



Calidad del Agua de Consumo Subproductos de Desinfección y Riesgo de Cáncer Digestivo en Boyacá

Proyecto de Investigación

“Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer”

Bibiana Matilde Bernal Gómez
(Compiladora)



**BIBIANA MATILDE
BERNAL GÓMEZ**

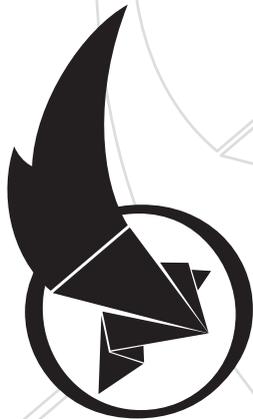
Docente de la Escuela de Medicina de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Uptc. Tunjana, médica cirujana de la Universidad Nacional de Colombia.

Especialista en patología del Instituto Nacional de Cancerología de Colombia.

Doctora en Microbiología, Salud pública y Sociedad de la Universidad de Zaragoza,

España, con énfasis en Ciencias biomédicas. Investigadora junior de Minciencias y becaria Laspau-Minciencias. Fundadora y líder del Grupo de Investigación Biomédica y de Patología de la Uptc.

 <https://orcid.org/0000-0002-4897-3368>
bibiana.bernal@uptc.edu.co





Calidad del Agua de Consumo, Subproductos de Desinfección y Riesgo de Cáncer Digestivo en Boyacá



Uptc[®]

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia

VIGILADA MINEDUCACIÓN



Calidad del Agua de Consumo, Subproductos de Desinfección y Riesgo de Cáncer Digestivo en Boyacá

Bibiana Matilde Bernal Gómez
(Compiladora)



Ciencias



GOBERNACIÓN DE
Boyacá

Secretaría
de Salud

Boyacá
Avanza



GIBP
GRUPO DE INVESTIGACIÓN BIOMÉDICA Y DE PATOLOGÍA

Universidad de
los Andes

ENFOQUE: INVESTIGACIÓN UPTC

ÁREA: Ciencias Médicas y de la Salud N.º 307

Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá
Drinking water quality, disinfection by-products and risk of digestive cancer in Boyacá

Primera Edición, 2024

Versión digital (ePub)

Versión Impresión bajo demanda

© Bibiana Matilde Bernal Gómez, 2024

© Manuel Salvador Rodríguez Susa, 2024

© Mildred Fernanda Lemus Pérez, 2024

© Luisa Fernanda Salas Saavedra, 2024

© Nohora Yaneth Zipa Casas, 2024

© Sandra Helena Suescún Carrero, 2024

© Mabel Idaliana Medina Alfonso, 2024

© Juan David Cruz Rojas, 2024

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2024

ISBN (ePub) 978-958-660-845-9

ISBN (Impresión bajo demanda POD) 978-958-660-861-9

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: septiembre de 2023

Aprobación: enero de 2024

Impreso y hecho en Colombia - Printed and made in Colombia

Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá / Drinking water quality, disinfection by-products and risk of digestive cancer in Boyacá / Bernal Gómez, Bibiana Matilde (Compiladora). Tunja: Editorial UPTC, 2024. 126p.

ISBN (ePub) 978-958-660-845-9

ISBN (Impresión bajo demanda POD) 978-958-660-861-9

Incluye referencias bibliográficas

1. Riesgo de Cáncer digestivo 2. Subproductos de desinfección 3. Agua de consumo 4. Calidad del agua 5. Digestive Cancer Risk 6. Disinfection By-products 7. Drinking Water 8. Water Quality
(Dewey 614.4/21) (Thema MBNH2 - Factores medioambientales)

Rector, UPTC

Enrique Vera López

Comité Editorial

Carlos Mauricio Moreno Téllez

Vicerrector de Investigación y Extensión

Yolanda Torres Pérez

Directora de Investigaciones

Bertha Ramos Holguín

Delegada Vicerrectoría Académica

Martín Orlando Pulido Medellín

Representante Área Ciencias Agrícolas

Yolima Bolívar Suárez

Representante Área Ciencias Médicas y de la Salud

Nelsy Rocío González Gutiérrez

Representante Área Ciencias Naturales

Olga Yanet Acuña Rodríguez

Representante Área Ciencias Sociales

Juan Guillermo Díaz Bernal

Representante Área Humanidades

Pilar Jovanna Holguín Tovar

Representante Área Artes

Edgar Nelson López López

Representante Área Ingeniería y Tecnología

Juan Sebastián González Sanabria

Representante Grupos de Investigación**Editor**

Óscar Pulido Cortés

Coordinadora Editorial

Andrea María Numpaque Acosta

Corrección de Estilo

Juan Carlos Álvarez Ayala

Diagramación

Aura Patricia Sarmiento Hernández

Portada

Juan David Zambrano Vera

Edumedios

Libro de Investigación resultado del proyecto titulado: Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer, con SGI 3290.

Citar este libro / Cite this book

Bernal Gómez, B. (Compiladora) (2024). *Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá*. Editorial UPTC.

doi: <https://doi.org/10.19053/uptc.9789586608459>



Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



Libro financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Editorial UPTC

La Colina, Bloque 7, Casa 5

Avenida Central del Norte No. 39-115, Tunja, Boyacá

comite.editorial@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co

<https://editorial.uptc.edu.co>

RESUMEN

El acceso al agua es un derecho humano, y tenemos la responsabilidad de preservarla y no contaminarla. La ingeniería moderna ha mejorado la calidad del agua para consumo humano, pero persisten factores ecosistémicos imperceptibles que pueden ser potencialmente dañinos que la contaminan, procedentes de las prácticas agrícolas, mineras e industriales, incluyendo también procesos de desinfección con químicos, que producen subproductos de riesgo para la salud en general y, particularmente, causantes de cáncer. Se aborda el tema del riesgo de cáncer digestivo con relación a la calidad del agua en Boyacá del proyecto de investigación Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer, financiado por Minciencias, Convocatoria 896.

Palabras clave: Riesgo de Cáncer digestivo; Subproductos de desinfección; Agua de consumo; Calidad del agua.

ABSTRACT

Access to water is a human right, and we have the responsibility to preserve and not contaminate it. Modern engineering has improved the quality of water for human consumption, but there are still imperceptible ecosystem factors that can potentially harm it, coming from agricultural, mining, and industrial practices, including disinfection processes with chemicals, which produce by-products that pose a risk to health and the presentation of cancer. The topic of digestive cancer risk in relation to water quality in Boyacá is addressed in the research project Analysis of risk by exposure of the boyacense population to disinfection by-products present in potable water and the attributable fraction to cancer, funded by Minciencias 896

Keywords: Digestive Cancer Risk; Disinfection By-products; Drinking Water; Water Quality.

Tabla de contenido

Sobre los autores.....	13
Presentación.....	17
Introducción del libro y consideraciones generales.....	23
Metodología de investigación.....	25
Objetivos específicos.....	26
Referencias.....	28
Contaminación del agua y medición del riesgo de cáncer.....	29
<i>Bibiana Matilde Bernal Gómez, Luisa Fernanda Salas Saavedra</i>	
Introducción.....	29
Identificación del riesgo de cáncer.....	35
Antecedentes.....	35
Métodos.....	36
Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud.....	42
Referencias.....	44
Calidad de agua para consumo humano en el departamento de Boyacá.....	51
<i>Nohora Yaneth Zipa Casas, Juan David Cruz Rojas, Sandra Helena Suescún Carrero, Mabel Idaliana Medina Alfonso</i>	
Introducción.....	51
Normatividad sanitaria a la calidad de agua para consumo humano en Colombia.....	53
Inspección sanitaria de la calidad de agua para consumo humano en el departamento de Boyacá.....	54

Inspección - IRABA – BPS.....	56
Vigilancia – IRCA, desde la toma de muestra hasta el cargue en el SIVICAP (Sistema de información de calidad de agua potable).....	59
Control – Cómo, cuándo y a quienes se aplican medidas sanitarias, acciones populares, tutelas, entre otras.....	61
Sistemas de tratamiento – aspectos a tener en cuenta para el diseño y construcción de sistemas de tratamiento de agua para consumo humano.....	62
Situación del sistema de desinfección en los 123 acueductos urbanos del departamento.....	63
Sustancias usadas para la desinfección en los 123 acueductos urbanos del departamento.....	65
Mapas de riesgo de calidad de agua.....	66
Situación de la calidad del agua del departamento en el año 2022 – mapas con IRCA, IRABA y BPS.....	68
Desafíos y perspectivas.....	70
Desinfección y subproductos de desinfección.....	71
<i>Mildred F. Lemus Pérez, Manuel S. Rodríguez Susa.</i>	
Introducción.....	71
Desinfección en Boyacá.....	77
Estudios relacionados con subproductos de desinfección en Boyacá.....	77
Resultados.....	82
Discusión.....	89
Desafíos y perspectivas.....	96
Referencias.....	98
Cáncer digestivo y calidad del agua de consumo.....	101
<i>Bibiana Matilde Bernal Gómez</i>	
Introducción.....	101
Metodología.....	104
Resultados.....	106
Desafíos y perspectivas.....	114
Referencias.....	115
Anexo 1.....	125

Sobre los autores

Bibiana Matilde Bernal Gómez

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4897-3368>
bibiana.bernal@uptc.edu.co

Docente de la Escuela de Medicina de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Uptc. Tunjana, médica cirujana de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en patología del Instituto Nacional de Cancerología de Colombia. Doctora en Microbiología, Salud pública y Sociedad de la Universidad de Zaragoza, España, con énfasis en Ciencias biomédicas. Investigadora junior de Minciencias y becaria Laspau-Minciencias. Fundadora y líder del Grupo de Investigación Biomédica y de Patología de la Uptc.

Manuel Salvador Rodríguez Susa

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8743-0200>
manuel-r@uniandes.edu.co

Docente asociado del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes y consultor nacional en temas de medio ambiente. Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes y doctor en Ingeniería del Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse – Francia. Sus líneas de investigación principalmente están relacionadas con procesos biológicos ambientales, agua potable, residual e industrial, gestión y minería de residuos sólidos y peligrosos, y energía.

Mildred Fernanda Lemus Pérez

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2874-519X>
mf.lemus39@uniandes.edu.co

Es investigadora del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes. Ingeniera ambiental y sanitaria de la Universidad de la Salle. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes y doctora en Ingeniería de la Universidad de los Andes. Sus líneas de investigación y de consultoría se han desarrollado principalmente en las áreas de producción de agua potable con énfasis en subproductos de desinfección, aguas residuales y residuos sólidos.

Sandra Helena Suescún Carrero

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5821-4421>
sandrahsc@yahoo.com

Bacterióloga de la Pontificia Universidad Javeriana. Magíster en Administración en Salud de la Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad El Bosque. PhD en Metodología de la Investigación y Salud Pública de la Universidad Autónoma de Barcelona. Referente del área de Investigación del Laboratorio de Salud Pública de la Secretaría de Salud de Boyacá - Gobernación de Boyacá.

