14D – 13	
	CL 114 # 21 – 01	
	CL 108 # 48 – 65	DG 40A # 7 – 01
KR 56 # 127D – 75	CL 139 BIS # 126C – 03	DG 115A # 70B – 86
CL 127 # 48 – 14.	CL 90 # 64 – 8	CL 5 # 21 - 88
	CL 78B # 119 – 02	
	DG 61D # 28 – 99	
	CL 49A # 28 BIS – 11	

Nota. Se observan los trece puntos muestreados dentro de la clasificación correspondiente según lo indicado en la sección 4.3.1

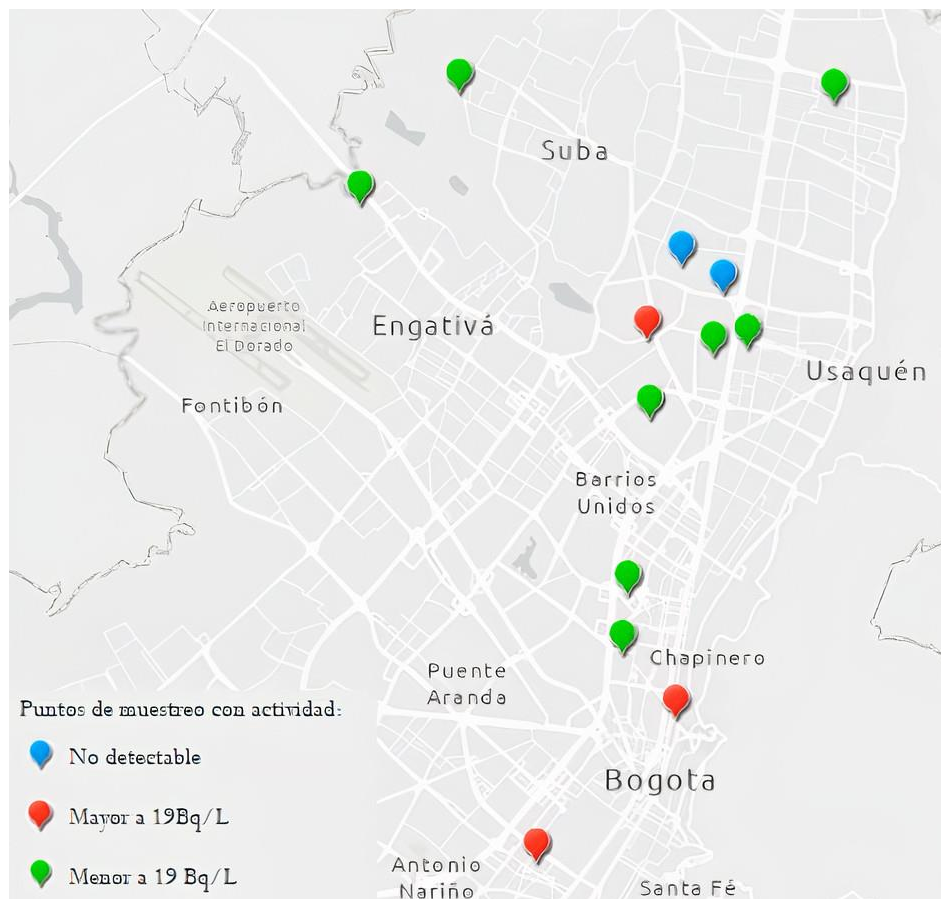
La primera categoría se refiere a no detección en ninguna de las tres muestras, la segunda categoría comprende aquellos pozos en los que se presenta detección en alguna de las muestras y ninguna de ellas está por encima de 19 Bq/L, por último, en la tercera categoría se incluyen aquellos pozos en los que al menos una de las muestras presenta actividad por fuera del límite legal de vertimiento. Por tanto, la categorización se distribuye de la siguiente manera:

4.3.2. Demarcación de las zonas

Dado que los pozos son independientes entre sí y los resultados obtenidos incluyen pozos con actividad no detectable, dentro y mayor al límite de dispensa autorizada, como se categorizaron en la tabla 15, se presenta la figura 26 con la ubicación de los 13 puntos de muestreo para ilustrar la distribución de la actividad de ^{131}I en la ciudad de Bogotá y posteriormente las principales conexiones de dichos pozos en la red de alcantarillado que descarga en la PTAR Salitre.

Figura 26.

Distribución de la actividad de ^{131}I entre los pozos



Nota. Representación de la distribución de resultados obtenidos de A de ^{131}I .

Así pues, con base en la figura 26, se aprecia para toda la población en inmediaciones a los pozos marcados con rojo en los cuales se obtuvo actividad de ^{131}I mayor a 19 Bq/L, se tendrá una elevada dosis del radioisótopo desconociendo en primera instancia su potencial de dosis a la población, en estos casos se hace necesaria la realización de estudios posteriores para conocer las dosis recibidas a partir de escenarios específicos considerando los múltiples factores que intervienen incluido el transporte del radioisótopo por una columna de agua lo cual puede llegar a atenuar la radiación emitida según lo expuesto en la figura 1. Por otro lado, puesto que en los pozos marcados con verde también se detectó ^{131}I , pero con actividad menor a 19 Bq/L, se sabe entonces que la dosis del radioisótopo con posible afectación a la población en inmediaciones a estos pozos se encuentra aceptada por la normatividad colombiana con base a los niveles establecidos en la norma de la comisión Nacional de Energía Nuclear de Brasil, Resolución CNEN 167/14 [17].

La información de los diagramas de cajas y bigotes, presentados en las figuras 23, 24 y 25 de la sección 4.3.1, permiten obtener los datos promedios para estimar la actividad que puede llegar a recibir la población en los diferentes pozos:

Tabla 16.

Actividad media que afecta a la población en cada pozo

Ubicación del Pozo	Actividad Media [Bq/L]
DG 40A # 7 – 01	841.36
DG 115A # 70B – 86	264.24
CL 5 # 21 - 88	48.11
CL 49A # 28 BIS – 11	11.58
CL 114 # 21 – 01	8.08
CL 165 # 14D – 13	4.17
CL 78B # 119 – 02	3.50
CL 90 # 64 – 8	3.03
CL 108 # 48 – 65	2.74
CL 139 BIS # 126C – 03	2.03
DG 61D # 28 – 99	1.10

Nota. La tabla presenta en orden descendente el promedio de actividad de ^{131}I recibida por la población.

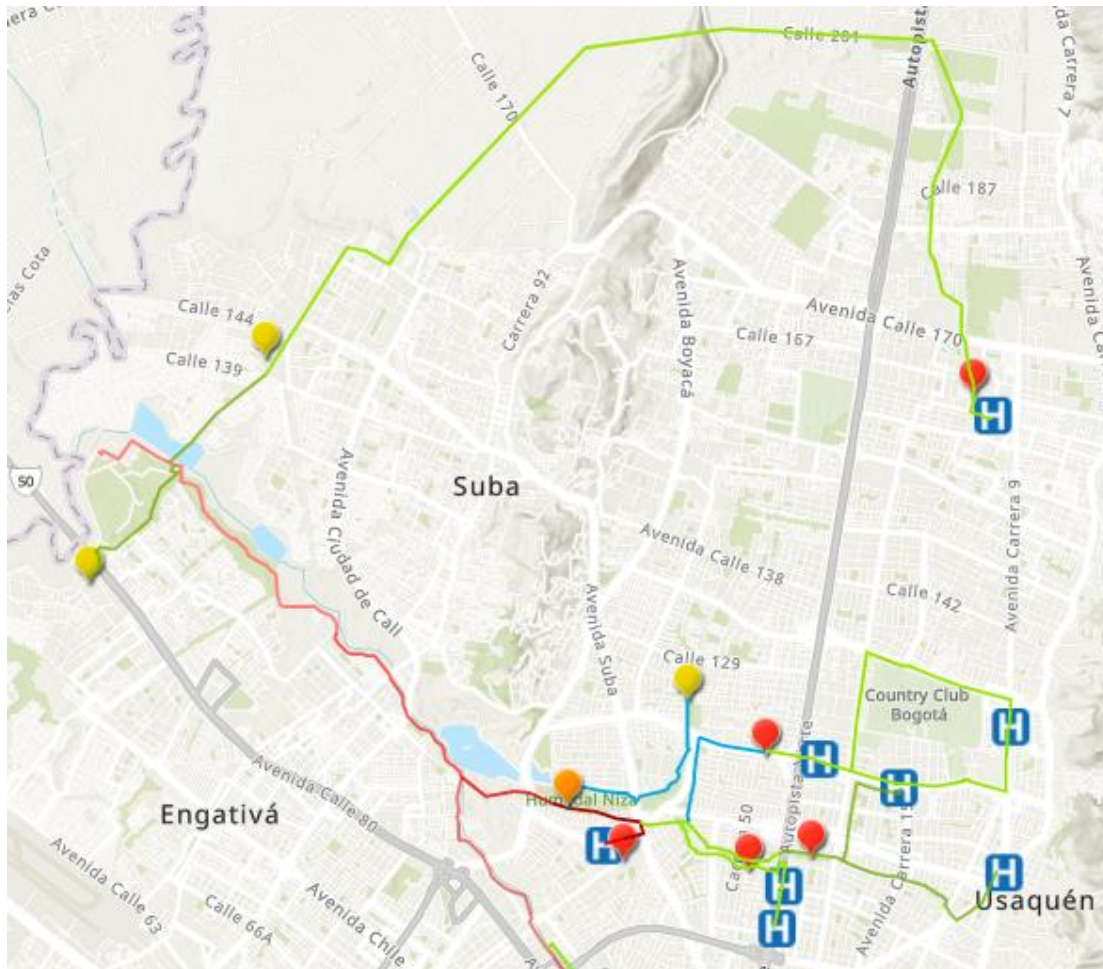
Las actividades medias presentadas en la tabla 16 generan potencialmente una afectación en los diferentes grupos poblacionales sobre las personas que se desplazan por dichos lugares al encontrarse ubicados en la zona urbana, algunos de ellos contiguos a conjuntos residenciales, parques, hospitales, instituciones públicas, CAI, vías arteriales, centros educativos y lugares comerciales. Las afectaciones presentadas por una sobreexposición a la radiación gamma pueden desencadenar algunos tipos de cáncer por alteraciones en el ADN [70], lo cual puede llegar a generar costos a la salud entre 12 y 75 millones de pesos según el tipo de tratamiento [71]. Sin embargo, los costos en la salud asociados a la degradación ambiental aun no contemplan específicamente los efectos por la radiación ionizante presente.

Posteriormente se procede a esquematizar las principales redes interconectadas partiendo desde las instituciones autorizadas hasta la PTAR Salitre (pasando por los pozos de muestreo), destacan las uniones de la red troncal en las que se afecta la actividad de ^{131}I al transportar mayor cantidad de agua sanitaria. Dado que no es posible estimar el caudal de las tuberías ya que se requiere gran cantidad de información adicional incluyendo el número de predios, la densidad poblacional y el área aferente, el consumo diario de agua y la cantidad de habitantes por vivienda [72].

Las figuras 27 y 28 presentan las conexiones a la red troncal de alcantarillado sanitario proveniente de los pozos inspeccionados ubicados en las zonas norte y occidental y en las zonas oriental y central de la ciudad respectivamente. En dichas figuras se distingue una gama de colores en donde las tonalidades más oscuras de rojo hacen referencia a la mayor actividad detectada que supera el límite de vertimiento y se reduce la tonalidad del color a medida que se evidencian principales conexiones a la red troncal esperando en estos puntos una dilución del radioisótopo debido a una mayor cantidad de agua proveniente de otras redes locales; las tonalidades más oscuras de verde hacen referencia a las actividades detectadas cercanas pero menores a 19Bq/L reduciendo su tonalidad conforme se espera una reducción en la actividad de ^{131}I ; finalmente, el tono azul hace referencia a las redes en las que no se espera detección de actividad en base a los resultados de los pozos medidos.

Figura 27.

Conexiones de red sanitaria de alcantarillado parte 1

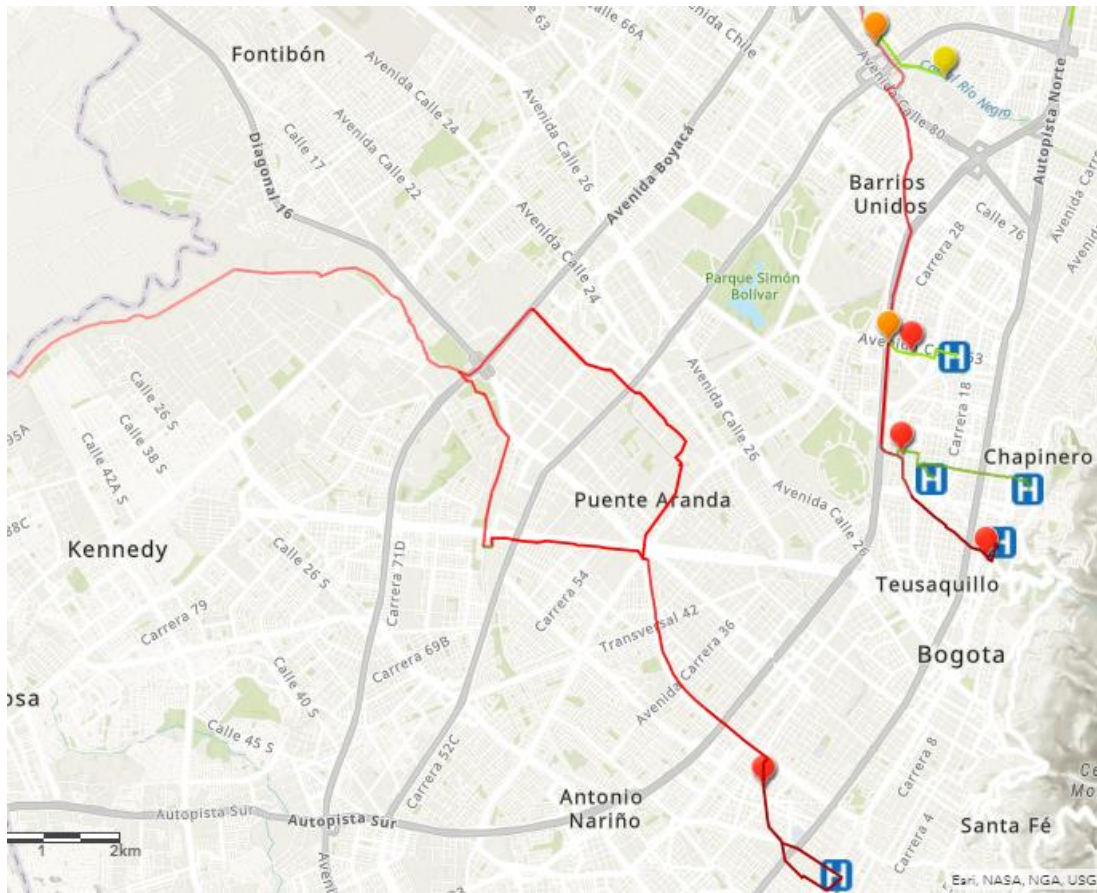


Nota. Trayectoria del ^{131}I en la zona norte y occidental de la ciudad en la red troncal de alcantarillado hasta la PTAR con variación de color según la estimación en la actividad.