Mabel Idaliana Medina Alfonso

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9264-6516>
mabel.medina@boyaca.gov.co

Bacterióloga de la Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Gerencia de Seguridad Social en Salud de la Universidad Santo Tomás. Máster en Sistemas Integrados de Gestión Universidad de la Rioja. Líder de Gestión del Laboratorio de Salud Pública de la Secretaría de Salud de Boyacá - Gobernación de Boyacá.

Nohora Yaneth Zipa Casas

ORCID <https://orcid.org/0009-0002-3356-5326>
yanethzipanyzc@gmail.com

Ingeniera sanitaria de la Universidad de Boyacá - 1991. Especialista en Planeación para la Educación Ambiental, Universidad Santo Tomás. Jefe de la división de Saneamiento Ambiental, de la Secretaría de Salud de Boyacá (1993 – 1996). Coordinadora del Grupo de Vigilancia y Control de las Enfermedades Transmitidas por Vectores (ETV) de la Secretaría de Salud de Boyacá – Gobernación de Boyacá. Referente del programa de Inspección, Vigilancia y Control de la Calidad de Agua para Consumo Humano del departamento de Boyacá, Secretaría de Salud de Boyacá - Gobernación de Boyacá.

Juan David Cruz Rojas

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-4187-1847>
ing.juan1228@gmail.com

Ingeniero sanitario e ingeniero ambiental de la Universidad de Boyacá. Especialista en Gerencia de proyectos de la Universidad de Boyacá. Programa de calidad de agua para consumo humano y uso recreativo de la Secretaría de Salud de Boyacá - Gobernación de Boyacá.

Luisa Fernanda Salas Saavedra

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-7002-3986>
luisa.salas@uptc.edu.co

Ingeniera ambiental de la Universidad de Boyacá. Especialista en Gestión de riesgo de la Universidad de Boyacá. Integrante del Grupo de Investigación Biomédica y de Patología Uptc - AGENF. Auxiliar de Investigación Proyecto 3290 DIN UPTC, Convenio 0008 de 2022 Uniandes - Uptc.

Presentación¹

La ingeniería moderna ha mejorado la calidad del agua de consumo; particularmente, la ingeniería ambiental y sanitaria se ha ocupado de vigilar el aseguramiento de la calidad desde la fuente de origen del agua, en las redes de distribución y hacia las plantas de tratamiento, así como en la idoneidad de los acueductos que la llevan al consumidor final, tanto en lo urbano como para uso rural.

El agua de consumo humano tiene unas características de calidad que están relacionadas con sus aspectos físicos de palatabilidad por ser los empíricamente más fáciles de evaluar. Sin embargo, para la seguridad en su uso requiere de la valoración de otros parámetros que, por su imperceptibilidad sensorial, ya bien sea por ser incoloros, inodoros o sin sabor, hacen del agua un compuesto de riesgo que no trae una alerta tangible para determinar si se está consumiendo un mineral inadecuado, un tóxico, o agentes microbiológicos y parasitológicos que impliquen daño a la salud.

En la salud pública mundial, con base en la estrategia de atención primaria en salud, se han llevado a cabo estudios multidisciplinarios con respecto a la calidad del agua de consumo humano. Los antecedentes sobre la cantidad y calidad del agua conducida por medio de acueductos se han desarrollado desde que se formaron las ciudades y asentamientos humanos, pues existe evidencia documental sobre las técnicas que antiguos pueblos usaron introduciendo procesos de filtración y separación de las aguas limpias de las contaminadas (1).

1 doi: <https://doi.org/10.19053/uptc.9789586608459.0>

Garantizar la calidad del agua ha impulsado el desarrollo de diversas disciplinas científicas y técnicas, que se conectan por las necesidades en salud de los seres humanos. Estas disciplinas incluyen la construcción de los acueductos, la purificación del agua (ciencias químicas) y la epidemiología, pues se reconoce que la identificación de los brotes epidémicos por John Snow, es una de las bases para el surgimiento de la epidemiología (2) y, además, el conocimiento que se obtiene de saber cómo se ha establecido en el mundo que el acceso al agua es un derecho humano y por qué es un bien de consumo finito en el planeta (3).

Su otorgamiento como derecho también constituye una obligación del deber ser, con la responsabilidad que tiene la humanidad y cada individuo de preservarla y no contaminarla. Proveer el agua como actividad humana ha girado en torno a diversas orientaciones y matices con modificaciones de su consumo, como lo es la amplia variedad de procesos relacionados con la desinfección, una de las técnicas con las que la ingeniería ha mejorado la calidad microbiológica del agua, para reducir el riesgo de contraer alguna enfermedad infecciosa.

Dado que el consumo de agua está en la base de la pirámide alimentaria y con ella establecemos hábitos individuales y colectivos de higiene y producción de alimentos, entonces el acceso al agua potable es una parte fundamental de un estilo de vida saludable, y su escasez puede ocasionar la muerte.

Desde la década de los años 70, de acuerdo con Crump y Guess (4), se relaciona la enfermedad crónica precancerosa y el cáncer con ciertos subproductos relacionados con la desinfección del agua de consumo. Los subproductos de desinfección, tema de enfoque de este libro, son químicos que proceden de la reacción de los desinfectantes clorados con el material orgánico presente en el agua (5). Adicionalmente, se crea un riesgo para la salud humana con el uso y descarga de químicos orgánicos, metales pesados y tóxicos que se pudieran encontrar en las aguas subterráneas o en las aguas superficiales (6).

A la par de la contaminación orgánica natural de las fuentes de agua, se suman los riesgos de la contaminación química derivada de las actividades humanas, tales como la extracción minera, la producción de plásticos, la industria del cuero, la producción de cosméticos y la contaminación con antibióticos y otros medicamentos utilizados por humanos y en el sector pecuario (7,8,9). La presión biológica que generan estas actividades sobre el consumo del agua desde la fuente también es un fenómeno de estudio e intervención (10). El monitoreo y vigilancia del agua de la salud ambiental, requiere del esfuerzo de múltiples disciplinas, y de una gran variedad de pruebas con base en hallazgos y evidencias científicas para el aseguramiento de un sistema, cuyo resultado es un agua de calidad óptima para el consumo (11).

El agua de calidad óptima produce un efecto favorable al sostenimiento de un adecuado estado de salud de individuos y comunidades, hecho opuesto al efecto grave que ocasiona un sistema sanitario en el que el agua es contaminada por agentes microbiológicos, parasitológicos o tóxicos, que en este libro se ha querido profundizar.

Por lo anterior, evitar el efecto deletéreo sobre el individuo y la comunidad asegura el mantenimiento de uno de los derechos esenciales de la vida, derecho humano que se ha venido escalando en el planeta, con el objetivo de reducir las brechas desiguales que existen entre los contextos rural y urbano.

Situaciones relacionadas con la pobreza, como es el acceso deficiente al agua con calidad, se unen a las que traerán la escasez de fuentes de agua idóneas pronosticadas a futuro. Por eso es importante considerar la calidad junto con los conceptos de recirculación y descontaminación del agua y el uso del agua como bien sostenible. Este enfoque se centra en uno de los objetivos de desarrollo sostenible, el objetivo número 6, el cual, desde 2015, ha sido científicamente comprobado como el que más ha contribuido para disminuir la pobreza y la desigualdad entre las comunidades y, con ello, el mejoramiento en el estado de salud y bienestar (12,13).

El acceso al agua de consumo ideal es un derecho y con él adquirimos el deber de no contaminarla, preservarla para las generaciones futuras y conocer que su vigilancia sanitaria es parte de la acción que tiene el cuidado primario de la salud, principalmente en equipos multidisciplinarios constituidos por los profesionales de la salud y la salud ambiental, a quienes va dirigido este libro.

Bibiana Matilde Bernal Gómez

Médica cirujana, especialista en Patología. Doctora en Microbiología, Salud pública y Sociedad. Docente e Investigadora de la Escuela de Medicina de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Líder del Grupo de Investigación Biomédica y de Patología de la Uptc.

Manuel Salvador Rodríguez Susa

Ingeniero Químico, Doctor en Ingeniería. Docente Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes. Investigador principal del proyecto: “Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer”, financiado por el Ministerio de Ciencias, la Universidad de los Andes, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y la Secretaría de Salud.

Referencias

1. Dawson DJ, Sartory DP. Microbiological safety of water. *British Medical Bulletin*. 2000; 56(1):74-83. doi: 10.1258/0007142001902987. PMID: 10885106.
2. Snow J. *Public Health Sanit Rev*. 1856 Oct; 2(7):239-257. PMID: 30378891; PMCID: PMC6004154.
3. Bernal D. Agua, un derecho fundamental y servicio esencial para el Estado. *Derecho y Realidad*. Núm. 16. Julio 2010.
4. Crump KS, Guess HA. Drinking water and cancer: review of recent epidemiological findings and assessment of risks. *Annu Rev Public Health*. 1982; 3:339-57. PMID: 7171374 DOI: 10.1146/annurev.pu.03.050182.002011.
5. Srivastav AL, Patel N, Chaudhary VK. Disinfection by-products in drinking water: Occurrence, toxicity and abatement. *Environ Pollut*. 2020 Dec; 267:115474. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115474. Epub 2020. Aug 23. PMID: 32889516.
6. Wilkins JR 3rd, Reiches NA, Kruse CW. Organic chemical contaminants in drinking water and cancer. *Am J Epidemiol*. 1979 Oct; 110(4):420-48. doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112825. PMID: 389042.
7. Bollaín-Pastor C, Vicente-Agulló D. Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública [Presence of microplastics in water and the potential impact on public health]. *Rev Esp Salud Pública*. 2019 Aug 28;93: e201908064. Spanish. PMID: 31462628.
8. Syafrudin M, Kristanti RA, Yuniarto A, Hadibarata T, Rhee J, Al-Onazi WA, Algarni TS, Almarri AH, Al-Mohaimed AM. Pesticides in Drinking Water-A Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Jan 8;18(2):468. doi: 10.3390/ijerph18020468. PMID: 33430077; PMCID: PMC7826868.
9. Ritter L, Solomon K, Sibley P, Hall K, Keen P, Mattu G, Linton B. Sources, pathways, and relative risks of contaminants in surface water and groundwater:

a perspective prepared for the Walkerton inquiry. *J Toxicol Environ Health A*. 2002 Jan 11;65(1):1-142. doi: 10.1080/152873902753338572. PMID: 11809004.

10. Dudgeon D, Arthington AH, Gessner MO, Kawabata Z, Knowler DJ, Lévêque C, Naiman RJ, Prieur-Richard AH, Soto D, Stiassny ML, Sullivan CA. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biol Rev Camb Philos Soc*. 2006 May;81(2):163-82. doi: 10.1017/S1464793105006950. Epub 2005 Dec 12. PMID: 16336747.

11. Oliveira-Júnior A, Magalhães TB, Mata RND, Santos FSGD, Oliveira DC, Carvalho JLB, Araújo WN. Drinking Water Quality Surveillance Information System (SISAGUA): characteristics, evolution and applicability. *Epidemiol Serv Saude*. 2019; 28(1): e2018117. English, Portuguese. doi: 10.5123/S1679-49742019000100024. Epub 2019 Apr 8. Erratum in: *Epidemiol Serv Saude*. 2019 Aug 22;28(2): e20192020. PMID: 30970073.

12. Gizaw Z, Worku A. Effects of single and combined water, sanitation and hygiene (WASH) interventions on nutritional status of children: a systematic review and meta-analysis. *Ital J Pediatr*. 2019. Jul 4; 45(1):77. doi: 10.1186/s13052-019-0666-2. PMID: 31272479; PMCID: PMC6610930.

13. Chumo I, Kabaria C, Phillips-Howard PA, Saniya S, Elsey H, Mberu B. Mapping social accountability actors and networks and their roles in water, sanitation and hygiene (WASH) in childcare centres within Nairobi's informal settlements: A governance diaries approach. *PLoS One*. 2022. Nov 15;17(11): e0275491. doi: 10.1371/journal.pone.0275491. PMID: 36378662; PMCID: PMC9665391.

Introducción del libro y consideraciones generales

El libro: **“Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá”**, es un producto de investigación del proyecto *“Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer”*, perteneciente al convenio 0008 de 2022 entre la Universidad de los Andes y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Uptc), con el fin de desarrollar actividades de coejecución del contrato 650 de 2021 celebrado entre Minciencias y la Universidad de los Andes, el 24 de noviembre de 2021, obtenido por concurso público en la convocatoria 896 de Minciencias “Fortalecimiento de capacidades regionales de investigación en salud”.

El proyecto 8474, fue propuesto por los grupos de investigación Centro de investigaciones en Ingeniería ambiental de la Universidad de los Andes, Grupo de investigación Biomédica y de Patología de la Uptc y el Grupo de investigación del laboratorio de Salud pública de Boyacá de la Secretaría de Salud de Boyacá, con aval del comité de ética de investigaciones de la Uptc del 4 de junio de 2021, considerándose un proyecto que se encuentra en la categoría de riesgo mínimo, según la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud. El proyecto de investigación tuvo como base las siguientes consideraciones generales:

1. Las Ciencias de la Salud buscan el fomento, la protección y la restauración de la salud como derecho constitucional. Parte de las herramientas para alcanzar estos objetivos se basan en la prevención a través del conocimiento de las causas de la enfermedad y los análisis de riesgo. Las decisiones basadas en riesgos ambientales buscan proteger al público de los efectos nocivos sobre la salud de la contaminación. La información científica sobre la magnitud y

el alcance de los riesgos experimentados por las personas y sobre las causas de esos riesgos es un factor crítico para establecer prioridades y elegir estrategias de mitigación rentables (2).

2. El proyecto involucra el conocimiento adquirido de la importancia de distribuir agua potable y segura para reducir el impacto a la salud de los consumidores, con la necesidad del control de la calidad del agua y el análisis de riesgo de exposición crónica por la presencia de sustancias no deseadas, con el fin de garantizar una gestión adecuada del agua para la prevención de la enfermedad.

Por lo anterior, se dio inicio al trabajo investigativo en función del siguiente marco contextual:

1. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) la salud ambiental involucra todos aquellos factores externos a las personas y que están relacionados con el medioambiente como generador de enfermedad. De sus datos conocemos que en 2012 murieron 12.6 millones de personas a causa de la insalubridad del medioambiente según informe de 2021.
2. El agua es uno de los recursos afectados por la presión antropogénica y el efecto del cambio climático, viéndose disminuida su calidad, lo cual es clave para garantizar el desarrollo de las poblaciones y su salud a corto y largo plazo.
3. El Ministerio de Salud y Protección Social estableció como parte del Conpes 3550 de 2008 los “*Lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad de aire, calidad de agua y seguridad química*”, objetivos e indicadores pertenecientes a su plan decenal 2012-2021. En este plan propone, como uno de los indicadores para la dimensión de salud ambiental, la “*Disponibilidad de mapas de riesgo y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano*” (Conpes 3550).
4. Esta investigación se basó en el conocimiento previo de la toxicidad de los subproductos de desinfección (SPD) que se generan al tratar el agua con cloro u otros agentes químicos. El objetivo fue identificar la

exposición de la población a estos SPD y evaluar el riesgo que suponen para la salud, especialmente con relación al cáncer digestivo. Para ello, se usó un diseño mixto de investigación que combinó métodos cuantitativos y cualitativos. Además, se exploraron alternativas para mejorar la gestión del agua y prevenir la enfermedad por exposición a SPD, entre las cuales se midieron los trihalometanos, los ácidos haloacéticos (AHA) y algunos subproductos emergentes.

5. Los resultados finales del proyecto fueron cuantificar la problemática y visualizar alternativas para lograr que la gestión del agua involucre la prevención de la enfermedad por exposición a SPD en el departamento de Boyacá.
6. Presentamos la metodología de trabajo y algunos resultados finales del proyecto, en los que se han cumplido parcialmente algunos de los objetivos de investigación.

Metodología de investigación

El proyecto (1) *“Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer”*, consolidó el trabajo de tres grupos de investigación, dos con sede en el departamento de Boyacá, con el objetivo general de *“Desarrollar el análisis de riesgo cuantitativo por exposición a subproductos de desinfección relevantes por el uso del agua potable en el departamento de Boyacá como herramienta para la prevención de enfermedad”*. Con base en este objetivo, se planteó diseñar el proyecto de investigación según, Hernández-Sampieri y Mendoza-Torres (3), acorde con la idea de que el proceso de investigar posee una continuidad desde el planteamiento del problema a investigar, en un contexto y con un enfoque o ruta influenciados por una mezcla de paradigmas de estudio (2). En este proyecto se planteó como principal problema de investigación identificar los subproductos de desinfección (SPD) que se producen al clorar el agua y pueden causar cáncer en Boyacá. Este se originó debido a los reportes de mala calidad del agua y un alto riesgo de enfermedad por su consumo, en algunas zonas del departamento.

En Colombia, algunos datos de los prestadores del servicio del acueducto muestran niveles altos de trihalometanos (THM), uno de los tipos de SPD, entre otros residuos que afectan la calidad del agua, como los procedentes de las actividades agrícolas, mineras e industriales, lo que, junto a la falta de plantas de tratamiento de aguas residuales, se convierten en un problema de salud ambiental y pública. Las mediciones de estos subproductos de desinfección no se incluyen en el índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA), que es un índice aproximado para la calidad del agua que nos ubica poblacionalmente en un determinado nivel de riesgo en el país. En Boyacá se han identificado algunas zonas de riesgo alto o medio de acuerdo al IRCA, y no se encuentran datos comparativos entre la calidad del agua con relación a enfermedades no infecciosas, no transmisibles y crónicas.

Hay una necesidad en las autoridades departamentales de mejorar la capacidad de vigilancia de la calidad del agua, investigar e implementar su gestión, para prevenir la enfermedad. Por lo anterior, el departamento de Boyacá requiere de los resultados de un proyecto cuya finalidad ha sido responder a la pregunta de investigación: De acuerdo a los hábitos reales de consumo de agua de la población boyacense y de la calidad del agua tratada que llega a los usuarios en términos de concentraciones de SPD, ¿cuáles pueden ser los riesgos asociados a su exposición, qué porcentaje de casos de cáncer podrían evitarse si el riesgo es suprimido, y cuáles son las estrategias para la prevención de la enfermedad a corto, mediano y largo plazo?

Para la ejecución del proyecto se plantearon los siguientes objetivos específicos, algunos de cuyos resultados no están incluidos en el presente libro.

Objetivos específicos

1. Analizar la exposición de los usuarios al agua potable a través del conocimiento de sus hábitos de uso y consumo de agua en una muestra representativa de la población del departamento como parte del conocimiento del riesgo.

2. Identificar el riesgo cuantitativo por exposición al (los) THM seleccionado(s) por la(s) vía(s) de exposición asociada(s) como parte del conocimiento del riesgo.
3. Calcular el riesgo cuantitativo por exposición al (los) SPD emergente(s) seleccionado(s) por la(s) vía(s) de exposición asociada(s) como parte del conocimiento del riesgo.
4. Determinar el riesgo cuantitativo por exposición al (los) AHA emergente(s) seleccionado(s) por la(s) vía(s) de exposición asociada(s) como parte del conocimiento del riesgo.
5. Evaluar la fracción atribuible al cáncer por exposición a los THM como parte del conocimiento del riesgo.
6. Diseñar un plan de acción para la gestión del riesgo por exposición a subproductos de desinfección relevantes por el uso del agua potable en el departamento de Boyacá.
7. Fortalecer a la región en el conocimiento, medición y comunicación del riesgo a los subproductos de desinfección relevantes por el uso del agua potable.
8. Fortalecer a la región en el conocimiento del cáncer y su relación con el agua potable.

El método para responder la pregunta de investigación aplicó la denominada ruta mixta de investigación con un diseño transformativo secuencial – DITRAS, que tuvo una etapa de recolección de datos cuantitativos de SPD, epidemiológicos y documentales y una segunda etapa para recolección de datos cualitativos durante 15 jornadas de divulgación comunitaria en 15 municipios de Boyacá, en los que se dieron los resultados de riesgo municipal de acuerdo a los datos cuantitativos de SPD y en los cuales se involucró a autoridades sanitarias, ambientales, municipales y a la población general interesada.

Durante la etapa de divulgación emergieron algunas categorías sobre la percepción del acceso al agua y el conocimiento público de la desinfección, aspectos cualitativos anidados en lo explícito del proyecto. Esto se debió

a que los métodos de recolección de la primera etapa tuvieron respuestas dependientes del nivel educativo, así como la variación en la comunicación con la población objetivo del proyecto en las jornadas. Probablemente, porque sus hábitos de consumo y su percepción de la calidad dependen no solo de agentes externos, sino de su propia cultura e información. Así mismo, durante el proyecto surgió la necesidad de llevar a cabo múltiples revisiones de la literatura, para lo que se utilizó un método de revisión integrativa (4) de ejecución concurrente (sistemática) donde se fueron haciendo preguntas a medida que se identificaba mejor el fenómeno de estudio y se definía la mejor manera de involucrar las dos disciplinas: la medicina y la ingeniería.

En el presente libro **“Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá”**, se presentan en cada capítulo la introducción, los métodos, los resultados, la discusión o las conclusiones seleccionadas por sus autores investigadores como parte de algunas respuestas parciales a los objetivos de investigación, comenzando con una contextualización del riesgo en salud.

Referencias

1. Proyecto Minciencias 84746 código SGI UPTC número 3290.
2. Sexton K, Selevan S, Wagener DK, Lybarger JA. Estimating Human Exposures to Environmental Pollutants: Availability and Utility of Existing Databases, Archives of Environmental Health: An International Journal. 1992. 47:6, 398-407, DOI: 10.1080/00039896.1992.9938381.
3. Hernández-Sampieri R, Mendoza, C. Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. 2018. Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education, Año de edición: 2018, ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p.
4. Herrera-Amaya GM, Casas-Ureña D, Manrique-Abril FG. Calidad de atención de Enfermería en Colombia: una revisión integrativa. En: Barrera, L. F. Manrique, F., compiladores. Evidencias: de la teoría a la práctica de enfermería UPTC. 2023. Tunja: Editorial UPTC. 20-74.