En la figura 27 cabe resaltar la existencia de un pozo ubicado en la intersección entre la carrera 71C y la calle 117B en donde se espera detección de ^{131}I al conectar las redes de agua sanitaria provenientes de la DG 115A # 70B – 86, CL 114 # 21 – 01, CL 127 # 48 – 14, CL 108 # 48 – 65 y KR 56 # 127D – 75. Como se presentó en la tabla 11, la mayor actividad de ^{131}I de esta zona se detecta en el pozo ubicado en la DG 115A # 70B – 86 generando una incidencia del radioisótopo sobre toda la red disminuyendo su valor de actividad conforme se dirige a la PTAR al combinarse con otras redes locales, en esta intersección no se espera aumento de la actividad de ^{131}I al no presentar u obtener bajos niveles de actividad detectada menor a 19 Bq/L en los demás pozos de esta zona, presentando además dilución por conexiones con otras redes locales antes de este punto.

Figura 28.

Conexiones de red sanitaria de alcantarillado parte 2



Nota. Trayectoria del ^{131}I en la zona centro y oriente de la ciudad en la red troncal de alcantarillado hasta la PTAR Salitre y de la institución de referencia con el pozo inspeccionado hasta el río Bogotá.

En la figura 28 se presentan dos intersecciones de estudio ubicados en la Av. Ciudad de Quito con Calle 77 y la carrera 68 con calle 87. La primera intersección conecta las redes de agua sanitaria provenientes de los pozos ubicados en CL 49A # 28 BIS – 11, la DG 40A # 7 – 01 y la DG 61D # 28 – 99 con detección de ^{131}I en todos ellos de tal forma que, en dicha intersección se espera menor dilución que la intersección presentada en la figura 27, al presentar menor cantidad de conexiones a la red troncal provenientes de diferentes redes locales hasta este punto, con actividad del radioisótopo mayor a 19Bq/L debido a la actividad detectada en DG 40A # 7 – 01; la segunda intersección conecta las redes de agua sanitaria provenientes del pozo mencionado anteriormente además del zonal de la CL 90 # 64 – 08 que tuvo detección de ^{131}I , añadiendo en dicho punto actividad de ^{131}I a la red troncal de alcantarillado sin importantes conexiones previas que permitan la dilución del radioisótopo.

Finalmente, a pesar que el pozo ubicado en la CL 5 # 21 – 88 no presenta conexión a la PTAR, fue inspeccionado en base al argumento presentado en la sección 2.1.2, y tiene un recorrido directo esperando dilución debido a las conexiones en la red de alcantarillado que se presentan a lo largo del trayecto hasta la cuenca media del río Bogotá llegando a los valores obtenidos por L. Ospina, 2018 [12].

Lo anterior amplía la información sobre las instituciones que incumplen la normatividad colombiana sobre los límites de vertimiento de ^{131}I al alcantarillado con base en la resolución 41178 de 2016 y, especifica las conexiones en la red de alcantarillado sanitario que por afectación de caudal conllevan a los resultados obtenidos en la investigación realizada por E. Mora y D. Tello, 2020 en donde se obtuvo actividad de ^{131}I en agua cruda a la entrada de la PTAR de 22.29 Bq/L.

5. COSTOS ASOCIADOS AL MONITOREO

Los costos asociados al monitoreo del ^{131}I en las zonas que se detectó actividad del radioisótopo en el sistema de alcantarillado, con conexión a las instalaciones analizadas en este documento y las conexiones de los pozos sectorizados, se presentan para que el SGC pueda presupuestar un control radiológico y dar cumplimiento a la normatividad colombiana; se plantea un plan de monitoreo con respecto a los resultados encontrados en la campaña realizada.

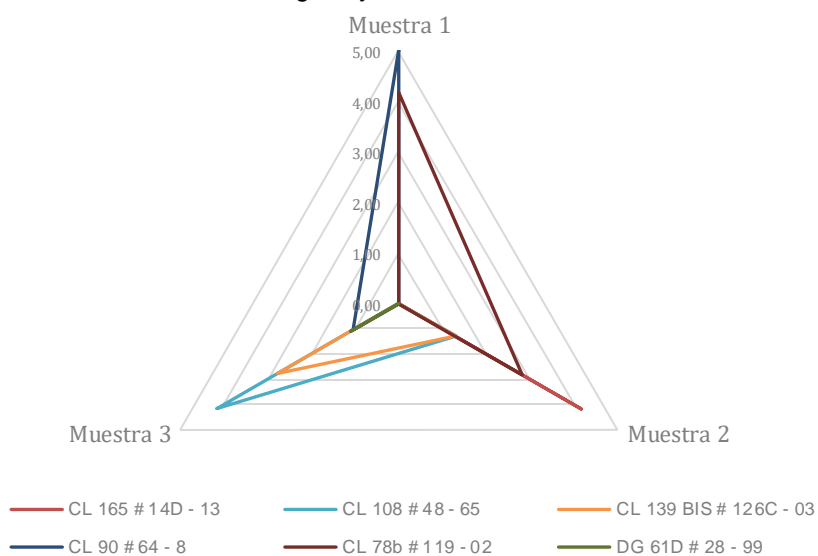
El plan de monitoreo se establece teniendo en cuenta únicamente los pozos en los que se tuvo detección del radioisótopo en al menos una de las muestras recolectadas o de igual forma, aquellas previamente categorizadas como *Dentro del nivel de dispensa autorizada y/o Mayor al nivel de dispensa autorizada*. Las muestras en dichas categorías se clasifican considerando que al menos 2 de las 3 muestras de cada pozo (representando el 66% de los datos) deben compartir el mismo nivel de acuerdo a la siguiente clasificación según la actividad detectada:

- Riesgo bajo: menor a 5,1 Bq/L
- Riesgo moderado: entre 5,1 y 19 Bq/L
- Riesgo elevado: mayor a 19 Bq/L

Se organiza la información según el nivel de riesgo planteado y se presenta en las figuras 29, 30 y 31 para los pozos ubicados en nivel de riesgo bajo, moderado y elevado respectivamente.

Figura 29.

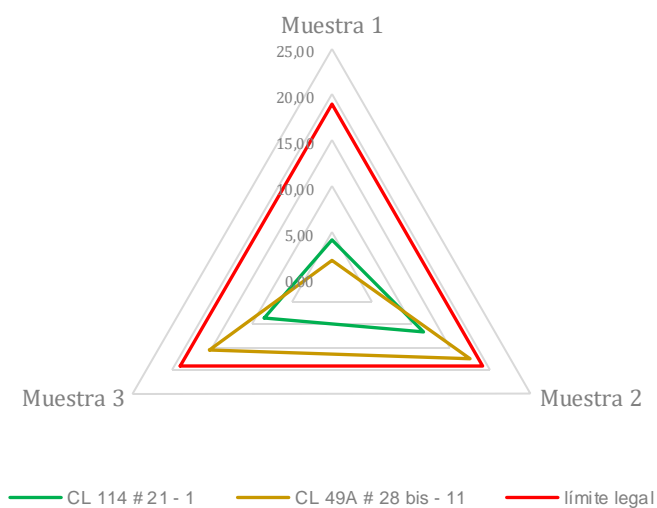
Zonas con clasificación riesgo bajo



Nota. Pozos inspeccionados que presentan actividad menor a 5,1Bq/L. No se presenta el límite legal dada la lejanía que se presenta de 19 Bq/L.

Figura 30.

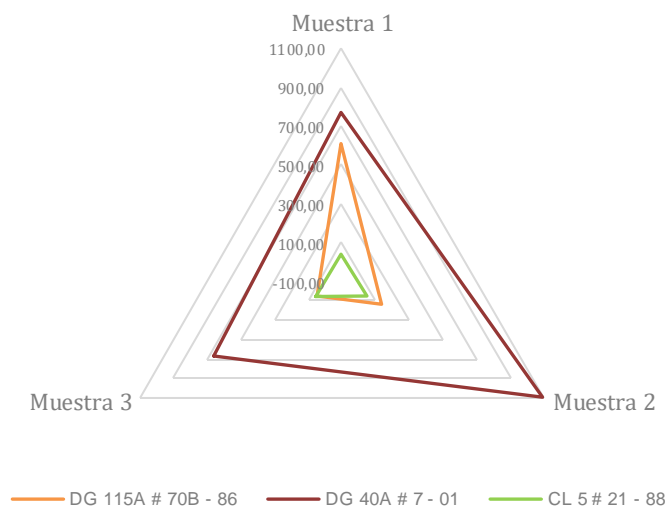
Zonas con clasificación riesgo moderado



Nota. Se muestran los pozos que presentan actividad entre 5,1Bq/L y 19 Bq/L y el límite legal de 19 Bq/L en donde se evidencia que el 66% de los datos de cada pozo se acerca al límite legal de dispensa permitido.

Figura 31.

Zonas con clasificación riesgo elevado



Nota. Pozos inspeccionados que presentan actividad mayor a 19 Bq/L.
Los datos se encuentran por fuera del límite legal de dispensa permitido.

5.1. Definición del Plan de Monitoreo

Este plan de monitoreo contempla el mismo número de muestras por pozo que se realizaron en el presente documento con el fin de tener resultados representativos bajo los criterios discutidos anteriormente en el capítulo 2. La frecuencia de monitoreo se propone en base a los siguientes factores:

- Según las épocas de precipitaciones que se clasifican trimestralmente en Colombia (observados particularmente en la Región Andina) presenta los menores niveles de precipitación en los trimestres 1, 6, 11 y 12 representados de la siguiente forma respectivamente: Enero – Febrero - Marzo, Junio – Julio - Agosto, Noviembre – Diciembre - Enero y Diciembre – Enero - Febrero [73]. Lo anterior concuerda con la tabla 8 del histórico en la ciudad de Bogotá con excepción del mes de noviembre.
- Según la clasificación mencionada al inicio del capítulo 5 que se refiere a los criterios para la construcción de las figuras 29, 30 y 31 sobre las zonas con actividad en riesgo bajo, moderado y elevado ya que no se requiere ejercer la misma frecuencia de control radiológico.

Siendo así, se proponen monitoreos anuales durante el primer o tercer trimestre del año para los pozos con clasificación de riesgo bajo; semestralmente en el primer y tercer trimestre del año para los pozos con clasificación de riesgo moderado y finalmente, muestreos trimestrales para los pozos con clasificación de riesgo elevado. De este modo, se obtienen 3, 6 o 12 muestras por pozo anualmente según la clasificación en que se ubique de riesgo bajo, moderado o elevado respectivamente.

Se debe mantener la estructura de la metodología de muestreo en donde se muestrean los días jueves y viernes en el horario de 9 a.m. a 11 a.m. con intervalos de 1 hora entre las muestras tomadas. Para ejercer un buen control en cada una de las zonas, se plantea construir un histórico de los muestreos realizados en cada pozo con el fin de analizar los cambios en cualquiera de estos y llegar a clasificar zonas para que cada una de las instituciones cumpla con el límite de vertimiento permitido.

Adicionalmente, se consideran los siguientes aspectos primordiales a tener en cuenta para calcular los costos del plan de monitoreo propuesto que permite ejercer control radiológico sobre las zonas estudiadas.

5.1.1. Prueba de identificación

La prueba de identificación de radionúclidos que presentan emisión gamma en muestras de agua ofrecida por el laboratorio de radiometría ambiental (LRA) del SGC se basa en la respuesta del detector proporcional a la energía e intensidad de los fotones incidentes. Dicha prueba tiene un costo unitario de \$628,990 COP que incluye el análisis de la muestra en el detector de Ge-HP con el informe de resultados [74] y se debe solicitar siguiendo las instrucciones disponibles en la página web oficial del SGC.

5.1.2. Transporte

Puesto que los puntos se encuentran distribuidos por la ciudad, se hace necesario contemplar los costos de transporte del personal encargado del muestreo y en caso de ser requerido (según las condiciones de un posible convenio como se menciona en la sección 5.1.4) del vehículo asignado por EAAB-ESP. Los costos del transporte asociados al personal encargado del muestreo se basan en el valor unitario de pasaje en el sistema de transporte masivo para el año 2021.