Contaminación del agua y medición del riesgo de cáncer²

Bibiana Matilde Bernal Gómez³
Luisa Fernanda Salas Saavedra⁴

Introducción

La contaminación del ambiente incluye los procesos humanos que puedan repercutir negativamente en la calidad del agua, el suelo y el aire. La industrialización ha permitido el incremento de sustancias denominadas tóxicos o xenobióticos que en su ciclo terráqueo inducen efectos celulares relacionados con su mecanismo de acción y que producen efectos tóxicos. Muchos de estos se encuentran en aquellos compuestos volátiles que se producen con las emisiones de vehículos o para la generación de energía, con la combustión doméstica de combustibles sólidos como el carbón, para la construcción de casas como el asbesto y una variedad de químicos procedentes de industrias, que incluyen agentes que contaminan y producen cáncer, conocidos como carcinógenos.

2 doi: <https://doi.org/10.19053/uptc.9789586608459.2>

3 Médica cirujana, especialista en patología. Doctora en microbiología, salud pública y sociedad. Docente e investigadora de la Escuela de medicina de la Uptc y líder del Grupo de Investigación Biomédica y de Patología de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

4 Ingeniera ambiental. Especialista auxiliar de investigación del proyecto SGI 3290, financiado por Minciencias y la Universidad de los Andes. Grupo de Investigación Biomédica y de Patología de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Para la medicina, muchos carcinógenos identificados como probables o posibles, se pueden encontrar en el medioambiente y todas las personas pueden llevar rastros de estos contaminantes en sus cuerpos, lo cual se ha denominado exposición (1). Por eso, en la prevención primaria de la enfermedad, es importante la contaminación del aire, el agua y el suelo, pues contribuye con una carga mundial, en el caso específico de este libro, para la presentación del cáncer con diferencias en magnitud según el entorno geográfico. Existen también amplias disparidades en la exposición relacionada con los niveles de contaminación, que son particularmente altos en los países de industrialización reciente y rápida, los cuales carecen de sistemas de vigilancia del riesgo o donde el control y la regulación ambiental de agua, suelo y aire, son menos extensos y rigurosos (2,3,4).

En el agua potable, el arsénico inorgánico es un carcinógeno reconocido (5). Otros contaminantes que producen enfermedad, como los subproductos de la desinfección, los solventes orgánicos, los nitratos, los nitritos y algunos pesticidas, también pueden contribuir a aumentar la carga del cáncer o medida del peso en salud pública, que se da por morbilidad, mortalidad, años de esperanza de vida perdidos por muerte prematura (AVPM) y años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) (6-8).

La exposición a importantes fuentes de contaminación ambiental en el agua, el suelo y el aire se ha reducido en parte a la implementación de medidas reglamentarias y mejoras tecnológicas, de acuerdo con Cohen y Cantor (9). Lo cual, sin embargo, no ha producido una mejoría en la epidemiología del cáncer o en la reducción de la carga de la enfermedad ya instaurada (10,11). Una forma de disminuir la frecuencia de una enfermedad crónica, como el cáncer, es la regulación basada en el riesgo epidemiológico, que probablemente sea la más efectiva. Se debe a que no solo los factores ambientales están dentro del riesgo de producir cáncer, sino también a que se ha identificado lo relevantes que son para el inicio de esta enfermedad, algunos hábitos del comportamiento humano, particularmente el consumo de tabaco, de alcohol y una dieta productora de cáncer (12). No obstante, las regulaciones de agua, aire y suelo en el ámbito local, regional, nacional y mundial permiten aumentar el control sobre los agentes carcinógenos que el individuo y la

comunidad ignoran o no pueden medir su exposición (13). Estos factores han sido intervenidos mediante regulaciones o políticas ambientales con base en políticas de seguimiento a la salud pública y ambiental y sus legislaciones pertinentes (14).

En sí, la exposición al agua contaminada con químicos carcinógenos forma parte del denominado exposoma, es decir, la acumulación humana del riesgo de exposición a sustancias que producen cáncer o la suma del riesgo de exposición al cáncer, que son situaciones similares con diferencias relevantes. El riesgo acumulado es un valor específico con relación a este tipo de asociación biológica, debido a que no siempre se presenta la enfermedad con la misma caracterización de la exposición que tenemos, lo cual es una limitación de los estudios ecológicos relacionados con el riesgo atribuible. En otras palabras, aunque se presente la enfermedad con los mismos niveles del tóxico, no podemos caracterizar dichos niveles de forma similar en todos los ecosistemas (15,16).

Asimismo, se puede definir el riesgo como el producto entre la probabilidad que un evento ocurra y sus consecuencias potenciales, que a menudo se describen como la magnitud del impacto (17), entre otras maneras de identificar el riesgo (18).

En la literatura científica existen diversas maneras de aproximación a la estimación del riesgo, los cuales incluyen que se pueda estimar de los impactos medidos en actividades, contextos y ambientes similares, o basado en los resultados numéricamente validados obtenidos de forma semiempírica, o producto de la aplicación de modelos empíricos, o procedentes de mecanismos teóricos causales o denominados de causa-efecto, entre otros; así como también la opinión pericial de expertos, que cuenta con un nivel amplio de evidencia. Usualmente, la estimación del riesgo es considerada superior si se usa más de un tipo de evaluación del riesgo. En general, el mismo es la relación o producto estimado que se da entre los factores de sensibilización al riesgo, por aquellos medibles de la exposición (15-18).

El cáncer es la enfermedad crónica más prevalente en el mundo y se define como un conjunto de enfermedades variadas y diversas cuyo mecanismo

común es el daño genético celular, que se produce por una susceptibilidad heredada, en las que los tejidos son más vulnerables a un ambiente dañino o de riesgo, y por lo mismo, a presentar un crecimiento celular descontrolado que produce metástasis y la muerte del paciente. Clínicamente, supone una carga para el sistema sanitario, consumiendo los recursos del sistema y, a largo plazo, ha sido considerado como el fenómeno de mayor impacto en la salud pública a nivel mundial durante el último siglo. Su prevalencia e incidencia se mantienen en un incremento constante con las implicaciones que esto conlleva, tanto para los pacientes como para el sistema productivo y sanitario de cada país, tener este tipo de enfermedad (18,19).

En el año 2008 la prevalencia global de cáncer era cercana a los 28 millones de personas (20). En 2012, esta cifra aumentó a 32,6 millones de pacientes con diagnóstico de cáncer a nivel mundial. Asimismo, en ese año se reportaron 14,1 millones de casos nuevos y se presentaron cerca de 8,2 millones de defunciones por esta causa. Por otra parte, se ha hecho la previsión que a partir de 2012 y para 2032, esta cifra aumentará a 22 millones de casos nuevos anuales o más (21). Los enfermos experimentan el diagnóstico de cáncer como un acontecimiento traumático en sus vidas, lo cual altera la imagen que tienen sobre sí mismos con un compromiso de su funcionalidad en el hogar y en el trabajo (22). Es importante destacar que los sistemas de salud se ven afectados de manera directa, dado que el cáncer genera costos elevados para la solvencia de los mismos; se estima que en solamente un año el Instituto Nacional de Salud Estadounidense (NIH) puede llegar a gastar hasta 216 billones de dólares cubriendo los costos generados por la enfermedad; 86 billones en costos médicos directos de los gastos de salud y 130 para los costos indirectos de mortalidad, relacionados con los costos atribuidos a la pérdida de productividad por incapacidad y muerte prematura (23,24).

Existen diversos factores que se asocian a un mayor riesgo de desarrollar cáncer; por lo tanto, la identificación e intervención temprana de los mismos desde la perspectiva de la salud pública no solo es de relevancia para la promoción de la salud, sino que además tiene un efecto positivo para la economía de los sistemas sanitarios.

Entre mayor edad se tiene (25), la probabilidad de tener cáncer es superior, así como si se carece de hábitos nutricionales saludables, reductores de la incidencia de cáncer, como lo es una dieta enriquecida con frutas y vegetales. Hábitos nocivos como el consumo crónico de tabaco y de alcohol, dietas con una mayor proporción de grasas saturadas y alimentos procesados o con mayor proporción de carne de vacuno, o carne conservada en aditivos con base en nitratos, se relacionan con un riesgo superior de cáncer. Los antecedentes familiares de cáncer también son un factor de riesgo importante para la enfermedad, por lo que la detección temprana en este tipo de pacientes suele hacerse como prevención secundaria o diagnóstico temprano, lo cual se da por medio de estrategias de promoción de la salud y cuidado.

Se han identificado una gran cantidad de químicos, agentes infecciosos o radiaciones mutagénicas que se convierten en carcinógenos en el cuerpo porque producen mutaciones en los genes, principalmente relacionados con la aparición del cáncer en modelos experimentales o en estudios epidemiológicos de asociación (26). Un ejemplo notorio ha sido el cáncer de pulmón con el consumo crónico de tabaco, en el que también se han encontrado mutagénesis y cambios en genes supresores como p53, que favorecen la progresión o pronóstico maligno (27,28).

Por esto, los factores ambientales son investigados por la epidemiología epigenética que proporciona información sobre las alteraciones moleculares somáticas o rasgos asociados al desarrollo del cáncer (29). Dichos rasgos han sido usados para comprender adecuadamente los factores de riesgo e identificar biomarcadores para la detección temprana de la neoplasia maligna y optimizar su tratamiento.

Algunos eventos epigenéticos se producen durante el desarrollo y la vida útil de un organismo, y son esenciales para permitir la propagación estable de algunos genes de una generación de células a la siguiente. Estos eventos incluyen la impronta y la inactivación del cromosoma X. Otros mecanismos epigenéticos (30), como la metilación del ADN, el silenciamiento génico (o inactivación) mediado por ARN y las modificaciones de la cromatina, pueden actuar solos o en combinación para mediar la reprogramación durante el

desarrollo y el mantenimiento de la identidad de la célula durante la vida de un organismo. Por ello, algunos mecanismos truncados en estos procesos o en sí mismos se consideran carcinógenos.

Estudios en modelos de cultivos celulares han establecido que los componentes específicos de la dieta pueden influir en los patrones de metilación del ADN. Estos estudios se han hecho tanto en roedores como en humanos. Uno de los hallazgos más relevantes es que la deficiencia de ácido fólico y folatos, se ha asociado con un mayor riesgo de cáncer (31). Este riesgo se incrementa en diferentes localizaciones, incluyendo el cáncer de pulmón y el de glándula mamaria.

Dentro de los contaminantes ambientales que aumentan el riesgo de aparición del cáncer en hombres se encuentran el PCB 153 y el PCB 138. Estos son un grupo de tóxicos sintéticos que se usan en procesos industriales y que causan daños al ADN por dos mecanismos. Por un lado, producen alteraciones cromosómicas sobre la estructura de los genes y en sus metabolitos, inducen la generación de radicales que producen daño oxidativo al ADN. Estos efectos han sido detectados en neoplasias malignas de hígado y de seno (32).

Estudios de casos y controles han revelado que el uso de productos de limpieza y ambientadores (33) aumenta el riesgo de cáncer de seno y se ha demostrado que, en roedores, estos productos influyen en la proliferación de las células sensibles a los estrógenos, o afectan el desarrollo de la glándula mamaria durante la exposición prenatal; este factor de riesgo es evitable, por lo cual, es necesario desarrollar más investigaciones para definir su mecanismo de acción.

Otro de los riesgos, actualmente asociados con la presentación del cáncer de mama, es haber nacido o vivir en un área urbana (34), debido a una mayor contaminación del aire y otras exposiciones ambientales que aún no están bien definidas (35). La exposición a DDT, un organoclorado que fue utilizado como insecticida y que aún se encuentra depositado en las tierras usadas para agricultura, es transferido a los alimentos, en especial a los aceites, y que posteriormente son consumidos por los individuos, se ha ligado con aumento del riesgo de este tipo de cáncer (36).

Identificación del riesgo de cáncer

Antecedentes

El riesgo de cáncer en medicina (37) se puede estimar o precisar usando estudios epidemiológicos; estos estudios miden la relación entre un agente que produce daño, como un químico, y la enfermedad que causa. Hay diferentes tipos de estudios, según el diseño, el tiempo y la población que se analiza. Algunos ejemplos son los estudios transversales, los estudios de cohortes y los estudios de casos y controles. Estos dos últimos pueden dar una estimación cuantitativa de la asociación entre el agente y la enfermedad. Sin embargo, tienen algunas limitaciones y dificultades. Por ejemplo, no es posible proporcionar un agente peligroso a un ser humano, ni medir su efecto directo. Además, es difícil medir con precisión cuándo y cómo se produce la exposición y cuándo aparece la enfermedad (38).

Otros tipos de estudios, como los informes de caso, los estudios ecológicos y los estudios descriptivos transversales, pueden dar información cualitativa o descriptiva sobre la exposición y la enfermedad. Estos estudios también tienen sus retos: pueden existir muy pocos casos o agentes dañinos o peligrosos inciertos. Además, estos estudios no siempre pueden demostrar una clara asociación causal entre un agente y una enfermedad. Esto se debe a que existen factores de confusión que pueden influir en la etiología de la enfermedad. Algunos de estos factores son multifactoriales y se trata de agentes patógenos ambientales, el estado nutricional de las personas y los factores genéticos que modulan la susceptibilidad a la enfermedad.

Los estudios en humanos son susceptibles de sesgo y errores sistemáticos en el diseño, la realización o el análisis que den lugar a estimaciones erróneas del efecto de una exposición sobre el riesgo de enfermedad (39). Por esto, son fundamentales para el riesgo, estas definiciones, de acuerdo a NRC 2008 (40):

- 1. Evaluación del riesgo.** Es el resultado de un estudio epidemiológico que estima la magnitud del efecto, así como la probabilidad que determinados individuos o poblaciones expuestos puedan desarrollar una enfermedad.

2. **Estimación del riesgo.** Es la identificación del daño o peligro de tener una enfermedad y está relacionada con tres fases: la fase de evaluación entre dosis y respuesta de lesión, la evaluación de la exposición y la caracterización del riesgo (41).
3. **Identificación del agente nocivo.** Es una etapa donde se obtiene el conocimiento posterior a determinar si una exposición puede aumentar la incidencia de un efecto adverso para la salud.

Métodos

En medicina, los estudios de cohorte se basan en el seguimiento de un grupo de individuos que comparte una característica en común y que ha sido incluida por los investigadores. Esta puede ser el año de nacimiento o un tiempo determinado para un diagnóstico o terapéutica similar con los otros participantes del estudio. En el campo clínico, una cohorte es un grupo que forma parte de un ensayo clínico o un estudio en el que se hace una observación detallada de sus participantes durante un período de tiempo. En este tipo de estudios, el investigador selecciona un grupo de individuos inicialmente sanos (una cohorte) y que puedan estar expuestos a cualquier número de agentes potencialmente peligrosos, y sigue a los individuos de este grupo a lo largo del tiempo para determinar la incidencia de una enfermedad concreta, que pueda estar asociada con una o varias exposiciones. La incidencia en expuestos se compara con la incidencia en no expuestos, o con grupos con distinta exposición o dosis, pero puede tener estadísticas no significativas y ocurrencia de sesgo y error propio de los estudios humanos. Existen diversos métodos para determinar el agente nocivo, entre los que se encuentran los ensayos con modelos animales o cultivos celulares, o los métodos experimentales que utilizan células obtenidas de cultivo celular y que se adaptan para reproducir las condiciones naturales.

Con un estudio de cohortes se puede calcular el riesgo relativo (RR) de una enfermedad concreta en poblaciones expuestas y no expuestas, que se define como la proporción de enfermos entre expuestos y no expuestos. En un estudio de casos y controles, un investigador identifica a un grupo de individuos

con una enfermedad (casos) y un grupo comparable sin esa enfermedad (controles), y determina qué proporción de los casos estuvo expuesta y qué proporción no (39). Si la proporción de individuos expuestos a un agente es diferente entre los casos y los controles, entonces la exposición al agente puede estar asociada a una mayor o menor incidencia de la enfermedad. Estos estudios arrojan datos que se usan para estimar una razón de proporciones u *odds ratio*, que se define como la comparación de las probabilidades de exposición entre casos y controles.

Recientemente, se ha combinado cohortes con casos y controles en un único estudio denominado estudio de casos y controles anidado. Esto se produce cuando se identifica un estudio de casos y controles dentro de un estudio de cohortes ya establecido. En estos estudios, los controles son una muestra de individuos en riesgo de padecer la enfermedad en un momento específico.

Cuando se evalúa el riesgo se propone un segundo paso (40): un estudio de dosis-respuesta; esta evaluación determina la relación entre la dosis de un agente tóxico y los efectos sobre la salud. Esta relación suele representarse gráficamente como una curva dosis-respuesta, que muestra la proporción de una población que experimenta un efecto adverso para la salud y la dosis o el estimado de la exposición. En esta curva es posible identificar un NOEL, que es la dosis más alta sin efectos nocivos en las pruebas realizadas y puede tener un umbral. La diferencia con NOAEL (nivel sin efecto adverso observado) reside en el concepto de efecto adverso o perjudicial, es decir, un estudio experimental que dé como resultado NOAEL deberá haber predeterminado el efecto que debe observarse. También son medidas para evaluar la toxicidad de un agente tóxico agudo o carcinogénico, la dosis letal 50 (DL50), dosis que mata al 50 % de los animales de experimentación; la dosis letal 10 (DL10), la dosis que mata al 10 % de los animales; la dosis efectiva 50 (ED50), la dosis que causa un efecto, no necesariamente mortal, en el 50 % de los animales; el índice de dosis-efecto (IDT), la dosis que corresponde a una proporción de respuesta en los animales; la dosis de referencia (IDTMP), la dosis por debajo de la cual no se esperan efectos adversos para la salud, y la ingesta diaria provisional máxima tolerable (PMTDI), la dosis que se obtiene a partir del nivel sin efecto observable (NOEL) aplicando factores de incertidumbre

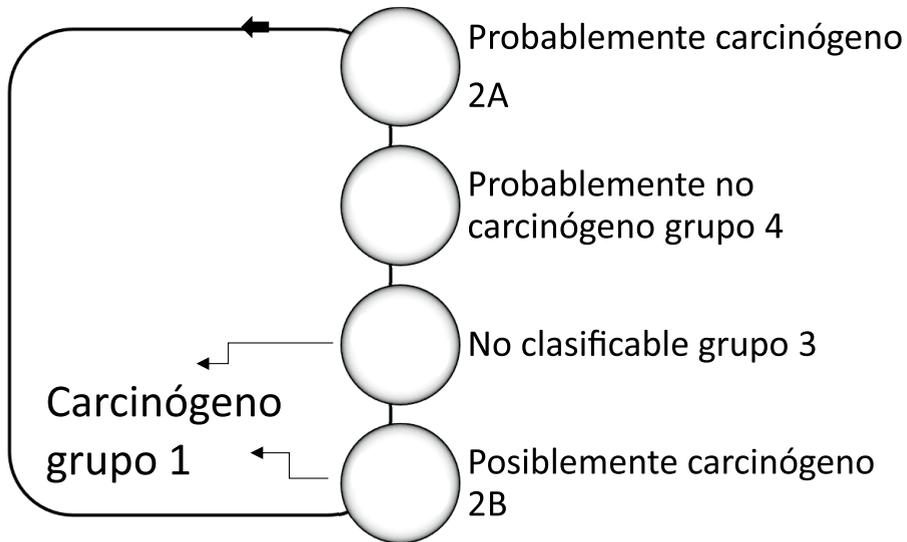
y el nivel con efecto observable más bajo (LOEL). Para la carcinogénesis hay ausencia de umbral si la sustancia o sus metabolitos reaccionan con el ADN genómico (42). Por lo tanto, se asume que no hay dosis segura por encima de cero (IARC). El principal ejemplo de este tipo de fenómeno es la acción de aflatoxina B1, que no tiene umbral para cáncer, ya que todos sus metabolitos reaccionan con el ADN. Esto puede considerarse como una medida del efecto y la exposición.

Para la medicina y desde la propuesta del término por sir Christopher Wild en 1998, el exposoma abarca todas las exposiciones ambientales desde la concepción y surge como una nueva estrategia para evidenciar los factores de riesgo de enfermedades generadas por el medioambiente. Un ejemplo es precisamente cómo se identificó que la exposición a aflatoxina B1 en el agua de bebida de ratas, producía seis cambios lineales de ADN con aductos en el hígado tras una dosis única y se incrementaba con la exposición crónica, así hubiese sido una dosis reducida, conocimiento publicado desde 1990 (43).

Además del daño al ADN, también es posible encontrar defectos en la expresión de proteínas y el funcionamiento del sistema de inmunovigilancia que tengan otros mecanismos adicionales de carcinogenicidad relevantes para la promoción y progresión del cáncer.

Los aductos de ADN son formas de ADN que resultan de una exposición a carcinógenos, pero una vez formados pueden ser reparados por el aparato nuclear. Esto hace cambiar la visión del cáncer de manera exclusiva sobre el DNA y da peso al metabolismo de las histonas y la maquinaria nuclear de reparación celular. Cuando la estructura original de ADN se repara mal, se origina una mutación somática que puede convertirse en un biomarcador de cáncer. Los aductos de proteína, a pesar de no tener efectos biológicos adversos, sirven para medir la exposición a sustancias extrañas. En el siguiente gráfico se grafica una vía para la clasificación de compuestos carcinógenos (1).

Figura 1. Clasificación de los carcinógenos de la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) y la posibilidad de cambio en sus categorías



- Grupo 1. Carcinógeno para el ser humano.
- Grupo 2A. Probablemente carcinógeno para los seres humanos.
- Grupo 2B. Posiblemente carcinógeno para los seres humanos.
- Grupo 3. No clasificable en cuanto a su carcinogenicidad para el ser humano.
- Grupo 4. Probablemente no carcinógeno para los seres humanos.