5.1.3. Personal requerido

Considerando la labor a realizar, se requieren 2 personas que puedan llevar a cabo el proceso asegurando el cumplimiento de las etapas en el procedimiento de muestreo que incluyen las mediciones y apreciaciones, el valor por hora de trabajo se calcula con base a la información obtenida para el salario de un ingeniero químico recién egresado a partir de la información presentada por el portal ZipRecruiter [75] con la TRM del día 21 de julio de 2021 disponible en el portal web del Banco de la Republica (\$ 3,855) [76]. De igual forma, se requiere acompañamiento de al menos 1 persona vinculada a la EAAB-ESP que debe estar presente durante la cantidad de horas totales de muestreo desde el cierre hasta la reapertura del espacio intervenido.

5.1.4. Insumos

Para el análisis de costos no se consideran los insumos reutilizables tales como cuerdas, uniones, balde, tubos de PVC, flexómetro, entre otros puesto que no representan un gasto significativo en cada una de las muestras sino que se requiere única inversión durante toda la campaña de muestreo y pueden ser cubiertos por el presupuesto de imprevistos presentado en la sección 5.4; por tal motivo, se consideran aquellos insumos empleados no reutilizables y que generan un gasto fijo adicional por cada muestra analizada como es el caso de los frascos plásticos marca Kartell de 500 ml (ref. 1627) y el papel de microfibras de vidrio 934-AH (ref. 1827-047) suministrados por Norquímicos [77] (Anexos 13 y 14 respectivamente) para la recolección y acondicionamiento de las muestras, los recipientes G3 (ref. 1827) que ingresan al detector y son provistos por la comercializadora *Duque Saldarriaga* [78] y el HCl cotizado en la multinacional Merck (Anexo 15) ya que es una sustancia controlada por el Ministerio de Justicia y del Derecho de Colombia.

Tabla 17.

Costo insumos consumibles por muestra analizada

Descripción	Costo Venta	Unidades ⁻¹	Costo Unitario	Unidades ⁻¹	Cant. (ml)	Cant. (und)	Valor Total
HCl	\$ 93,000	L	\$ 93	ml	2	-	\$ 186
Geometría G3	\$ 38,500	caja	\$ 385	und	-	1	\$ 385
Fracos 500 ml	\$ 14,637	und	\$ 14,637	und	-	1	\$ 14,637
Papel fibra de vidrio	\$ 255,374	caja	\$ 2,554	und	-	2	\$ 5,107
Costo total							\$ 20,315

Nota. Se presenta el costo total de insumos no reutilizables por muestra tomada y acondicionada

5.1.5. Convenios

Dada la necesidad de apoyo logístico y operativo por parte de la EAAB-ESP, se hace necesario establecer un convenio a mediano o largo plazo que permita facilitar los procesos para la movilización de unidades de la entidad a los puntos de muestreo seleccionados para realizar las labores de cierre en los espacios intervenidos.

Adicionalmente, dado que la EAAB-ESP también adelanta programas de control a diversos contaminantes que son vertidos en las redes de alcantarillado, se facilitaría las labores y posible expansión del plan de muestreo donde la accesibilidad y seguridad puede dificultar las labores de ejecución en la metodología planteada.

5.2. Costo por Día de Campaña

A continuación, se presenta el resumen de costos por día de muestreo calculado en base a la campaña realizada y se asume (al igual que se dio en la campaña), la existencia de un convenio o acuerdo con la EAAB-ESP para contar con personal de acompañamiento y vehículos de la empresa sin incurrir en gastos sobre los mismos.

Tabla 18.

Costo por día de campaña

Descripción	Valor Unitario	Unidades ¹	Cantidad Personas	Cantidad	Valor Total
Salario hora IQ	\$ 115.650	h	2	3	\$ 693,900
Prueba identificación radionúclidos	\$ 628,990	repetición	-	3	\$ 1,886,970
Transporte	\$ 2,500	repetición	2	3	\$ 15,000
Insumos	\$ 20,315	repetición	-	3	\$ 60,946
Costo total diario					\$ 2,656,816

Nota. Costo total por pozo inspeccionado y analizado o día de campaña completado

5.3. Costos Anuales Totales

Dado que se establece el plan de monitoreo según la clasificación del nivel de riesgo y su frecuencia de muestreo, los costos anuales acordes a estos contemplando las zonas agrupadas se presentan a continuación

En la clasificación de riesgo bajo se han catalogado 8 pozos de inspección, se propone, como ya se mencionó, frecuencia de muestreo anual debido a la baja actividad de ¹³¹I presentados en la figura 29 y se mencionan a continuación:

- CL 165 # 14D – 13
- CL 108 # 48 – 65
- CL 139 BIS # 126C - 03
- CL 90 # 64 - 08
- CL 78B # 119 - 02
- DG 61D # 28 - 99

En la clasificación de riesgo moderado se han catalogado 2 pozos de inspección y se propone, como ya se mencionó, frecuencia de muestreo semestral debido a la cercanía en los niveles de actividad de ¹³¹I respecto al límite legal de vertimiento (19 Bq/L), presentados en la figura 30 y que se mencionan a continuación:

- CL 114 # 21 – 01
- CL 49A # 28 bis – 11

En la clasificación de riesgo elevado se han catalogado 3 pozos de inspección y se propone, como ya se mencionó, frecuencia de muestreo trimestral puesto que superan el límite legal permitido en Colombia para vertimientos de ¹³¹I al alcantarillado (19 Bq/L) y, por tanto, se debe ejercer control radiológico en las instituciones recolectadas en los pozos de la figura 31 y que se mencionan a continuación:

- DG 115A # 70B - 86
- DG 40A # 7 - 01
- CL 5 # 21 – 88

Tabla 19.

Costo anual de monitoreo

Descripción	Cantidad de Pozos	Repeticiones al Año	Costo Unitario Diario	Valor Total
Clasificación de riesgo bajo	6	1	\$ 2,656,816	\$ 15,940,899
Clasificación de riesgo moderado	2	2	\$ 2,656,816	\$ 10,627,266
Clasificación de riesgo elevado	3	4	\$ 2,656,816	\$ 31,881,797
Costo anual				\$ 58,449,962
Imprevistos (6%)				\$ 3,506,998
Costo total anual				\$ 61,956,959

Nota. Costo total anual plan de monitoreo y costos por clasificación de nivel de riesgo de las muestras

Se tiene entonces un coste total anual de \$ 61,956,959 COP para cubrir el plan de monitoreo propuesto el cual, sería asumido por el SGC teniendo en cuenta que los costos del personal y vehículos asociados a la EAAB-ESP se contemplarán según los convenios (sugerido en la sección 5.1.5) que se lleguen a establecer con esta entidad.

CONCLUSIONES

Se estructura una metodología de muestreo para pozos de inspección de la red de alcantarillado sanitario que permite medir la actividad de ^{131}I vertido debido a los tratamientos con medicina nuclear, considerando factores que afectan la detección del radioisótopo como precipitaciones en el año y caudal en la tubería.

Se detecta actividad de ^{131}I (a partir de la caracterización de cada muestra por espectrometría gamma) en 3 pozos zonales y 8 con recolección de aguas sanitarias provenientes de instituciones autorizadas para el uso del mismo, de los cuales, 2 de ellos tienen descargas con actividad mayor a 19 Bq/L en conexión a la PTAR Salitre, y uno más sobre el río Bogotá que también supera el límite legal de vertimiento.

La caracterización de zonas con actividad de ^{131}I permite establecer además incidencia en espacios aledaños a parques, hospitales, colegios, CAI, universidades, vías arteriales y zonas residenciales de la zona centro, norte, oriental y occidental de Bogotá, con descarga a la PTAR Salitre, por la radiación gamma emitida.

Se concluye que las acumulaciones de ^{131}I en la PTAR Salitre no provienen de los desechos generados por los pacientes ambulatorios tratados con ^{131}I puesto que, no aportan la mayor cantidad de actividad del radioisótopo como si lo hacen las instituciones con tratamientos de medicina nuclear.

El monitoreo propuesto prevé costos anuales que ascienden a \$ 61,956,959 COP donde se contempla el establecimiento de un convenio con la EAAB- ESP y la realización de 66 pruebas de identificación de radioisótopos distribuidas entre los pozos con detección de ^{131}I según la clasificación de riesgo por nivel de actividad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de educación, Gobierno de España. (s.f). “Actividad”.
- [2] Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Alcantarillado Sanitario, SIAPA., México, 2014, pp. 1-38. [En línea]. Disponible: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_3_alcantarillado_sanitario.pdf
- [3] Sociedad nuclear española. (s.f.). Diccionario nuclear. <https://www.sne.es/diccionario-nuclear/bequerelio/>
- [4] M. C. Zepeda M., “*Perfeccionamiento del proceso de obtención del ^{131}I del ^{131}I mediante estudios de diseño del equipo y ajustes de parámetros del proceso en el simulador*”, tesis pre. Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2006.
- [5] Sociedad nuclear española. (s.f.). Diccionario nuclear. <https://www.sne.es/diccionario-nuclear/electronvoltio/>
- [6] Real Academia Española. (2020). Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/espectro>
- [7] Laboratorio de Física Nuclear y de Partículas, “Espectroscopia con un detector NaI(Tl)” Valencia, España. [PDF]. Disponible: http://mural.uv.es/ferhue/4o/fnp/labfnp_p2.pdf Acceso: may,02,2021.
- [8] R. Boqué, “El límite de detección de un método analítico” Tarragona, España. [PDF]. Disponible: <http://www.quimica.urv.cat/quimio/general/lod.pdf>. Acceso: may,12,2021.
- [9] Ministerio de Minas y Energía. (s.f). “Guía para la gestión de desechos radiactivos producidos en medicina nuclear clase 2 (muy baja actividad)”.
- [10] E. Y. Barbosa P., D. F. García S., D. A. García R., *Descripción técnica del proceso constructivo de alcantarillado del municipio de Cumaral.*, tesis pre. Facultad de ingenierías, Universidad Cooperativa de Colombia, Villavicencio, Colombia, 2013.

- [11] Real Academia Española. (2020). Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/radiactividad>
- [12] L. A. Ospina P., *Propuesta para la determinación del radio de incidencia del ¹³¹I a Través de una metodología de muestreo en la cuenca media del río Bogotá*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018.
- [13] Lanent, "Decaimiento radiactivo - vida media". [PDF]. Disponible: https://www.lanentweb.org/sites/default/files/docs/pdfs_nucleando/33_Anexo_Decaimiento_radiactivo_vida_media.pdf Acceso: abr,26,2021.
- [14] J. F. Mosos P., *Guía técnica para el establecimiento de programas de gestión segura de desechos radiactivos en Colombia*, tesis maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2018.
- [15] C. on T. S. R. to I.-131 Exposure, C. on E. of the A. P. to I.-131 from the N. A. B. Tests, C. on L. Sciences, I. of Medicine, D. on E. and L. Studies, y N. R. Council, *Exposure of the American People to Iodine-131 from Nevada Nuclear-Bomb Tests: Review of the National Cancer Institute Report and Public Health Implications (Google eBook)*. 1999.
- [16] E. T. Mora C., C. D. Tello R., *Propuesta para la remoción de ¹³¹I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la PTAR Salitre*, tesis pre. Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020.
- [17] Ministerio de Minas y Energía. (Diciembre 2, 2016). "Resolución número (41178) de 2016".
- [18] Lenntech, "Iodine-I". Lenntech, [En línea]. Disponible: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/i.htm#Iodine>. [Acceso: Ene. 20, 2021].
- [19] Agencia para sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, "ToxFAQs™ - Yodo (Iodine)". ATSDR, [En línea]. Disponible:

https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts158.html [Acceso: Ene. 25, 2021].

- [20] M. Hernández Stegmann, M. Rendon Villa y M. Mesa Marrero. (2019). Fisiología de las Glándulas tiroides y paratiroides. [En línea]. Disponible en: <https://seorl.net/PDF/cabeza%20cuello%20y%20plastica/140%20-%20FISIOLOG%C3%8DA%20DE%20LAS%20GL%C3%81NDULAS%20TIRROIDES%20Y%20PARATIROIDES.pdf>.
- [21] American Thyroid Association, “Deficiencia de Yodo”. American Thyroid Association, [En línea]. Disponible: https://www.thyroid.org/wp-content/uploads/patients/brochures/espanol/deficiencia_de_yodo.pdf [Acceso: May. 18, 2021].
- [22] National Institute of Health Office of Dietary Supplements, “Yodo”. National Institute of Health Office of Dietary Supplements, [En línea] <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Iodine-DatosEnEspanol/> [Acceso: Feb. 05, 2021].
- [23] Consejo de seguridad Nuclear, “Las radiaciones”. Consejo de seguridad Nuclear, [En línea]. Disponible: <https://www.csn.es/documents/10182/bb15bfe3-dcbf-4bac-84d5-37dce5db6f1d> [Acceso: Feb. 05, 2021].
- [24] Federación de Enseñanza de Andalucía, “Introducción Definiciones Clasificación de las radiaciones ionizantes”, *Rev. Digit. Para Prof. La Enseñanza*, vol. 4, núm. 1989–4023, pp. 1–15, 2009. [En línea]. Disponible: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd5396.pdf> [Acceso: febrero 10, 2021].
- [25] R. Cherry. (2012). “Radiaciones ionizantes”. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/3672701-Radiaciones-ionizantes.html>
- [26] Universidad pública de Navarra. (s.f.). “Radiaciones ionizantes”. En línea. http://www.unavarra.es/digitalAssets/146/146686_100000Radiacionesionizantes.pdf. [Acceso: febrero 10, 2020].

- [27] K. Bengt. (1998). "Radiaciones no ionizantes". [En línea]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+49.+Radiaciones+no+ionizantes>
- [28] Red Latinoamericana para la Educación y la Capacitación en Tecnología Nuclear, "Radioisótopos". LANENT, [En línea]. Disponible: https://www.lanentweb.org/sites/default/files/docs/pdfs_nucleando/14_Radioisotopos.pdf. [Acceso Feb. 20, 2021].
- [29] M López- Tolentino, "Isótopos y radioisótopos", *Vida Científica*, vol. 8, no.16, pp. 33-36, jul, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/6132/7377> [Acceso: febrero 23,2021].
- [30] S. Henriques, "Siete cosas que hay que saber sobre los radioisótopos", *OIEA Organismo Internacional de Energía Atómica.*, vol. 55, n.º4, pp. 8-9, 2014. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6227343> [Acceso: febrero 23, 2021].
- [31] L. C. Alba Martínez., *Medición de límites de descarga para vertimientos generados en medicina nuclear*, tesis pre. Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica, Tunja, Colombia, 2015.
- [32] F. Mosos, A. Abadía, J. W. Gómez, y P. Casallas, "Montaje para la determinación in situ por espectrometría gamma de descargas líquidas de ¹³¹I en servicios de terapia", *rev. investig. apl. nucl.*, n.º 1, pp. 30-37, nov. 2017, Disponible: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/view/19>. [Acceso: marzo 03, 2021].
- [33] E. Rault, S. Vandenberghe, R. Van Holen, J. De Beenhouwer, S. Staelens, y I. Lemahieu, "Comparison of image quality of different iodine isotopes (I-123, I-124, and I-131)", *Cancer Biother. Radiopharm.*, vol. 22, núm. 3, pp. 423–430, 2007, DOI: 10.1089/cbr.2006.323 [Acceso: marzo 07, 2021].

- [34] A. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, "Toxicological Profile for Iodine", Atlanta, Estados Unidos, abr, 2004. [PDF]. Disponible: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp158.pdf> Acceso: mar,07,2021.
- [35] J. Kunst, M. Rodríguez y I. Sadañowski. "Evaluación de las Consecuencias Radiológicas en una Emergencia Nuclear en Argentina" Buenos Aires, Argentina. [PDF]. Disponible: <http://www.irpabuenosaires2015.org/Archivos/tr-completos/irpa/SADAIOWSKIconsecuenciasradiologicasemergencianuclear.pdf>. Acceso: mar, 19, 2021.
- [36] S. Menéndez y A. García, "Procedimiento de protección radiológica para la manipulación de fuentes no encapsuladas utilizadas en la instalación radiactiva central (IRC) de la facultad de medicina de la Universidad Complutense de Madrid (UCM)" Madrid, España, sept,2013. [PDF]. Disponible: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/256-2013-11-26-2013PROCEDIMIENTOS%20DE%20PROTECCI%C3%93N%20RADIOL%C3%93GICA%20Usuarios%20EN%20LA%20INSTALACI%C3%93N%20RADIATIVA%20CENTRAL.pdf>. Acceso: mar,12,2021.
- [37] Centro de investigaciones nucleares, "Espectrometría de radiación gamma". Centro de investigaciones nucleares, [En línea]. Disponible: http://www.cin.edu.uy/archivos/CBMRI/teorico_espectrometria_gamma.pdf. [Acceso: Mar. 12,2021].
- [38] Standard Practice for High-Resolution Gamma-Ray Spectrometry of Water, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, West Conshohocken, PA, 2014.
- [39] Instituto nacional de medicamentos. (2003). Farmacopea Argentina. (séptima edición) [En línea]. Vol. 01. Disponible: http://www.anmat.gov.ar/webanmat/fna/flip_pages/Farmacopea_Vol_I/files/assets/basic-html/page15.html
- [40] J. P. Peña, "Plan de manejo para el laboratorio de espectrometría gamma, las instalaciones para almacenamiento temporal de desechos y fuentes radiactivas en desuso y el laboratorio secundario de calibración; ubicado en

ingeminas sede CAN” Bogotá, Colombia,2005. [PDF]. Disponible: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10976/Proyecto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Acceso: mar,12,2021.]

[41] L. F. Guarín, *Calibración del espectrómetro gamma en eficiencia absoluta con el programa Hypermet- PC*, tesis esp. Facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 2016.

[42] M. Rodríguez Villafuerte., H. Alva Sánchez., T. Murrieta., “Espectroscopia gamma con LaBr₃ y LYSO para su aplicación en medicina nuclear”, *Revista Mexicana de física*, vol.57, no. 1, pp 91-97, nov,2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v57n1/v57n1a15.pdf> [Acceso: Marzo 11,2021].

[43] Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá, “Buen uso del sistema de alcantarillado”. EAAB, [En línea]. Disponible: https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio_bogota/ptar-salitre/tratamiento-de-aguas-y-lodos-ptar-salitre/ [Acceso: Mar. 18,2021].

[44] Empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Bogotá, “Plan de Identificación Y Corrección de Conexiones Erradas Versión 02” Bogotá, Colombia, ago, 2017. [PDF]. Disponible: <http://www.orarbo.gov.co/es/documentacion-y-enlaces/listado/plan-de-identificacion-y-correccion-de-conexiones-erradas-version-02>. Acceso: Mar,18,2021.

[45] Empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Bogotá, “Informe de Gestión Dirección Red Troncal de Alcantarillado EAB-ESP” Bogotá, Colombia, 2017. [PDF]. Disponible: https://wwwhttps://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasaluduis/article/view/8533/8445.acueducto.com.co/wps/html/resources/2017/INFORME_GESTION_DRTA2017_PAAC.pdf Acceso: Mar,18,2021.

[46] Acueducto y alcantarillado. (s.f). “Sistemas de drenaje”. EAAB, [En línea]. Disponible: <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y->

alcantarillado/la%20infraestructura%20de%20alcantarillado/sistema%20de%20drenaje/. [Acceso: marzo 21, 2021].

[47] Acueducto y alcantarillado. (s.f). "PTAR Salitre". EAAB, [En línea]. Disponible: <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio-bogota/ptar-salitre>. [Acceso: marzo 21, 2021].

[48] United States Nuclear Regulatory Commission. (2021). "Iodine-131". United States Nuclear Regulatory Commission, [En línea]. Disponible: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/appb/iodine-131.html> [Acceso: marzo 28, 2021].

[49] Ministerio de Minas y Energía. (Enero 23, 2008). "Resolución número (18 0052) de 2010".

[50] Ministerio de Minas y Energía. (Enero 5, 2010). "Resolución número (18 0005) de 2010".

[51] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Calidad del agua. muestreo. Directrices para el diseño de programas y técnicas de muestreo, Bogotá: ICONTEC, 1995.

[52] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Gestión ambiental. Calidad del Agua. Muestreo. Técnicas generales de muestreo, Bogotá: ICONTEC, 1995.

[53] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras, Bogotá: ICONTEC, 2004.

[54] Sociedad nuclear española. (s.f.). Diccionario nuclear. <https://www.sne.es/diccionario-nuclear/muestreo-ambiental/>

[55] Servicio Geológico Colombiano. (junio 23, 2021). "Instalaciones autorizadas para el empleo de material radiactivo"

- [56] IDEAM, “Promedios climatológicos 1981-2010”. IDEAM, [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima> [Acceso: Dic. 10, 2020].
- [57] Subdirección de Meteorología, “Análisis de las precipitaciones horarias en Colombia”, Bogotá, Colombia [PDF]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Horarios.pdf/f62fdf60-a35f-42b6-b8e8-4e8b5aca93d4>. Acceso: dic,18,2020.
- [58] Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. IDEAM, Bogotá, Colombia, 2007. [En línea]. Disponible: http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf. [Acceso: ene,11,2021]
- [59] Fischer Scientific, “Merck Millipore Bomba de presión y vacío para productos químicos”. Fischer Scientific, [En línea]. Disponible: <https://www.fishersci.es/shop/products/emd-millipore-chemical-duty-vacuum-pressure-pump-2/10555950?tab=alternates#tab8> [Acceso: Abr. 05, 2021].
- [60] LabChem, “Hydrochloric Acid, 37% w/w”, Pensilvania, EE.UU., 7, mar,2013. [PDF]. Disponible: <http://www.labchem.com/tools/msds/msds/75221.pdf> [Acceso: abr,15,2021]
- [61] D. F. Sosa, “Cilindros y superficies cuádricas” San Salvador, El Salvador. [PDF]. Disponible: https://www.academia.edu/6133586/Cilindros_y_Superficies_Cuadricas [Acceso: may,02,2021]
- [62] Hyperlabs software. (s.f). “HyperLabs Software New concepts in gamma spectroscopy”. [En línea]. <http://www.hlabsoft.com/index.php>. [Acceso: jun, 09, 2021].
- [63] H. Pérez. (18, abr,2001). “Resolución y eficiencia”. [En línea]. https://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/hector_p/node15.html. [Acceso: jun, 10, 2021]
- [64] Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, “Catálogo de estación Red Hidrometeorológica de Bogotá”. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y

- Cambio Climático, [En línea]. Disponible: <https://www.sire.gov.co/web/sab/informacion-hidrometeorologica>. [Acceso: May. 10, 2021].
- [65] A. M. Castillo Mejía, “Dinámica de la construcción por usos localidad suba” Bogotá, Colombia, 2013. [PDF]. Disponible: <https://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/archivos/suba.pdf> [Acceso: abr,18,2021]
- [66] M. I. Cogua Moreno, “Dinámica de la construcción por usos localidad Engativá” Bogotá, Colombia, 2013. [PDF]. Disponible: <https://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/archivos/engativa.pdf> Acceso: abr,18,2021.
- [67] R. H. Trujillo Corredor, “Dinámica de la construcción por usos localidad Usaquén” Bogotá, Colombia, 2013. [PDF]. Disponible: <https://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/archivos/usaqu%C3%A9n.pdf> Acceso: abr,18,2021.
- [68] R. H. Trujillo Corredor, “Dinámica de la construcción por usos localidad barrios unidos” Bogotá, Colombia, 2013. [PDF]. Disponible: <http://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/archivos/barrios%20unidos.pdf> Acceso: abr,18,2021.
- [69] DANE, “Proyecciones de población desagregadas por localidades 2018-2035 y UPZ 2018-2024”, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, [En línea]. Disponible: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion/proyecciones-de-poblacion-bogota> [Acceso: Abr. 30, 2021].
- [70] Instituto Nacional del Cáncer, “Factores de riesgo de cáncer”. Instituto Nacional del Cáncer [En línea]. Disponible: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/radiacion> [Acceso: jul. 21, 2021].
- [71] S. Barón, Y. Prada, N. Puerto y C. Vidal., *Estudio de costos de pacientes con*

morbilidad de alto costo (oncológicos) atendidos prioritariamente en el centro oncológico en los años 2011 y 2012 en Bogotá, tesis esp. Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia, 2013.

- [72] C. Amed, "Plan parcial BenforAlqueria avenida carrera 68 N° 39I-81 sur", Bogotá, Colombia, 13, may, 2019. [PDF]. Disponible: http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/acueducto_alcantarillado.pdf. Acceso: jun,23,2021.
- [73] C. Arango, J. Dorado, D. Guzman y J. F. Ruiz "Climatología trimestral de Colombia" Bogotá, Colombia. [PDF]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Climatolog%C3%ADa+Trimestral+para+Colombia+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/c2825963-c373-449a-a7cb-8480874478d9> Acceso: may,25,2021.
- [74] SGC, "Identificación de radionúclidos (Agua, Alimentos, Suelos, Minerales)". Servicio Geológico Colombiano, [En línea]. Disponible: <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/AsuntosNucleares/Paginas/Identificacion-de-Radionuclidos.aspx> [Acceso: may, 20, 2021].
- [75] ZipRecruiter, "Chemical Engineer Salary". ZipRecruiter. [En línea]. Disponible: <https://www.ziprecruiter.com/Salaries/Chemical-Engineer-Salary>. [Acceso: jul. 21, 2021].
- [76] Banco de la Republica, "Comportamiento del mercado del dólar durante el día (información en tiempo real). Banco de la Republica. [En línea]. Disponible: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/comportamiento-del-mercado-del-dolar-durante-el-dia-informacion-tiempo-real>. [Acceso: jul. 21, 2021].
- [77] Norquimicos, "Frascos en plástico con tapa rosca graduados Kartell". Norquimicos. [En línea]. Disponible: <http://norquimicos.com.co/producto/frascos-en-plastico-con-tapa-rosca-graduados-kartell/>. [Acceso: jul. 21, 2021].
- [78] Duque Saldarriaga, "TARRO X1.32 PP C/TAPA PRESIÓN ROJA-AZUL – GR6".

Duque Saldarriaga soluciones en envases, [En línea]. Disponible en: <https://envasesduque.com/producto/tarro-x1-32-pp-c-tapa-presion-roja-azul-2/> [Acceso: Jul. 27, 2021].

[79] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021, [PDF].

ANEXOS

ANEXO 1

**NORMA TÉCNICA
COLOMBIANA**

**NTC-ISO
5667-1**

1995-05-10*

**CALIDAD DEL AGUA.
MUESTREO. DIRECTRICES PARA EL DISEÑO DE
PROGRAMAS DE MUESTREO**



E: WATER QUALITY. SAMPLING GUIDANCE ON THE DESIGN
OF SAMPLING PROGRAMMES

CORRESPONDENCIA: esta norma es idéntica (IDT) por
traducción a la ISO 5667-1:1980 y
al Technical Corrigendum 1:1996

DESCRIPTORES: calidad del agua; análisis de agua;
muestreo; programa de muestreo.

I.C.S.: 13.060.45

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)
Apartado 14237 Bogotá, D.C. - Tel. 6078888 - Fax 2221435

Prohibida su reproducción

*Reaprobada 2002-12-20
Editada 2003-01-22

cajas de inspección profundas y, en tales casos, se requiere equipo diseñado especialmente para tal fin. Cuando se realice muestreo con cajas compactas de inspección (manhole), es preferible, por razones de seguridad, que dicha caja de inspección se diseñe de tal modo que se pueda efectuar el muestreo sin entrar.