Fuente: Elaboración propia sobre la clasificación de la IARC.

En la Figura 1 se representan los grupos 2A, 2B, 3 y 4 como factibles de cambiar al grupo 1, lo cual puede ocurrir dependiendo de los hallazgos de estudios epidemiológicos, en constante evaluación mundial. Las palabras probable y posible cambiarán, si se identifica estadística o experimentalmente, su capacidad de producir cáncer. Incluso aquellos compuestos clasificados como probablemente no carcinógenos pueden ser identificados como probables o posibles dependiendo de los reportes de causalidad.

Para el cálculo de la exposición, en este caso particular, de los subproductos de desinfección presentes en el agua, se siguen las siguientes tres etapas:

1. Cálculo de la exposición.

2. Caracterización del entorno de exposición.
3. Identificación de las vías de exposición y cuantificación de la exposición.

Para caracterizar una exposición es necesario analizar el entorno físico y las poblaciones expuestas. El entorno físico incluye factores como el clima, el contexto geográfico, la vegetación, el tipo de suelo y la ubicación del agua. La población expuesta al carcinógeno es una categoría sobre quienes viven cerca del agente de riesgo; o aquellos que consumen dietas, agua o inhalan aire que contengan el carcinógeno; o quienes acuden a una zona cercana al agente de riesgo por trabajo o para jugar, y cualquier otro grupo demográfico por edad o sexo.

Para cuantificar la exposición se estima una dosis diaria promedio (DDA) o ingesta. La DDA suele expresarse como la masa de sustancia en contacto con el cuerpo por unidad de peso corporal por unidad de tiempo, o para la ingestión (mg/kg); o como la masa de sustancia por metro cúbico de aire ambiente, para la inhalación (mg/m³). Si el agente es carcinógeno, se calcula una dosis media diaria durante toda la vida (LADD), con un tiempo medio igual a la esperanza de vida. Para calcular ADD o LADD, E debe ser estimada (E es la concentración de un agente en el tiempo). La exposición total se expresa como la integral (suma) de las concentraciones C en el tiempo: $E = \int C(t) dt$. Sin embargo, la concentración integrada puede ser difícil de obtener, por lo que se puede estimar la media aritmética de la concentración o C promedio; la duración de la exposición ED para estimar la exposición total: $E = C \text{ promedio} * ED$. IR= Tasa de ingesta: es la cantidad del agente que atraviesa la barrera de ingesta inicial al cuerpo durante un periodo de tiempo. Esta puede medirse en mg/día o L/día. A continuación, el ADD se calcula como: $ADD = (E * IR) / (\text{Peso corporal} * AT)$; AT (average time= Es el tiempo promedio en días). LADD se calcula de forma similar; en este caso, la duración de la exposición es el número de años que un individuo está expuesto a un carcinógeno y AT es la esperanza de vida.

La caracterización del riesgo se realiza de forma diferente para los no carcinógenos y los carcinógenos. En el caso de los efectos tóxicos, la población de un agente se compara con la PMTDI (Ingesta diaria máxima provisional

tolerable) del agente. Para los efectos carcinógenos, el LADD individual o poblacional se compara con el PMTDI que se obtiene dividiendo el NOEL o BMDL por factores de incertidumbre que tienen en cuenta la extrapolación de los animales a los humanos y la variación entre humanos. Así pues, la PMTDI es un nivel diario para los humanos, que es poco probable causar efectos adversos para la salud. El ADD puede calcularse basándose en la dosis humana al agente peligroso. Si $ADD > PMTDI$, entonces existe un riesgo potencial para la salud. Una forma de expresarlo es el cociente de peligrosidad de la EPA (*Environmental Protection Agency*) o HQ. El HQ se calcula como la relación entre el ADD de un agente y la PMTDI de ese mismo agente: $HQ = ADD/PMTDI$. Si $HQ > 1$, entonces un individuo o una población pueden sufrir un riesgo para la salud debido a sus niveles de exposición al agente peligroso. Si $HQ < 1$, entonces tanto individuo como la población tienen un riesgo poco probable para la salud.

Para la caracterización del riesgo de carcinógenos en lugar de utilizar un umbral, como HQ en la evaluación de no carcinógenos, el riesgo carcinogénico es estimado para un individuo o una población a lo largo de una vida prevista. Por eso, es importante el factor de pendiente de la curva dosis-respuesta. La LADD se estima basándose en la exposición al agente carcinógeno. A continuación, se saca el riesgo: $Riesgo = LADD * \text{factor de pendiente}$. En este caso, el Riesgo es una probabilidad sin unidad de que un individuo desarrolle cáncer en su vida por estar expuesto a un agente carcinógeno.

Estudios de fracción atribuible

La fracción atribuible (44,45) es una medida epidemiológica que estima el porcentaje de casos de cáncer que se podrían prevenir al eliminar o reducir la exposición a un determinado factor de riesgo. Estos datos proceden de la prevalencia de exposición al factor de riesgo, el riesgo relativo asociado al factor y la incidencia o mortalidad por cáncer en una población o región, o por una ocupación. Esta metodología y sus cálculos (46) ha permitido, entre otros, identificar causas de cáncer modificables, tales como el tabaco, el alcohol, la obesidad, la dieta, la infección, la radiación o la contaminación y se considera que sus resultados implementan estrategias de prevención primaria y secundaria del cáncer, así como para evaluar su impacto y efectividad.

Llorca (46) usa una fórmula de Rockhill (47) para calcular la fracción atribuible poblacional (FAP) con una exposición discreta como $FAP = [P(D) - \sum C P(D) C, E -) P\textcircled{C}] / P(D)$, donde $P(D)$ es la probabilidad de enfermedad en una población con expuestos y no expuestos; y $\sum C P(D) C, E -) P\textcircled{C}$ es la probabilidad de enfermedad sin exposición, según otros factores de confusión. Y la modifica con respecto al riesgo relativo (RR) así:

$$FAP = \sum_{n=1}^N P_i \times (RR_i - 1) + \sum_{n=1}^N P_i \times (RR_i - 1).$$

Donde P_i : es el porcentaje de la población expuesta a la concentración i .

RR_i : es el riesgo relativo asociado a la concentración i .

N = es el número de rangos de exposición.

Regresión bayesiana con máquinas Kernel

La regresión bayesiana con máquinas Kernel (BKMR, por sus siglas en inglés en 48 y 49) es un método de regresión que permite inferir datos de manera flexible, especialmente en estudios con resultados no paramétricos, como los que involucran variables humanas. Su utilidad radica en que puede detectar y estimar el efecto de una combinación de factores etiológicos, modelando la relación entre la exposición y la respuesta mediante funciones matemáticas Kernel. La regresión bayesiana permite estimar la distribución posterior de los parámetros, así como hacer predicciones y comparar modelos. La regresión bayesiana se puede aplicar a diferentes tipos de modelos, como la regresión lineal, la regresión logística y la no lineal.

Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado cuatro guías de recomendación de la calidad del agua desde 1958, basadas en evidencia científica y opinión de expertos (50,51). Estas guías tienen como objetivo principal alertar a los gobiernos y sus políticas públicas sobre la importancia de la salud y el saneamiento ambiental. Dichas guías recogen los avances científicos y las investigaciones sobre los factores etiológicos que afectan la

calidad del agua, así como los desafíos que plantean la resistencia microbiana y el cambio climático. La OMS también hace énfasis en la prevención de la contaminación por productos químicos de la agricultura, la minería y la industria, que aumentan la exposición a agentes tóxicos como: arsénico, fluoruro, plomo, nitrato, selenio y uranio. Además, la OMS indica la necesidad de adaptar las normas a las circunstancias geográficas y contextuales de cada país. Según la OMS, “Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo humano representan una carga importante en la salud humana. Las intervenciones para mejorar la calidad del agua de consumo humano proporcionan beneficios significativos para la salud”.

Desde 1999, según el documento conocido como Marco de Estocolmo, la OMS propone que las guías para el agua de consumo humano, las aguas residuales y las aguas recreativas, se basen en una evaluación del riesgo, un plan de gestión del riesgo y un control de la exposición en un marco integrado. Las normas adaptadas tienen mayor cumplimiento cuando se elaboran con la participación de las comunidades y sus necesidades específicas. Estas guías nacionales requieren fijar metas propias de bienestar y estado de salud (mortalidad y morbilidad tolerable), calidad (regulación de la dosis de determinado compuesto químico), retroalimentación (desempeño de las medidas adoptadas) e innovación tecnológica (nuevos procesos de desinfección).

Para consensuar los resultados en las metas de salud pública se ha escogido la medida estándar de los AVAD-DALY (Años de vida ajustados por discapacidad), que son datos que establecen cargas, reducciones y niveles de riesgo en salud pública por diferentes tóxicos. Para la OMS, la carga de morbilidad tolerable se define como un límite superior de 10^{-6} AVAD por persona por año, que equivale a un riesgo de cáncer en exceso a lo largo de la vida de aproximadamente 10^{-5} , aunque también plantea niveles inferiores más realistas para poblaciones en desarrollo. Los AVAD-DALY se expresan como el número de años perdidos debido a enfermedad, discapacidad o muerte prematura.

Referencias

1. Cohen AJ, Cantor KP. Pollution of air, water and soil. En: World Cancer Report 2014. 2014. International Agency for Research on Cancer IARC.
2. World Health Organization. A global overview of national regulations and standards for drinking-water quality, 2nd ed. Geneva: World Health Organization. 2021. License: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/>
3. UN-Water. Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all. Version: July 2021. Geneva, Switzerland.
4. United Nations Environment Programme. From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. 2021. Nairobi.
5. Sauvé S. Time to revisit arsenic regulations: comparing drinking water and rice. 2014 May 17. BMC Public Health.; 14:465. doi: 10.1186/1471-2458-14-465. PMID: 24884827; PMCID: PMC4049411.
6. Abtahi M, Dobaradaran S, Koolivand A, Jorfi S, Saeedi R. Assessment of cause-specific mortality and disability-adjusted life years (DALYs) induced by exposure to inorganic arsenic through drinking water and foodstuffs in Iran. 2023 Jan 15. Sci Total Environ.;856(Pt 1):159118. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159118. Epub 2022 Sep 29. PMID: 36181805.
7. Naddafi K, Mesdaghinia A, Abtahi M, Hassanvand MS, Beiki A, Shaghghi G, Shamsipour M, Mohammadi F, Saeedi R. Assessment of burden of disease induced by exposure to heavy metals through drinking water at national and subnational levels in Iran, 2019. Environ Res. 2022 Mar;204(Pt B):112057. doi: 10.1016/j.envres.2021.112057. Epub 2021 Sep 14. PMID: 34529973.
8. Picetti R, Deeney M, Pastorino S, Miller MR, Shah A, Leon DA, Dangour AD, Green R. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. 2022 Jul. 210:112988. doi: 10.1016/j.envres.2022.112988. Epub 2022 Feb 22. PMID: 35217009.