También se debe considerar la posibilidad de que la muestra contenga aguas residuales domésticas procedentes de la fábrica; en este caso, el sitio se debe seleccionar de tal modo que se excluyan tales desechos, si es necesario.

Si la descarga del efluente es a un lago o tanque de depósito, entonces la situación de muestreo viene a ser similar a la correspondiente a lagos.

11.1 NATURALEZA DEL EFLUENTE

En algunas situaciones industriales (por ejemplo descargas de plantas individuales antes de la dilución adicional), las concentraciones de ciertos constituyentes pueden presentar dificultades especiales que exijan una consideración en particular. Son ejemplos la presencia de aceite o grasa, presencia elevada de sólidos en suspensión, afluentes altamente ácidos y líquidos o gases inflamables.

Cuando los efluentes de una diversidad de procesos se descargan en una cañería principal, se requiere un mezclado adecuado para obtener una muestra satisfactoria.

11.2 AGUA INDUSTRIAL Y LODOS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

En el tratamiento industrial de aguas se puede producir una amplia variedad de lodos químicos, por ejemplo los lodos pueden contener metales tóxicos o materiales radiactivos, y es posible que también se necesite tomar muestras de los lodos biológicos procedentes de las plantas de tratamiento de efluentes (véase el numeral 12.1.2). Al tomar muestras de esos lodos, se deben aplicar precauciones de seguridad adecuadas, incluyendo las regulaciones de seguridad nacional.

0. AGUAS RESIDUALES Y EFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES

Se deben tomar muestras cuando en una planta de tratamiento entran aguas residuales y también después de diversas etapas de tratamiento, incluyendo las muestras del efluente tratado.

12.1 SELECCIÓN DE SITIOS DE MUESTREO

12.1.1 Efluentes líquidos

En cada etapa del proceso se debe seleccionar cuidadosamente el sitio del muestreo, particularmente en el caso de aguas residuales crudas, cuya composición puede presentar una variación considerable con el paso del tiempo. Es posible que las aguas residuales estén contenidas en alcantarillas de gran sección transversal y su composición puede variar con la profundidad y a través del diámetro de la alcantarilla. También puede haber un mezclado incompleto de aguas residuales procedentes de diferentes fuentes, y a tasas de flujo bajas el material en suspensión se puede sedimentar. Antes de seleccionar un sitio de muestreo, se debe efectuar un programa preliminar de muestreo para establecer estas variaciones; la localización del punto de muestreo de rutina se debe establecer a partir de la información obtenida. En muchos casos será necesario tomar dos o tres muestras de rutina en puntos diferentes y mezclar éstos para dar una muestra compuesta.

búsqueda, o para la caracterización de factores determinantes que en la actualidad no sea necesario controlar, o para propósitos de control a largo plazo.

15.1 PROGRAMAS PARA LA INVESTIGACIÓN DE CAUSAS DE CONTAMINACIÓN

Con estos programas se debe determinar cómo se caracterizan las descargas de contaminación cuyo origen sea desconocido. Tales programas se basan, generalmente, en que se conozca(n) la(s) naturaleza(s) de los contaminantes, y la coincidencia de la periodicidad de la aparición de contaminación y del muestreo.

Estos criterios exigen que el muestreo, en contraste con el efectuado para el control de calidad y para la caracterización de la calidad, se debe efectuar con una frecuencia bastante alta en relación con la frecuencia con la cual aparece la contaminación.

El establecimiento de la frecuencia puede ser muy útil.

0. CONSIDERACIONES ESTADÍSTICAS

16.1 ESTABLECIMIENTO DE PROGRAMAS DE MUESTREO

Los tiempos y las frecuencias del muestreo en cualquier programa se pueden decidir adecuadamente sólo después de un trabajo preliminar detallado, en el cual se necesita una alta frecuencia de muestreo para suministrar la información en cuanto a qué técnicas estadísticas se pueden aplicar. Si la calidad está sujeta a variaciones, bien sea aleatorias o sistemáticas, los valores obtenidos para los parámetros estadísticos, tales como la media aritmética, la desviación estándar, cuando más, son únicamente estimaciones de los parámetros verdaderos y difieren, generalmente, de estos últimos.

En el caso de variaciones puramente aleatorias, las diferencias entre estas estimaciones y los valores verdaderos se pueden calcular en forma estadística; esas diferencias disminuyen a medida que el número de muestras aumenta. Una vez que se ha decidido la frecuencia del muestreo, los datos obtenidos se deben revisar con regularidad, de tal modo que se puedan hacer los cambios según se requiera.

En los numerales 16.2 a 16.5 se presenta un ejemplo del enfoque anterior, utilizando un método estadístico aplicado a un parámetro estadístico, la media aritmética; se supone que se aplica la distribución normal. La terminología utilizada está de acuerdo con la norma ISO 3534 (NTC 2062-1, NTC 2062-2, NTC 2062-3) a la cual se debe hacer referencia para las definiciones de los términos utilizados.

Para un tratamiento completo del cálculo de la media aritmética en términos del intervalo de confianza, se debe hacer referencia a la norma ISO 2602. (NTC 2224).

16.2 INTERVALO DE CONFIANZA

En la práctica, el intervalo de confianza L de la media aritmética de n resultados define el intervalo en el cual se encuentra la media aritmética verdadera a un nivel de confianza dado.

16.3 NIVEL DE CONFIANZA

El nivel de confianza es la probabilidad de que la media aritmética verdadera esté incluida dentro del intervalo de confianza L calculado. Un intervalo de confianza para el valor de la media aritmética \bar{x} de una concentración, calculado sobre la base de una muestra con n resultados, y a

0. DURACIÓN DEL MUESTREO Y MUESTRAS COMPUESTAS

Si sólo interesa la calidad promedio durante un período, y siempre que el factor determinante sea estable, puede ser útil que la duración de la recolección de las muestras sea larga y, preferiblemente, igual al período que interesa. Este principio es similar al de la elaboración de muestras compuestas. Ambos enfoques reducen el trabajo analítico a expensas del conocimiento de las variaciones en la calidad.

SECCIÓN CUATRO: MEDICIONES DEL FLUJO Y SITUACIONES QUE JUSTIFICAN LAS MEDICIONES DEL FLUJO PARA PROPÓSITOS DE CALIDAD DEL AGUA

1. INTRODUCCIÓN

19.1 GENERALIDADES

El control de las aguas residuales y el tratamiento de los efluentes y la administración de la calidad de las aguas naturales, utilizando técnicas de modelado matemático, ha incrementado la importancia de los datos de flujo. Por ejemplo, sin mediciones de los flujos no se pueden evaluar las cargas de contaminación. En esta sección se indican los principios de flujos que se deben considerar al establecer un programa de muestreo. Sin embargo, puesto que el científico analista de aguas no efectúa, generalmente, la medición del flujo, no se incluyen los detalles prácticos. Para éstos, se debe hacer referencia a las normas adecuadas elaboradas por el comité técnico TC 30 de ISO "Medición de flujo de fluidos en conductos cerrados", y por el comité técnico TC 113 de ISO "Medición de flujo de fluidos en canales abiertos".

Hay tres aspectos del flujo que es necesario medir, a saber,

- a) Dirección del flujo.
- b) Velocidad del flujo.
- c) Caudal de flujo.

19.2 DIRECCIÓN DE FLUJO

En la mayoría de los cursos de agua tierra adentro, el flujo es unidireccional y autoevidente, pero en canales navegables y en canales de drenaje esto no siempre es así y la dirección del flujo puede variar con el paso del tiempo. Conocer la dirección del flujo del agua subterránea en un depósito acuífero es de importancia primordial al evaluar las consecuencias de la contaminación acuífera y al seleccionar los sitios para las perforaciones de muestreo.

En procesos de tratamiento, el patrón de movimiento de aguas en los tanques afecta al mezclado de los contenidos y al estancamiento de la materia en suspensión, y se debe tener en cuenta para garantizar que se recojan muestras representativas.

En estuarios y en agua costera, a menudo es necesario medir la dirección del movimiento de agua como una parte esencial del programa de muestreo. Tanto la dirección como la velocidad pueden ser muy variables, y dependen de las corrientes de las mareas modificadas por las condiciones meteorológicas y otros factores y condiciones.

19.1 VELOCIDAD DEL FLUJO

La velocidad de la corriente es importante:

- a) Para calcular el caudal de flujo (véase el numeral 9.1).
- b) Para calcular la velocidad promedio o el tiempo de recorrido, que para los propósitos de la calidad del agua es el tiempo requerido para que determinada masa de agua semueva a través de una distancia dada.
- c) Para evaluar el efecto de la turbulencia y el mezclado de una masa de agua producidos por la velocidad.

19.2 CAUDAL DE FLUJO

El caudal de flujo es el volumen de líquido que pasa por un punto dado por unidad de tiempo. La información sobre la media aritmética y los caudales extremos de flujo es esencial para el diseño y la operación del efluente, agua residual, y plantas de tratamiento de aguas, y para fijar límites de calidad racionales en cuanto a la protección de los cursos de agua naturales.

0. JUSTIFICACIÓN EN CUANTO A LAS MEDICIONES DEL FLUJO EN EL CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA

20.1 CARGAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Los datos de flujo son necesarios para evaluar la carga de contaminación impuesta sobre una planta de tratamiento. Es posible que esto haga necesario efectuar mediciones, en los puntos de descarga, a un sistema de aguas residuales, así como también en los trabajos mismos. Si el agua residual que se va a tratar varía en cantidad o en calidad con el paso del tiempo, para obtener una estimación confiable de la carga se necesita un registro de la descarga de flujo continuo. A menudo se elaboran muestras compuestas mediante la mezcla de muestras en relación con el flujo registrado al momento del muestreo. El costo del tratamiento de efluentes industriales descargados a los alcantarillados públicos es directamente proporcional tanto a la calidad como al volumen de los efluentes descargados.

20.2 EFECTOS DE DILUCIÓN

La descarga de sustancias peligrosas a los alcantarillados públicos debe ser controlada en tal forma que el personal, los alcantarillados y los procesos de tratamiento no se vean afectados adversamente, aunque al mismo tiempo se utilice plenamente la dilución provista. Análogamente, al considerar los efectos probables de una descarga sobre un curso de agua natural, y los límites de calidad que es necesario imponerle, es necesario calcular el factor de dilución. En estas circunstancias, y cuando la dilución que ocasionen en el sistema otras aguas residuales sea mínima, los datos de descarga son muy valiosos.

20.3 CÁLCULOS DE FLUJO DE MASA

Los cálculos de flujo de masa se utilizan ampliamente para fijar los límites de aprobación, para efectuar descargas y para evaluar los efectos sobre la calidad ocasionados por captaciones y crecidas del río. Tales cálculos son fundamentales para realizar modelos de la calidad en sistemas completos de ríos y estuarios, y frecuentemente se basan en datos típicos o promedios

de la descarga de flujo. Las técnicas de modelado dinámico requieren datos del flujo continuo y cálculo de los valores de la frecuencia del flujo.

20.1 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y TASAS DE RECUPERACIÓN

Si la concentración de un contaminante en una descarga varía con el tiempo, únicamente si se conoce la tasa de transporte del contaminante desde el punto de descarga, se podrá obtener una estimación confiable de la dispersión o degradación del contaminante. Por consiguiente, en un programa de muestreo para un río o estuario se debe procurar tomar muestras de la misma masa de agua a medida que avanza a lo largo del curso de agua.

Para evaluar los efectos de la contaminación que se produce cuando un derramamiento accidental de un contaminante entra en un curso de agua, es de mucho valor conocer el tiempo requerido para que el contaminante llegue a los captadores corriente abajo.

20.2 FACTORES DETERMINANTES RELACIONADOS CON EL FLUJO

Se ha encontrado que, en determinadas circunstancias, las concentraciones de los factores determinantes de la calidad de cierta agua, tales como la dureza o el cloro temporales, están relacionadas con la velocidad de flujo, generalmente a lo largo de un intervalo limitado. Si se dispone de registros adecuados, ligando las tasas de flujo con las concentraciones, se puede hacer una estimación de la calidad del agua en relación con estos factores determinantes, a partir sólo de las mediciones de la velocidad de flujo. Se deben hacer verificaciones a intervalos para establecer si las relaciones permanecen válidas.

20.3 AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para evaluar en forma confiable los riesgos de contaminación para las fuentes de agua subterránea, y las tasas esperadas de recuperación a partir de ellas, se requiere conocer la dirección y la velocidad del movimiento del agua subterránea. Esta información se puede usar, entonces, para evitar la dificultad del costo de tomar muestras de aguas subterráneas para la evaluación de la contaminación.

0. MÉTODOS DISPONIBLES PARA LA MEDICIÓN DEL FLUJO

21.1 Las mediciones pueden ser discretas, tales como las que se hacen utilizando flotadores en un estuario o un medidor de lectura directa de la corriente en un río, o pueden ser continuas, tales como las que se hacen mediante la mayoría de los medidores del flujo de descarga.

21.2 La dirección y la velocidad se pueden medir utilizando:

- a) Ancla flotante.
- b) Flotadores y medidores de velocidad de corriente.
- c) Trazas químicas (incluyendo tinturas).
- d) Trazadores microbiológicos.
- e) Trazadores radiactivos.

21.1 La velocidad también se puede medir utilizando:

- a) Medidores de la corriente, tipos de lectura directa y registro.
- b) Técnicas ultrasónicas.
- c) Técnicas electromagnéticas.
- d) Técnicas neumáticas.

21.2 El caudal se puede determinar utilizando:

- a) Mediciones de la velocidad, tales como las mencionadas en el numeral 21.3 efectuadas en un canal cuya área de sección transversal sea conocida.
- b) Medios mecánicos directos, tales como un balde basculador o un medidor de aguacalibrado.
- c) Medición del nivel de agua por encima de una restricción en el flujo, tal como un rebosadero o una presa para canal de agua. El nivel se puede medir:
 - 1) Visualmente, por medio de un tablero de medición.
 - 2) Automáticamente, por medio de un flotador, cambios en la resistencia eléctrica, diferencial de presión, en forma fotográfica o acústica.
- d) Los siguientes medios en una tubería cerrada:
 - 1) Diferencias de presión a través de una tubo de Venturi.
 - 2) Diferencias de presión a través de una placa con orificio.
 - 3) Velocidad de bombeo, multiplicada por la duración del bombeo.
 - 4) Técnicas electromagnéticas, ultrasónicas y de otra índole.
- e) Medidor de dilución, para medir en un sitio las descargas en los cursos de agua naturales.

DOCUMENTO DE REFERENCIA

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Water Quality. Sampling. Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes. Geneve: ISO, 1980, 16 p. (ISO 5667-1).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Water Quality. Sampling. Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes. Technical Corrigendum 1. Geneve: ISO, 1996, 1 p. (ISO 5667-1:1980 Technical Corrigendum 1).

ANEXO 2

**NORMA TÉCNICA
COLOMBIANA**

**NTC-ISO
5667-2**

1995-06-21

**GESTIÓN AMBIENTAL.
CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS
GENERALES DE MUESTREO**



E: ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. WATER
QUALITY.SAMPLING. GUIDANCE ON
SAMPLING TECHNIQUES.

CORRESPONDENCIA: esta norma es idéntica con la ISO5667-2

DESCRIPTORES: calidad de agua; agua residual;
muestreo.

I.C.S.: 13.060.01

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)
Apartado 14237 Bogotá, D.C. - Tel. 6078888 - Fax 2221435

Prohibida su reproducción

1.1 Muestra compuesta: dos o más muestras o submuestras, mezcladas en proporciones conocidas apropiadas (bien sea en forma discreta o continua), a partir de las cuales se puede obtener el resultado promedio de una característica deseada. Las proporciones generalmente se basan en mediciones de tiempo o de flujo.

1.2 Muestra instantánea; muestra en el sitio; muestra de cucharón: una muestra discreta tomada aleatoriamente (con relación al tiempo y/o al lugar) en una masa de agua.

1.3 Tomamuestra: un dispositivo utilizado para obtener una muestra de agua, bien sea en forma discreta o continua, para el propósito de examen de diversas características definidas.

1.4 Muestreo: el proceso de sacar una porción, procurando que sea representativa, de una masa de agua con el propósito de examinar diversas características definidas.

2. TIPOS DE MUESTRA

2.1 GENERALIDADES

Es posible que se requieran datos analíticos para indicar la calidad del agua, mediante la determinación de parámetros, tales como las concentraciones de material inorgánico, minerales o productos químicos disueltos, gases disueltos, material orgánico disuelto, y materia suspendida en el agua o en los sedimentos del fondo en una localización y tiempo específicos o en algún intervalo de tiempo específico en una localización particular.

Ciertos parámetros, tales como la concentración de gases disueltos, se deben medir en el sitio, si es posible, para obtener resultados precisos. Conviene anotar que se deben realizar procedimientos de preservación de la muestra en casos apropiados (véase la norma NTC-ISO 5667-3).

Se recomienda utilizar muestras separadas para análisis químico, microbiológico y biológico y una muestra de control para la entidad ambiental, porque los procedimientos y el equipo para la recolección y el manejo son diferentes.

Las técnicas de muestreo variarán de acuerdo con la situación específica. En el numeral 5 se describen los diferentes tipos de muestreo. Para la planificación de los programas de muestreo se debe hacer referencia a la norma NTC-ISO 5667-1.

Es necesario distinguir entre muestreo en aguas lénticas o estancadas, o en aguas lólicas o corrientes y aguas máximas. Las muestras en el sitio (véase el numeral 4.2) y las muestras compuestas (véase el numeral 4.6) son aplicables a tres tipos de agua. El muestreo periódico (véase el numeral 4.3), el muestreo continuo (véase el numeral 4.4) y el muestreo en serie (véase el numeral 4.5), son aplicables a los tipos de aguas mencionadas anteriormente.

2.2 MUESTRAS EN EL SITIO

Las muestras en el sitio son muestras discretas; generalmente se recogen manualmente, pero también se pueden recoger automáticamente, para aguas en la superficie, en profundidades específicas y en el fondo.

Generalmente, cada muestra será representativa de la calidad del agua, únicamente en el tiempo y en el lugar en el cual se toma. El muestreo automático es equivalente a una serie de tales muestras tomadas en un tiempo preseleccionado o con base en el intervalo de flujo.

Las muestras en el sitio son recomendables si el flujo del agua de la cual se han de tomar muestras no es uniforme, si los valores de los parámetros que interesan no son constantes, y si el uso de una muestra compuesta oscurecería las diferencias entre las muestras individuales debido a la reacción entre ellas.

Las muestras en el sitio también se deben considerar en investigaciones de la existencia posible de contaminación, o en indagaciones para indicar su alcance o, en el caso de recolección automática de muestras discretas, para determinar el tiempo del día en que existen contaminantes. Esas muestras también se pueden tomar antes del establecimiento de un programa de muestreo más amplio. Las muestras en el sitio son esenciales cuando el objetivo de un programa de muestreo es estimar si la calidad de determinada agua cumple con límites no relacionados con la calidad promedio.

Se recomienda tomar muestras para la determinación de parámetros inestables en el sitio, tales como la concentración de gases disueltos, cloro residual, sulfuros solubles, pH, conductometría y temperatura.

1.1 MUESTRAS PERIÓDICAS (Discontinuas)

1.1.1 Muestras periódicas tomadas a intervalos de tiempo fijos (dependientes del tiempo)

Estas muestras se toman usando un mecanismo de cronometraje para iniciar y terminar la recolección de agua durante un intervalo de tiempo específico. Un procedimiento común es bombear la muestra en uno o más recipientes durante un período fijo, vertiendo un volumen establecido a cada recipiente.

Nota 1. El parámetro que interesa puede afectar al intervalo de tiempo.

1.1.2 Muestras periódicas tomadas a intervalos de flujo fijos (dependientes del volumen)

Estas muestras se toman cuando las variaciones en los criterios de calidad del agua y la tasa del flujo afluente no están interrelacionadas. Para cada volumen unitario de flujo de líquido, se toma una muestra controlada en forma independiente del tiempo.

1.1.3 Muestras periódicas tomadas a intervalos de flujo fijos (dependiente del flujo)

Estas muestras se toman cuando las variaciones en los criterios de calidad del agua y la tasa del flujo afluente no están interrelacionadas. A intervalos de tiempo constantes, se toman muestras de volúmenes diferentes, siendo el volumen dependiente del flujo.

1.2 MUESTRAS CONTINUAS

1.2.1 Muestras continuas tomadas a velocidades de flujo fijas

Las muestras tomadas mediante esta técnica contienen todos los constituyentes presentes durante un período de muestreo, pero en muchos casos, no suministran información acerca de la variación de las concentraciones de parámetros específicos, durante el período de muestreo.

1.2.2 Muestras continuas tomadas a velocidades de flujo variables

Las muestras proporcionales al flujo recogidas, son representativas de la calidad de la masa de agua. Si tanto el flujo como la composición varían, las muestras proporcionales al flujo pueden

revelar variaciones que quizás no se observen mediante el uso de muestras en el sitio, siempre que las muestras permanezcan discretas y se tome un número suficiente de muestras para distinguir entre los cambios en composición. En consecuencia, este es el método más preciso para tomar muestras de agua corriente, si tanto la velocidad del flujo como la concentración de los contaminantes que interesan varían significativamente.

1.1 MUESTREO EN SERIE

1.1.1 Muestras de perfil profundo

Esta es una serie de muestras de agua tomadas de diversas profundidades en una masa de agua en una localización específica.

1.1.2 Muestras de perfil de área

Esta es una serie de muestras de agua tomadas de una profundidad en particular, de una masa de agua en diversas localizaciones.

1.2 MUESTRAS COMPUESTAS

Las muestras compuestas se pueden obtener manual o automáticamente, en forma independiente del tipo de muestreo (dependiente del flujo, del tiempo, del volumen o de la localización).

Las muestras tomadas en forma continua se pueden reunir para obtener muestras compuestas.

Las muestras compuestas suministran datos promedio de composición. En consecuencia, antes de combinar muestras se debe verificar que se desean esos datos, o que el (los) parámetro(s) que interesa(n) no varía(n) significativamente durante el período de muestreo.

Las muestras compuestas son valiosas en los casos en que el cumplimiento de determinado límite, se basa en la calidad promedio del agua.

1.3 MUESTRAS DE VOLÚMENES GRANDES

Algunos métodos de análisis para ciertos factores determinantes requieren el muestreo de un gran volumen, a saber, de 50 litros a varios metros cúbicos. Esas muestras grandes son necesarias, por ejemplo, al analizar en relación con pesticidas o microorganismos que no se pueden cultivar. La muestra se puede recolectar bien sea de la manera convencional, teniendo gran cuidado para garantizar la limpieza del recipiente o del tanque que contiene la muestra, o pasando un volumen medido a través de un cartucho o filtro absorbente, dependiendo del factor determinante. Por ejemplo, se puede usar un cartucho de intercambio de iones o un cartucho de carbón activado para tomar muestras de algunos pesticidas, mientras que para el criptosporidio es adecuado un filtro de cartucho de polipropileno de diámetro poroso promedio de 1 µm.

Los detalles precisos del último procedimiento dependen del tipo de agua del cual se toman muestras y del factor determinante. Para los suministros sometidos a presión se debe usar una válvula reguladora para controlar el flujo a través del cartucho o del filtro. Para la mayoría de los factores determinantes, se debe colocar una bomba después del filtro o cartucho y del medidor; si el factor determinante es volátil, es necesario colocar la bomba tan cerca como sea posible del origen de la muestra; el medidor sigue colocado después del filtro o cartucho. Cuando se tomen muestras de un agua turbia que contenga sólidos en suspensión que puedan taponar el filtro o el cartucho, o si la cantidad del factor determinante que se requiere para el análisis es mayor que la capacidad del filtro o cartucho más grande disponible, se debe utilizar una serie de filtros o

1.1 EQUIPO PARA MUESTREO DE GASES DISUELTOS (Y MATERIALES VOLÁTILES)

Las muestras adecuadas para las determinaciones precisas de gases disueltos, únicamente se deben obtener con equipo que recoja una muestra mediante desplazamiento de agua, y no de aire, respecto del tomador de muestra.

Si para la recolección de muestras de gases disueltos se utilizan sistemas de bombeo, es esencial bombear el agua en tal forma que la presión aplicada a ella no disminuya significativamente por debajo de la presión atmosférica. La muestra se debe bombear directamente en la botella de almacenamiento o de análisis, y la cual se debe enjuagar mediante una cantidad igual por lo menos a 3 veces su volumen antes de iniciar el análisis o taponar la botella.

Si son aceptables resultados aproximados, las muestras para determinaciones de oxígeno disuelto se pueden recoger utilizando una botella o un balde. El error introducido en estas determinaciones por el contacto entre la muestra y el aire, varía con el grado de saturación del gas en el agua.

En caso de que las muestras se recojan en una botella a partir de un grifo o una salida de bomba, se recomienda usar un tubo inerte flexible que suministre el líquido al fondo de la botella, para garantizar que el líquido se desplace desde el fondo de la botella y que ocurra una mínima aireación.

La recolección de muestras para análisis del oxígeno disuelto a partir de masas de agua cubiertas de hielo, se debe efectuar con gran cuidado, para evitar la contaminación de las muestras por el aire.

2. IDENTIFICACIÓN Y REGISTROS

2.1 GENERALIDADES

La fuente de la muestra y las condiciones en las cuales se recolecta, se deben registrar y anexar a la botella inmediatamente después de que se llene. Un análisis del agua es de valor limitado si no está acompañado por información detallada acerca de la muestra.

Los resultados de cualquier análisis en el sitio que se haya efectuado, se deben incluir en un informe junto con la muestra. Las etiquetas y los formularios siempre se deben llenar al momento de la recolección de la muestra.

2.2 INFORMES

En el informe del muestreo se debe incluir al menos la siguiente información:

- a) Localización (y nombre) del sitio del muestreo, con las coordenadas y cualquier otra información del lugar, que sea pertinente.
- b) Detalles del punto de muestreo.
- c) Fecha de la recolección.
- d) Método de la recolección.

- a) Tiempo de la recolección.
- b) Nombre del recolector.
- c) Condiciones climáticas.
- d) Naturaleza del tratamiento previo.
- e) Preservativo o estabilizador agregado.
- f) Datos recogidos en el campo.

1. DOCUMENTO DE REFERENCIA

Esta norma es idéntica a la International Organization of Normalization Water Quality. Sampling. Part 2. Técnicas generales de muestreo. (ISO 5667-2)

ANEXO 3

**NORMA TÉCNICA
COLOMBIANA**

**NTC-ISO
5667-3**

2004-11-03

**CALIDAD DEL AGUA.
MUESTREO. PARTE 3: DIRECTRICES PARA LA
PRESERVACIÓN Y MANEJO DE LAS MUESTRAS**



E: WATER QUALITY – SAMPLING – PART 3: GUIDANCE ON
THE PRESERVATION AND HANDLING OF SAMPLES

CORRESPONDENCIA: esta norma es una adopción modificada
(MOD) de la norma ISO 5667-3:2003
Water Quality – Sampling – Part 3:
Guidance on the Preservation and
Handling of Samples

DESCRIPTORES: calidad del agua-muestreo; calidad
del agua-manejo de muestras; calidad
del agua-preservación de muestras.