9. Stewart BW, Wild, CP. (Eds.). World cancer report 2014. International Agency for Research on Cancer. 2014.

10. Deo SVS, Sharma J, Kumar S. GLOBOCAN 2020 Report on Global Cancer Burden: Challenges and Opportunities for Surgical Oncologists. *Ann Surg Oncol*. 2022 Oct; 29(11):6497-6500. doi: 10.1245/s10434-022-12151-6. Epub 2022 Jul 15. PMID: 35838905.

11. Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer J Clin*. 2021 May; 71(3):209-249. doi: 10.3322/caac.21660. Epub 2021 Feb 4. PMID: 33538338.

12. Kerr J, Anderson C, Lippman SM. Physical activity, sedentary behaviour, diet, and cancer: an update and emerging new evidence. *Lancet Oncol*. 2017 Aug; 18(8): e457-e471. doi: 10.1016/S1470-2045(17)30411-4. Epub 2017 Jul 26. PMID: 28759385; PMCID: PMC10441558.

13. Bernal B, Rodríguez MS, Lemus M, Zipa Y, Salas, L. Jornadas de divulgación comunitaria sobre el riesgo atribuible al cáncer y la calidad del agua de consumo humano en 15 municipios de Boyacá [Ponencia oral]. 2023, julio 14. IV Simposio Nacional e Internacional de Medicina Familiar y Atención Primaria de Salud y Memorias en revista Salud y Sociedad Uptc, Tunja, Boyacá, Colombia

14. Rice G, Spethmann T. Carcinogens in drinking water: Human health risk assessment and management. 2017. En de Almeida AP, Quintella CM (Eds.), *Emerging issues in the water environment during anthropocene: An overview* (pp. 1-24). IntechOpen.

15. Iwasaki M, Itoh H, Sawada N, Tsugane S. Exposure to environmental chemicals and cancer risk: epidemiological evidence from Japanese studies. *Genes Environ*. 2023 Mar 22; 45(1):10. doi: 10.1186/s41021-023-00268-3. PMID: 36949525; PMCID: PMC10031963.

16. Bevan RJ, Harrison PTC. Threshold and non-threshold chemical carcinogens: A survey of the present regulatory landscape. *Regul Toxicol*

Pharmacol. 2017 Aug; 88:291-302. doi: 10.1016/j.yrtph.2017.01.003. Epub 2017 Jan 21. PMID: 28119000.

17. Soto D, León-Muñoz J, Dresdner J, Luengo C, Tapia FJ, Garreaud R. Salmon farming vulnerability to climate change in southern Chile: understanding the biophysical, socioeconomic and governance links. *Reviews in Aquaculture*. 2019; 1–21. <https://doi.org/10.1111/raq.12336>

18. Guerrero I. Assessing the Economic Value of Public Health Programs Based on Risk: The Case of the Cancer Plan in France. *Value in Health*. 2010;13(5).

19. Mielenz TJ, Durbin LL, Hertzberg F, Nobile-Hernandez D, Jia H. Predictors of and health- and fall-related program outcomes resulting from complete and adequate doses of a fall risk reduction program. *Transl Behav Med*. 2017 Jun; 7(2):330-340. doi: 10.1007/s13142-016-0444-2. PMID: 27718062; PMCID: PMC5526800.

20. Bray F, Ren JS, Masuyer E, Ferlay J. Global estimates of cancer prevalence for 27 sites in the adult population in 2008. *Int J Cancer* 2013; 132(5):1133–1145.

21. Shih YC, Hurria A. Preparing for an epidemic: cancer care in an aging population. *Am Soc Clin Oncol Educ Book*. 2014:133-7. doi: 10.14694/EdBook_AM.2014.34.133. PMID: 24857069.

22. Jaehee Y, Min Ah k, Tian T. Perceived long-term and physical health problems after cancer: Adolescent and young adult survivors of childhood cancer in Korea. *European Journal of Oncology Nursing*. 2014; 18: 145-150.

23. American Cancer Society. *Cancer Facts & Figures 2014*. Atlanta: ACS; 2014: 1-66.

24. Guerrero I. Assessing the Economic Value of Public Health Programs Based on Risk: The Case of the Cancer Plan in France, *Value in Health*. 2010, Volume 13, Issue 5, July–August 552-556.

25. Miller KD, Goding-Sauer A, Ortiz AP, Fedewa SA, Pinheiro PS, Tortolero-Luna G, Martinez-Tyson D, Jemal A, Siegel RL. *Cancer Statistics*

for Hispanics/Latinos, 2018. *CA Cancer J Clin.* 2018 Nov;68(6):425-445. doi: 10.3322/caac.21494. Epub 2018 Oct 4. PMID: 30285281.

26. Herceg Z. Epigenetic Mechanisms as an Interface Between the Environment and Genome. *Adv Exp Med Biol.* 2016; 903:3-15. doi: 10.1007/978-1-4899-7678-9_1. PMID: 27343085.

27. Huang G, Zhang J, Gong L, Liu D, Wang X, Chen Y, Guo S. Specific Lung Squamous Cell Carcinoma Prognosis-Subtype Distinctions Based on DNA Methylation Patterns. *Med Sci Monit.* 2021 Mar 4; 27:e929524. doi: 10.12659/MSM.929524. PMID: 33661858; PMCID: PMC7942209.

28. Kiyohara C, Horiuchi T, Miyake Y, Takayama K, Nakanishi Y. Cigarette smoking, TP53 Arg72Pro, TP53BP1 Asp353Glu and the risk of lung cancer in a Japanese population. *Oncol Rep.* 2010 May;23(5):1361-8. doi: 10.3892/or_00000772. PMID: 20372852.

29. Pérez RF, Tejedor JR, Bayón GF, Fernández AF, Fraga MF. Distinct chromatin signatures of DNA hypomethylation in aging and cancer. *Aging Cell.* 2018 Jun;17(3): e12744. doi: 10.1111/accel.12744. Epub 2018 Mar 5. PMID: 29504244; PMCID: PMC5946083.

30. Herceg Z, Vaissière T. Epigenetic mechanisms and cancer. An interface between the environment and the genome. *Epigenetics.* 2011; 7: 804-819.

31. Vrijheid M, Slama R, Robinson O, Chatzi L, Coen M, van den Hazel P, Thomsen C, Wright J, Athersuch TJ, Avellana N, Basagaña X, Brochot C, Bucchini L, Bustamante M, Carracedo A, Casas M, Estivill X, Fairley L, van Gent D, Gonzalez JR, Granum B, Gražulevičienė R, Gutzkow KB, Julvez J, Keun HC, Kogevinas M, McEachan RR, Meltzer HM, Sabidó E, Schwarze PE, Siroux V, Sunyer J, Want EJ, Zeman F, Nieuwenhuijsen MJ. The human early-life exposome (HELIX): project rationale and design. *Environ Health Perspect.* 2014 Jun; 122(6):535-44. doi: 10.1289/ehp.1307204. Epub 2014 Mar 7. PMID: 24610234; PMCID: PMC4048258.

32. Gourronc FA, Chimenti MS, Lehmler HJ, Ankrum JA, Klingelutz AJ. Updating “Dataset of transcriptomic changes that occur in human preadipocytes over a 3-day course of exposure to

3,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl (PCB126)" with additional data on exposure to 2,2',5,5'-tetrachlorobiphenyl (PCB52) or its 4-hydroxy metabolite (4-OH-PCB52). *Data Brief.* 2023 Jul 14; 49:109415. doi: 10.1016/j.dib.2023.109415. PMID: 37520642; PMCID: PMC10375549.

33. Zota AR, Aschengrau A, Rudel RA, Brody JG. Self-reported chemicals exposure, beliefs about disease causation, and risk of breast cancer in the Cape Cod Breast Cancer and Environment Study: a case-control study. *Environ Health.* 2010 Jul 20; 9:40. doi: 10.1186/1476-069X-9-40. PMID: 20646273; PMCID: PMC2918587.

34. Binachon B, Dossus L, Danjou AM, Clavel-Chapelon F, Fervers B. Life in urban areas and breast cancer risk in the French E3N cohort. *Eur J Epidemiol.* 2014 Oct; 29(10):743-51. doi: 10.1007/s10654-014-9942-z. Epub 2014 Aug 20. PMID: 25139141.

35. Cazzolla-Gatti R. Why We Will Continue to Lose Our Battle with Cancers If We Do Not Stop Their Triggers from Environmental Pollution. *Int J Environ Res Public Health.* 2021 Jun 5;18(11):6107. doi: 10.3390/ijerph18116107. PMID: 34198930; PMCID: PMC8201328.

36. Tang M, Zhao M, Zhou S, Chen K, Zhang C, Liu W. Assessing the underlying breast cancer risk of Chinese females contributed by dietary intake of residual DDT from agricultural soils. *Environ Int.* 2014 Dec; 73:208-15. doi: 10.1016/j.envint.2014.08.001. Epub 2014 Aug 19. PMID: 25160079.

37. Lambert SA, Abraham G, Inouye M. Towards clinical utility of polygenic risk scores. *Hum Mol Genet.* 2019 Nov 21; 28(R2): R133-R142. doi: 10.1093/hmg/ddz187. PMID: 31363735.

38. Arango V, Sandra S. Biomarcadores para la evaluación de riesgo en la salud humana. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública.* 2012 Apr; 30(1): 75-82.

39. Gordis, L. *Epidemiology* (4th ed.). 2009. Saunders.

40. Wild CP, Miller JD, Groopman JD, editores. Improving public health through mycotoxin control. Lyon: International Agency for Research on Cancer. 2012. 248 p.; 105-117.

41. United States National Research Council (NRC) Science and Decisions: Advancing Risk Assessment. 2008. Washington, DC; National Academies Press.

42. Klaunig JE, Kamendulis LM. Chemical carcinogens. In: Klaassen CD, ed. Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poisons. 7th ed. 2008. New York: McGraw-Hill; 337-372.

43. Buss P, Caviezel M, Lutz WK. Linear dose-response relationship for DNA adducts in rat liver from chronic exposure to aflatoxin B1. *Carcinogenesis*. 1990 Dec; 11(12):2133-5. doi: 10.1093/carcin/11.12.2133. PMID: 2124951.

44. Palencia-Sánchez F, Quiroga-Vargas DA, Riaño-Casallas MI. Costos del cáncer ocupacional: una scoping review. *Latreia*. 2021 June; 34(2): 124-136. Epub May 14, 2021. Doi: <https://doi.org/10.17533/udea.iatreia.80>.

45. De La Cruz-Vargas JA, Ramos W, Chanduví W, Espinoza R, Guerrero N, Loayza-Castro Joan A. et al. Estudio de factibilidad para evaluar la proporción de cáncer atribuible a factores de riesgo modificables en el Perú y Latinoamérica. *Rev. Fac. Med. Hum.* [Internet]. 2020 Ene; 20(1): 114-122. doi: <http://dx.doi.org/10.25176/rfmh.v20i1.2657>.