I.C.S.: 13.060.01

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)
Apartado 14237 Bogotá, D.C. - Tel. 6078888 - Fax 2221435

Prohibida su reproducción

Primera actualización
Editada 2004-11-12

3.2 PRECAUCIONES QUE DEBEN TOMARSE

3.2.3 Llenado del recipiente

Para muestras que requieren la determinación de parámetros fisicoquímicos llenar los recipientes completamente y taparlos en tal forma que no haya aire sobre la muestra. Esto limita la interacción con la fase del gas y la agitación durante el transporte.

Los recipientes de las muestras, cuyos contenidos se congelan como parte de su preservación, no se deberían llenar completamente (véase el numeral 3.2.6).

3.2.4 Manejo y preservación de muestras para análisis biológico

El manejo de las muestras para análisis biológico es diferente de las muestras químicas. Se puede usar un preservante para la fijación o preservación de las muestras. El término “fijación” se usa para describir la protección de estructuras morfológicas, mientras el término “preservación” se usa para la protección contra la degradación bioquímica o química de la materia orgánica. Los preservantes son tóxicos por definición. Su adición conduce a la muerte de los organismos vivos. Previamente a la muerte, pueden causar una fuerte irritación química a los organismos más delicados que no tienen paredes celulares fuertes, y se lisan antes de que la fijación esté completa. Para minimizar este efecto, es importante que el agente de fijación entre en la célula rápidamente. Algunos preservantes, por ejemplo, las soluciones ácidas de lugol, pueden con el tiempo conducir a la pérdida de algunos grupos taxonómicos de microorganismos, los cuales pueden ser un problema durante ciertas partes del año, en ciertas áreas. Puede ser recomendado el uso de un preservante adicional, tal como soluciones alcalinas de Lugol, durante, por ejemplo, el período de verano cuando la apariencia de los protozoos silíceo- flagelados puede ser frecuentemente observada.

La preservación de las muestras biológicas debe cumplir los siguientes requisitos:

- a) El efecto del preservante sobre la pérdida del organismo por choque químico u otro, debería conocerse de antemano.
- b) El preservante debería prevenir efectivamente la degradación biológica de la materia orgánica, al menos durante el período de almacenamiento de las muestras.
- c) El preservante debería garantizar un buen reconocimiento de los grupos taxonómicos de los organismos para que sean adecuadamente estudiados durante el período de almacenamiento de las muestras.

3.2.5 Manejo y preservación de las muestras para el análisis radioquímico

El manejo de las muestras radioquímicas no es diferente del manejo para los análisis fisicoquímicos. Las precauciones de seguridad dependen de la radioactividad de la muestra. Las técnicas de preservación para estas muestras dependen del tipo emisor y de la vida promedio de los radionúclidos de interés.

3.2.6 Enfriamiento o congelación de las muestras

Se debe enfatizar en que el enfriamiento o congelación de las muestras sólo es verdaderamente efectivo si se aplica inmediatamente después de recolectar las muestras. Cuando sea posible, se requieren cajas enfriadoras o refrigeradores en los vehículos, en el sitio de muestreo. Dondequiera que se de una temperatura para enfriamiento, corresponde a la temperatura del ambiente en el que está la muestra (no la temperatura de la muestra misma).

El enfriamiento simple (en hielo o en un refrigerador entre 1 °C y 5 °C) y el almacenamiento de la muestra en la oscuridad es, en la mayoría de casos, suficiente para preservar la muestra durante el transporte al laboratorio y durante un período de tiempo relativamente corto antes del análisis. El enfriamiento no se puede considerar como un medio de almacenamiento a largoplazo, particularmente en el caso de muestras de aguas residuales (véase la Tabla 1). La muestra se debería mantener a una temperatura inferior a la que se observa durante el proceso de recolección o de llenado del recipiente.

Un pequeño volumen de hielo no tendrá mucho efecto de enfriamiento sobre un gran volumen de agua tibia. Para las muestras que contienen analitos que probablemente se vean afectados por la actividad biológica, es importante que, si la preservación en sitio no es posible, se tome la temperatura de cada muestra inmediatamente llegue al laboratorio de análisis, particularmente si las muestras requieren algunas horas de transporte. Las muestras se deben analizar o enfriar inmediatamente se reciben en el laboratorio de análisis. Durante el transporte, es conveniente la temperatura del sistema de enfriamiento debe ser monitoreada.

En general, el almacenamiento de las muestras a temperaturas por debajo de -20 °C permite un incremento del período de almacenamiento de las muestras. Si las muestras van a ser congeladas, el recipiente debe estar hecho de plástico y no estar lleno completamente. Esto reduce el riesgo para que el recipiente de la muestra no se dañe. Para algunos analitos, tales como parámetros de nutrientes, el congelamiento de la muestra es el método preferido de preservación. En estos casos, el congelamiento rápido con hielo seco es un procedimiento satisfactorio. La congelación no es un procedimiento apropiado para muestras que requieran de análisis de sustancias volátiles o si las muestras contienen células o bacterias o microalgas, las cuales se pueden fracturar y perder los constituyentes celulares durante el proceso de congelamiento. Sin embargo, es necesario controlar completamente la técnica de congelación y descongelación con el fin de regresar la muestra a su equilibrio inicial después de la descongelación. En este caso, se recomienda enfáticamente el uso de recipientes plásticos (por ejemplo: policloruro de vinilo o polietileno). Para descongelar las muestras, véase la norma *ISO 5667-16 Biotesting of Samples* (NTC-ISO 5667-16).

3.2.3 Filtración o centrifugado de las muestras

La materia en suspensión, los sedimentos, las algas y otros microorganismos se pueden eliminar, ya sea en el momento de tomar la muestra o inmediatamente después, por filtración de la muestra a través de material filtrante de membrana (por ejemplo, papel, politetrafluoretileno, vidrio, etc.) o por centrifugación. Obviamente, la filtración no es aplicable si hay posibilidad de que el filtro de membrana retenga uno o más de los componentes por analizar. Igualmente, es esencial que el ensamble del filtro no sea causa de contaminación y se debe lavar cuidadosamente antes del uso, pero de una manera consistente con el método final de análisis.

Alternativamente, la razón para el análisis puede involucrar la separación de las formas solubles y no solubles (por ejemplo, fracciones solubles e insolubles de metal) mediante filtración.

No se recomienda la decantación como una alternativa a la filtración.

Las membranas filtrantes se deberían usar con precaución, pues diversos compuestos metálicos pesados y material orgánico pueden ser adsorbidos sobre la superficie de la membrana (por ejemplo, surfactantes), y los compuestos solubles dentro de la membrana se pueden lixiviar a la muestra.

3.2.4 Adición de preservantes

Algunos componentes físicos o químicos se pueden estabilizar mediante la adición de componentes químicos, bien sea directamente a la muestra después de tomarla, o antes, al recipiente cuando todavía está vacío.

Como ya se indicó en el numeral 3.1, es imposible dar reglas absolutas para las técnicas de preservación ni el tiempo de duración del almacenamiento ni la naturaleza del recipiente. La eficiencia del proceso de preservación depende no solamente de los componentes que requieren análisis y de sus niveles (de concentración), sino también de la naturaleza de la muestra.

En todos los casos, es esencial que el método de almacenamiento sea compatible con las técnicas analíticas que se usarán. Uno de los propósitos de las Tablas de la 1 a la 4 es describir las técnicas de preservación de uso más común y de aplicación por muchos usuarios de esta norma.

Sin embargo, no debería haber diferencia estadística significativa entre los resultados de una determinación realizada inmediatamente y el resultado después de preservación. Los resultados deberían verificarse, teniendo en cuenta particularmente el método de análisis que se va a usar y las orientaciones suministradas en esta norma.

Los volúmenes de muestras considerados en la Tabla 1 representan los volúmenes típicos requeridos para realizar una sola determinación sobre la muestra. Cuando hay disponible más de un método para un determinante particular, los volúmenes de muestras son apropiados al método que requiere el máximo volumen de muestra. Por tanto, en algunos casos, puede ser posible tomar un volumen de muestra menor; sin embargo, esto sólo se debería hacer después de consultar con los funcionarios del laboratorio.

Para una muestra que requiere la determinación de más de un parámetro, algunas veces es necesario tomar varias submuestras para cumplir los requisitos de preservación de la muestra. Es esencial que se pueda tomar un cuidado extremo para evitar la contaminación cruzada que puede ocurrir, por ejemplo, cuando se preserva con ácido nítrico una submuestra metálica que contaminaría la submuestra tomada para el análisis de nitrato.

5. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Los recipientes que contengan las muestras deberían ir marcados en forma clara, precisa y durable.

Adicionalmente, en el momento de efectuar el muestreo, generalmente es necesario observar numerosos detalles que permitirán una interpretación correcta de la información obtenida (por ejemplo, fecha y hora de la toma de muestras, nombre de la persona que realiza el muestreo, naturaleza y cantidad de los preservantes agregados, etc.). Estos dos objetivos se pueden lograr en forma práctica mediante diversos procesos (etiquetas o rótulos, formatos, etc.).

Las muestras especiales de materiales anómalos deberían ser claramente marcadas y acompañadas por una descripción de la anomalía observada. Es esencial que las muestras que contengan materiales peligrosos o potencialmente peligrosos, por ejemplo ácidos, sean claramente identificadas como tales.

6. TRANSPORTE DE MUESTRAS

Los recipientes que contengan las muestras se deberían proteger y sellar en tal forma que no se deterioren, ni su contenido sufra ninguna pérdida durante el transporte. El material del empaque debería proteger los recipientes de una posible contaminación externa y ruptura, en especial cerca de la abertura, y él mismo no debería ser fuente de contaminación. Durante el transporte, es conveniente almacenar las muestras de acuerdo con las orientaciones de las Tablas de la 1 a la 4. En casos donde el tiempo de almacenamiento y transporte exceda del máximo tiempo de preservación recomendado antes de comenzar el análisis, si las muestras deberían o no ser analizadas, debería verificarse con el cliente, y si es así, debería registrarse el tiempo entre la toma de muestras y el análisis.

Si el tiempo de almacenamiento y transporte supera el tiempo de preservación máximo recomendado antes del análisis, entonces las muestras se deben analizar y se debe reportar el tiempo entre el muestreo y el análisis.

7. RECEPCIÓN DE MUESTRAS

El personal del laboratorio debería establecer si las muestras se mantuvieron en enfriamiento durante el transporte y si es posible si la temperatura ambiental de la muestra se mantuvo entre 1 °C a 5 °C.

En todos los casos, y especialmente cuando es necesario establecer una cadena de custodia, es recomendable que el conteo de los recipientes de muestras recibidos sea verificado contra el registro del número de recipientes enviados por cada muestra.

Tabla 1. Técnicas generalmente adecuadas para la preservación de muestras análisis fisicoquímico y químico

Parámetro por estudiar	Tipo de recipiente ^a	Volumen típico (ml) y técnica de llenado ^b	Técnica de preservación	Tiempo de preservación máximo recomendado antes del análisis, después de preservación	Comentarios
Acidez y alcalinidad	P o V	500 Llenar completamente el recipiente para extraer el aire	Enfriar entre 1 °C y 5 °C	24 h	14 d ^c Las muestras se deberían analizar preferiblemente en campo. (Particularmente para muestras con un contenido alto de gases disueltos). La reducción y oxidación durante el almacenamiento pueden cambiarla muestra.
Aceite y grasa	V lavado con solvente	1 000	Acidificar a pH entre 1 y 2 con H ₂ SO ₄ ó HCl	1 mes	
Aluminio	P lavado en ácido V o VB lavado en ácido	100	Acidificar a pH entre 1 y 2 con HNO ₃	1 mes	

Continúa...

La Tabla 4 da técnicas generalmente adecuadas para la preservación de muestras radioactivas.

Tabla 4. Técnicas generalmente adecuadas para la preservación de muestras Parámetros radioquímicos

Parámetro por estudiar	Tipo de recipiente ^a	Técnica de preservación	Volumen típico en ml	Tiempo máximo de preservación recomendado antes del análisis	Comentarios
Actividad Alfa	P	Acidificar a pH entre 1 y < 2 con HNO ₃	2 000	1 mes	No acidificar si la muestra se evapora antes del análisis Almacenar la muestra en la oscuridad
		Enfriar entre 1 °C y 5 °C	2 000	1 mes	
Actividad Beta (excepto radio-iodo)	P	Acidificar a pH entre 1 y 2 con HNO ₃	2 000	1 mes	No acidificar si la muestra se evapora antes del análisis Almacenar la muestra en la oscuridad
		Enfriar entre 1 °C y 5 °C	2 000	1 mes	
Actividad Gamma	P	Enfriar entre 1 °C y 5 °C	5 000	2 d	
Radio-Yodo	P	Enfriar entre 1 °C y 5 °C	3 000	2 d	Agregar de 2 ml a 4 ml de hipoclorito de sodio [10 % (m/m)] por litro de muestra, asegurando que haya cloro libre en exceso
Isótopos de radón Radio por radón en crecimiento	VB	Enfriar entre 1 °C y 5 °C	2 000	48 h	Mínimo 4 semanas en crecimiento de los hijos del radio

Continúa...

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC-ISO 5667-3 (Primera actualización)

Tabla 4. (Final)

Parámetro por estudiar	Tipo de recipiente ^a	Técnica de preservación	Volumen típico en ml	Tiempo máximo de preservación recomendado antes del análisis	Comentarios
Radio por otros métodos	P	Acidificar a pH < 1 con HNO ₃	2 000	2 meses	Mínimo 4 semanas en crecimiento de los hijos del radio
		Enfriar entre 1 °C y 5 °C	2 000	2 meses	
Radio-estroncio	P	Enfriar entre 1 °C y 5 °C	1 000	1 mes	2 semanas de crecimiento en itrio -90
Radio-Cesio	P	Enfriar entre 1 °C y 5 °C	5 000	2 d	
Agua tritjada	P	Enfriar entre 1 °C y 5 °C	250	2 meses	La muestra se destila antes de análisis
Uranio	P	Acidificar a pH < 2 con HNO ₃	2 000	2 meses	Espectrometría alfa
		Enfriar entre 1 °C y 5 °C	2 000	2 meses	
Plutonio	P	Acidificar a pH < 2 con HNO ₃	2 000	1 mes	Espectrometría alfa
		Enfriar entre 1 °C y 5 °C	2 000	1 mes	
<p>ADVERTENCIA Las precauciones de seguridad y protección dependen de la actividad de la muestra.</p> <p>Es conveniente evitar la contaminación de la muestra, especialmente si la actividad de ésta es muy baja. Algunos sitios de muestreo pueden tener actividad mensurable en el suelo o el aire, o en aguas diferentes de las sometidas a muestreo. Los laboratorios comunes y los radioquímicos, al igual que algunos elementos de equipo domésticos, pueden contener materiales radioactivos.</p> <p>Cuando se hace muestreo de precipitaciones, cualquier requisito especial de esta tabla es adicional a los de la norma ISO 5667-8. Ya que se pueden requerir varios días para recolectar suficiente muestra, también se deberían registrarlas horas y fechas de inicio y finalización, y se debería anexar un registro de la recolección de la precipitación para la estación de muestreo, durante el período apropiado. Se puede adicionar un estabilizador o vehículo, si es apropiado para los determinantes que se están midiendo.</p> <p>NOTA Algunas botellas de plástico concentran las muestras lentamente durante un período de muchos meses, por ser muy levemente permeables al agua. Véanse también los comentarios para el radón.</p>					
<p>^a P = plástico (por ejemplo, polietileno, politetrafluoretileno (PTFE), cloruro de polivinilo-(PVC), tereftalato de polietileno (PET))</p> <p>V = vidrio</p> <p>VB = vidrio de borosilicato</p>					

ANEXO 4

AYUDA DE MEMORIA

Reunión de: TOMA MUESTRAS PROYECTO 4000 131 Página: de:
Fecha: 15/02/2021 Hora inicio: 9:00 AM Hora Final:
Lugar:

Asistentes: DANIELA RODRIGUEZ / SEBASTIAN MATEUS / JORGE ENRIQUE FLORES
SANDRA TORRES


DESARROLLO ORDEN DEL DÍA:

1. PROCEDIMIENTO SEGURO PARA LA TOMA DE LA MUESTRA.
2. ATS ANALISIS DE TRABAJO SEGURO PARA REALIZAR LA LABOR
3. EPP Guayol, Gantes, protección respiratoria, Gantes Nitrilo
4. Se determina que la actividad en la toma de la muestra se realiza desde la superficie del pozo, no se ingresara para la toma de muestra.
5. Se revisa certificado de seguro Accidentes por seguros Bolívar.
6. Se planea primera muestra para el día 18, 19 y el demás para la próxima semana en el horario 8:00 A 10:00 AM.

MPFD0801F05-01

Original: Archivo (codigo folder)

ANEXO 5

SOLICITUD DE ANALISIS O SERVICIOS		Versión 4 F-TNU-TN-010 Página 1 de 1							
		Líquida (Aguas, Lodos u otros del mismo tipo)							
FECHA: -		TIPO DE MUESTRA: USUARIO INTERNO							
NOMBRE(S) DE CONTACTO: Fernando Mosos		TELÉFONO(S) DE CONTACTO: 8012	CORREO(S) fmosos@sgc.gov.co						
NOMBRE / RAZÓN SOCIAL: Servicio Geológico Colombiano		NIT: 89999294-8	CIUDAD Y DIRECCIÓN: Bogotá Cra 50 26-20						
NOMBRE DEL PROYECTO: Redes Activación neutronica		NÚMERO DEL PROYECTO: 1001245	GERENTE DEL PROYECTO: Mary Peña						
LABORATORIOS GIANG INVOLUCRADOS:		SERVICIOS SOLICITADOS:							
		SERVICIOS SOLICITADOS:							
		SERVICIOS SOLICITADOS:							
		SERVICIOS SOLICITADOS:							
OBSERVACIONES Y CONDICIONES ESPECIALES PARA EL SERVICIO:		METODOS							
CONDICIONES DEL SERVICIO		ANÁLISIS DE MUESTRAS EN ESTADO SÓLIDO POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA, METNU-AN-001, VERSION 2. Vigente desde 1/06/2016.	LABORATORIO 2	LABORATORIO 3	LABORATORIO 4	LABORATORIO 5			
La recepción de las muestras no implica la aceptación del servicio y está sujeta a la disponibilidad de los laboratorios.		El laboratorio eventualmente usará los datos obtenidos de esta solicitud con fines de investigación del mismo.		Nombre acuífero	Profundidad de toma	PH	T °C	Alcalinidad mg/L	Observaciones
				Cond. µS/cm	Tipo (a)				
Código Identificación Muestra de Campo		Coordenadas (Geográficas o Gauss)		Origen / Datum x (Lat.) y (Long.) z		Fecha de muestreo DD/MM/AA			
N°									

ANEXO 6



ANEXO 7

FECHA:	_____
LOCALIZACIÓN:	_____
TIPO DE MUESTREO:	_____
HORA:	_____
NOMBRE RECOLECTOR:	_____
PRESERVATIVO ADICIONADO:	_____
OBSERVACIONES:	_____

ANEXO 9

		N° de Repetición	1	2	3
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA					
Identificación del radioisótopo		¹³¹ I			
Fecha y Hora		DD / MM / 2021		- HH:MM	
Tipo y Número de muestra					
Responsable del muestreo					
Dirección del punto de muestreo					
Coordenadas del punto de muestreo	N				
	E				
Tipo de red de alcantarillado		Sanitario	Combinado		
Tipo de pozo en la investigación		Zonal	Local		
CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA					
pH (<i>In Situ</i>)					
Filtrada - Hora				HH:MM	
Acidificada - Hora				HH:MM	
Caudal promedio (L/s)					
Observaciones					
Firma					

ANEXO 10



ANEXO 11

COPIA CLIENTE **Dosis 119342-0**
 Catóresis: 13/04/2021 800 Hrs
 Cebumenes: 13/05/2021 800 Hrs
 Lot #: YODO I-131 CAPS-24-01 13/04/2021
 SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO
 ENTE REGULADOR MAT RADIATIVO

SELIG DE COLOMBIA S.A. "Un mundo de alternativas para su Salud"

Para: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO
 ENTE REGULADOR MAT RADIATIVO
 N.I.T: 89989294-8
 Dirección: DG 53 34-53 BOGOTÁ Colombia 12/04/2021

Remisión	Fecha Dispensación	Descripción	Hora Calibración	Paciente
119342	0	13/04/2021	YODO I-131 CAPSULA 1Mci (37 MBq)	800 PRUEBAS PRUEBAS

DECLARACION DE DESPACHO DE PRODUCTO PELIGROSOS (7)

CATEGORIA DE LA ETIQUETA (RADIOACTIVO) BLANCO _____ AMARILLO II INDICE DE TRANSPORTE 02

UN 2915. MATERIALES RADIACTIVOS, BULTOS DEL TIPO A, no en forma especial, no fisionables o fisionables exentos
 Declaro que el contenido de esta remesa queda total y exactamente descrito más arriba mediante el nombre correcto de expedición; asimismo, que se ha clasificado, embalado, marcado y etiquetado y se halla en todo respecto en condiciones adecuadas para su transporte por (indicar la modalidad o modalidades de transporte de que se trate), de conformidad con los reglamentos internacionales y nacionales pertinentes.

[Firma]
 Coord. Logística MI

Califique Nuestro Servicio: 1-Muy malo 2-Deficiente 3-Regular 4-Bueno 5-Excelente

Cumplimiento en el tiempo de entrega	1	2	3	4	5
Presentación Material Entregado	1	2	3	4	5
Servicio del personal encargado de la entrega	1	2	3	4	5

Entregado por: Nombre: *[Firma]* Firma: *[Firma]* Vehículo Placa: SXY 668


En Cumplimiento de la normatividad de Protección Radiológica Recibe:

Nombre	Cedula	Firma	Fecha y hora
Fernando MOSOS PATIÑO			

ANEXO 12




ANEXO 13



PBX: (57+1) 414 30 89 info@norquimicos.com.co

[Inicio](#) [Tienda](#) ▾ [Compañía](#) [Marcas y Partners](#) [Mobiliario de Laboratorio](#) [Contacto](#)

[Inicio](#) [Tienda](#) ▾ [Compañía](#) [Marcas y Partners](#) [Mobiliario de Laboratorio](#) [Contacto](#)

Producto	Precio	Cant.	Total
 FRASCOS EN PLÁSTICO CON TAPA ROSCA GRADUADOS KARTELL - 500mL	\$12,300	- 1 +	\$12,300

[← Continuar Con La Compra](#) [↻ Actualizar Carrito](#)

Cupón de aplicar

 [Aplicar](#)

   \$12,300

Total del carrito

Subtotal **\$12,300**

Envío **Precio fijo**
Las opciones de envío se actualizarán durante el pago.
[Calcular envío](#)

i.v.a **\$2,337**

Total **\$14,637**

[Finalizar compra](#)

ANEXO 14



PBX: (57+1) 414 30 89

info@norquimicos.com.co

[Inicio](#) [Tienda](#) [Compañía](#) [Marcas y Partners](#) [Mobiliario de Laboratorio](#) [Contacto](#)

\$214,600

Producto	Precio	Cant.	Total
PAPEL DE FIBRA DE VIDRIO Y MICROFIBRA 934-AH WHATMAN - 47 mm	\$214,600	- 1 +	\$214,600

[← Continuar Con La Compra](#)

[↻ Actualizar Carrito](#)

Cupón de aplicar

Total del carrito

Subtotal **\$214,600**

Envío **Precio fijo**

Las opciones de envío
se actualizarán durante
el pago.

[Calcular envío](#)

i.v.a **\$40,774**

Total **\$255,374**

[Finalizar compra](#)

ANEXO 15

Colombia / Español
Compra rápida | Mis favoritos | Contáctenos

Todo

[Inicio sesión](#) | [Registrarse](#) | 1 **Carrito**

[COVID-19](#) | [Productos](#) | [Servicios](#) | [Documentos](#) | [Responsabilidad](#) | [Asistencia técnica](#) | [Sobre nosotros](#) | [Sobre nuestras marcas](#)

Proceso

1 Carrito

2 Envío

3 Facturación

4 Enviar el pedido

[Guardar lista de compras](#) | [Cargar lista de la compras](#) | [Compartir carrito](#) | [Imprimir el Carrito como PDF](#)

Paso Siguiente

Compra rápida

Añadir al carrito

¿Ha realizado algún cambio?

Actualizar

Por favor [inicie sesión](#) para ver los precios específicos de su cuenta.

Producto	Cant./Env.	Envío/Disponibilidad	Precio	Cantidad	Total
<input type="checkbox"/> 1003171000 Supelco Ácido clorhídrico fumante 37% Frasco de vidrio	1 1	En existencia Estimated delivery date to your location 1 en 06-oct-2021 Modificar la fecha de entrega	COP 93,000.00	<input style="width: 30px;" type="text" value="1"/>	COP 93,000.00

TODO IR

Subtotal **COP 93,000.00**

NOTAS IMPORTANTES

▶ Si usted no tiene cuenta con Merck S.A. sírvase contactar a uno de nuestros distribuidores autorizados para la realización de su compra.

Subtotal **COP 93,000.00**

Paso Siguiente

ANEXO 16

RECOMENDACIONES

Investigar las instituciones desarrollando campañas de muestreo y monitoreo individuales en las instituciones conectadas a la red de alcantarillado de los pozos inspeccionados en los que se encontró actividad de ^{131}I mayor a 19 Bq/L.

Aquellas instituciones que incumplen la resolución 41178 de 2016, implementar o generar control sobre el funcionamiento de su sistema de gestión de vertidos para ^{131}I , así como planes de monitoreo dentro de las mismas.

Realizar un control efectivo por parte de los entes reguladores considerando la imposición de las sanciones legales correspondientes como la suspensión de la autorización para las instituciones que incumplan.

Expandir la campaña de muestreo a la zona sur de la ciudad para ampliar el control radiológico en las instituciones que incumplan con la normatividad colombiana y dar seguimiento luego de la apertura de la PTAR Canoas.

Desarrollar campañas de muestreo para la detección y control de otros radioisótopos contaminantes presentes en el alcantarillado sanitario tras los resultados obtenidos en las muestras analizadas en los que además se encontró $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Analizar la afectación en la vegetación y la fauna debido a los niveles de ^{131}I presentes en el alcantarillado sanitario de la ciudad y en la cuenca media del río Bogotá con los que entra en contacto.

Desarrollar convenios entre entidades como el SGC, la secretaria distrital de salud, la secretaria distrital de medio ambiente y la EAAB-ESP que faciliten las campañas de control de diversos contaminantes radiactivos presentes en la ciudad y sus efectos en la población.

Realizar mediciones en las principales conexiones de la red de alcantarillado troncal que interceptan diversas instituciones con desechos de ^{131}I como los presentados en las figuras 27 y 28 teniendo en cuenta el tiempo de decaimiento del radioisótopo desde el hospital hasta el punto de muestreo para verificar la concentración en actividad en estos puntos.

Generar informes que presenten el comportamiento en comparación con los antecedentes medidos sobre la actividad de ^{131}I en la ciudad analizando las causas de posibles variaciones entre los pozos inspeccionados.

Adelantar un estudio de salud en la población más afectada para expandir los conocimientos y las consecuencias de la radiación gamma emitida por el ^{131}I presente en el alcantarillado sanitario y la cuenca media del río Bogotá.