46. Llorca J, Fariñas-Álvarez C, Delgado-Rodríguez M. Fracción atribuible poblacional: cálculo e interpretación [Population attributable fraction: estimation and interpretation]. *Gac Sanit*. 2001 Jan-Feb; 15(1):61-7. Spanish. doi: 10.1016/s0213-9111(01)71519-1. PMID: 11333627.

47. Rockhill B, Newman B, Weinberg C. Use and misuse of population attributable fractions. *Am J Public Health*. 1998 Jan; 88(1):15-9. doi: 10.2105/ajph.88.1.15. Erratum in: *Am J Public Health*. 2008 Dec; 98(12):2119. PMID: 9584027; PMCID: PMC1508384.

48. Bobb JF, Valeri L, Claus-Henn B, Christiani DC, Wright RO, Mazumdar M, Godleski JJ, Coull BA. Bayesian kernel machine regression for estimating the health effects of multi-pollutant mixtures. *Biostatistics*. 2015 Jul; 16(3):493-508. doi: 10.1093/biostatistics/kxu058. Epub 2014 Dec 22. PMID: 25532525; PMCID: PMC5963470.

49. Bobb JF, Claus Henn B, Valeri L, Coull BA. Statistical software for analyzing the health effects of multiple concurrent exposures via Bayesian kernel machine regression. *Environ Health*. 2018 Aug 20; 17(1):67. doi: 10.1186/s12940-018-0413-y. PMID: 30126431; PMCID: PMC6102907.

50. Organización Mundial de la Salud (OMS). Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda. 2017. Ginebra, Suiza.

51. Organización Mundial de la Salud (OMS). WHO Guidelines for Drinking-water Quality: Policies and Procedures used in updating the WHO Guidelines for Drinking-water Quality. 2018. Ginebra, Suiza.

52. Salas-Salvadó J, Maraver-Eizaguirre F, Rodríguez-Mañas L, Saenz de Pipaón M, Vitoria-Miñana I, Moreno-Aznar L. Importancia del consumo de agua en la salud y la prevención de la enfermedad: situación actual [The importance of water consumption in health and disease prevention: the current situation]. 2020 Oct 21; 37(5):1072-1086. Spanish. doi: 10.20960/nh.03160. PMID: 32960634.

53. Roquette R, Painho M, Nunes B. Spatial epidemiology of cancer: a review of data sources, methods and risk factors. *Geospat Health*. 2017 May 8; 12(1):504. doi: 10.4081/gh.2017.504. PMID: 28555468.

Calidad de agua para consumo humano en el departamento de Boyacá⁵

Nohora Yaneth Zipa Casas,
Juan David Cruz Rojas,
Sandra Helena Suescún Carrero
Mabel Idaliana Medina Alfonso⁶

Introducción

El agua de consumo humano ha sido definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como “adecuada para consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal”. Además, esta debe ser límpida e inodora, fresca y agradable.

Agua potable o agua para consumo humano es aquella que, por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, en las condiciones señaladas en el Decreto 1575 de 2007 y la Resolución 2115 de 2007, es apta para consumo humano; la cual puede ser utilizada en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal. El Estado, en su preocupación por cuidar la vida y la salud de la población, emite una serie de reglamentaciones que deben cumplir los prestadores del servicio de

5 doi: <https://doi.org/10.19053/uptc.9789586608459.3>

6 Profesionales e Investigadores Secretaría de Salud de Boyacá: pertenecen al Grupo de Investigación del laboratorio de Salud pública y al Programa de calidad de agua para consumo humano y uso recreativo de la Secretaría de Salud de Boyacá - Gobernación de Boyacá.

acueducto para garantizar la calidad del agua que consume la población, en zonas urbanas y rurales de Colombia.

El agua potable se considera uno de los pilares del saneamiento básico más importantes para proteger la vida y la salud de la población; sin dejar de lado el manejo de excretas, de residuos sólidos, la higiene de la vivienda y el control de plagas, como parte esencial del desarrollo integral de las personas.

El departamento de Boyacá, bajo la responsabilidad de la Secretaría de Salud, en su calidad de autoridad sanitaria realiza la inspección, vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano en los 123 municipios del departamento, a través de un equipo de profesionales y técnicos quienes realizan el seguimiento a los sistemas de suministro de agua, en las zonas urbanas y rurales con verificación de las condiciones de infraestructura sanitaria, desde el sitio de captación hasta el último lugar de suministro en la red de distribución, obteniendo el índice de riesgo por abastecimiento (IRABA) y las buenas prácticas sanitarias (BPS); así mismo, se hace la toma de muestras de agua en dispositivos de monitoreo, que con el apoyo del Laboratorio Departamental de Salud Pública (LDSP), genera los índices de riesgo de calidad de agua (IRCA).

La Secretaría de Salud de Boyacá ha intensificado la elaboración de los mapas de riesgo de calidad de agua de la totalidad de las fuentes abastecedoras de las zonas urbanas del departamento de Boyacá, con el fin de conocer las afectaciones de estas fuentes (ríos, quebradas, nacimientos, lagos y pozos profundos, entre otros). Asimismo, brinda la asesoría y asistencia técnica a las empresas de servicios públicos, con el fin de implementar medidas de protección para disminuir las alteraciones de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua cruda. Como autoridad sanitaria, la Secretaría de Salud informa permanentemente las condiciones encontradas en cada una de las visitas de inspección sanitaria y los resultados del IRCA con el fin de dar a conocer a las administraciones municipales y a la comunidad en general, la situación encontrada en cada municipio.

Según los índices de riesgo de calidad de agua para consumo humano, emitido durante el año 2022 por la autoridad sanitaria del departamento, el 50 % de

los municipios en las zonas urbanas cuentan con agua potable, situación que puede estar generada por la ineficiencia en los sistemas de tratamiento, la falta de operación, mantenimiento y controles por parte del prestador. En las zonas rurales, solamente el 4 % de los acueductos vigilados garantizan agua potable, toda vez que no se cuenta con sistemas de tratamiento adecuados, formación de recurso humano, conocimiento de la comunidad y compromiso de las administraciones municipales.

Buscando estrategias de mejoramiento de la calidad del agua, la Secretaría de Salud lidera la mesa intersectorial de agua para consumo humano y saneamiento básico donde se reúnen los entes de control, las autoridades municipales y departamentales, autoridades ambientales, el SENA y universidades, entre otros, para dar soluciones puntuales a la situación encontrada en cada uno de los municipios del departamento.

Para las entidades que hacen parte de la prestación del servicio de agua potable, uno de los aspectos a tener en cuenta en las acciones de mejora, es el desconocimiento de la comunidad sobre los problemas de salud que puede acarrear un agua de mala calidad, por lo que es importante buscar estrategias de conocimiento para los usuarios, fortalecer capacidades en los operarios de los sistemas de acueducto y concientizar a las administraciones municipales de garantizar agua potable como derecho fundamental, de acuerdo a lo que se describe en la Constitución Política de Colombia.

El objetivo de este capítulo es describir los procesos de inspección, vigilancia y control que se llevan a cabo por parte de la autoridad sanitaria a los sistemas de suministro de agua, con miras a garantizar la calidad de agua potable en las zonas urbanas del departamento de Boyacá; y resaltar la importancia de brindar información sobre la normatividad y las acciones que realiza la autoridad sanitaria, con el fin de ampliar el conocimiento de la comunidad, para que sean parte del control hacia la calidad del agua que brindan los prestadores de servicios públicos de acueducto en sus municipios.

Normatividad sanitaria a la calidad de agua para consumo humano en Colombia

Con el fin de analizar la situación nacional y teniendo en cuenta que el agua es de vital importancia para el ser humano, se presenta en la Figura 1 la legislación sanitaria vigente.

Figura 1. Normatividad calidad de agua para consumo humano



Fuente: Ministerio de Salud.

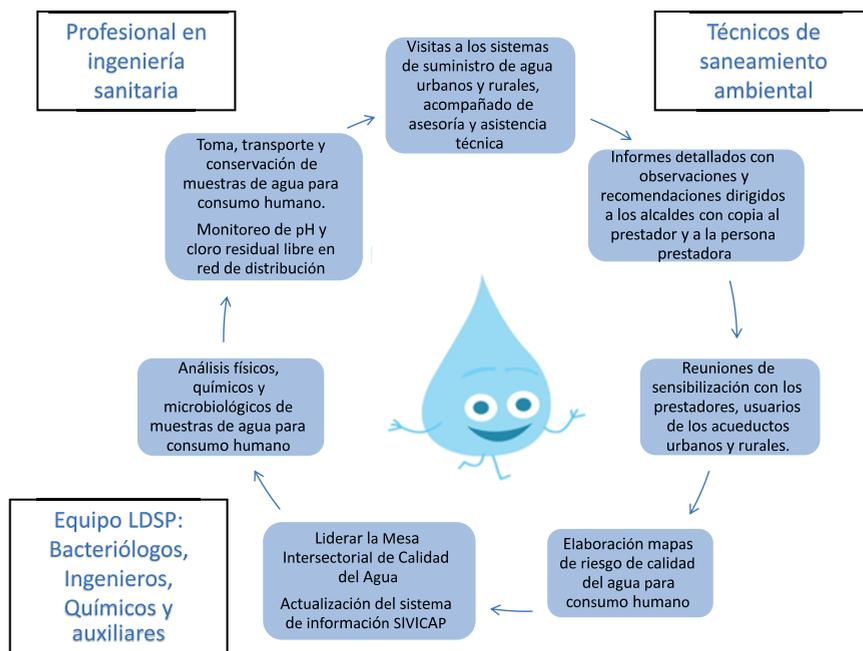
Inspección sanitaria de la calidad de agua para consumo humano en el departamento de Boyacá

Es el conjunto de acciones periódicas realizadas por la autoridad sanitaria a las personas prestadoras que suministran o distribuyen agua para el consumo humano, en la zona urbana y rural de los municipios del departamento de Boyacá, con el fin de comprobar y evaluar el riesgo que representa a la salud pública la calidad del agua distribuida por los sistemas de suministro para consumo humano (Figura 2).

Para desarrollar esta inspección en los acueductos urbanos se acoge la Resolución 0082 de 2009, de la cual el departamento de Boyacá, en cabeza de la Secretaría de Salud como autoridad sanitaria, adopta y pone en práctica el *Formulario Único de Acta de Inspección* que trata la citada norma, el cual incluye una serie de formularios para el cálculo de indicadores que permitan conocer el estado actual de los sistemas de suministro de agua.

La Secretaría de Salud de Boyacá hace inspección sanitaria a los sistemas de suministro de agua para consumo humano de la zona rural, mediante la implementación de la Resolución 622 de 2020 con su *Formato único de inspección sanitaria a plantas de tratamiento en zona rural*. Esta resolución además contiene el *Formato* único de inspección sanitaria a vehículos de transporte de agua para consumo humano y *Formato* único de inspección sanitaria a pila pública en zona rural.

Figura 2. Equipo de trabajo y actividades de inspección a sistemas de suministro de agua



Fuente: Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

De esta inspección resultan analizados tres índices de riesgo:

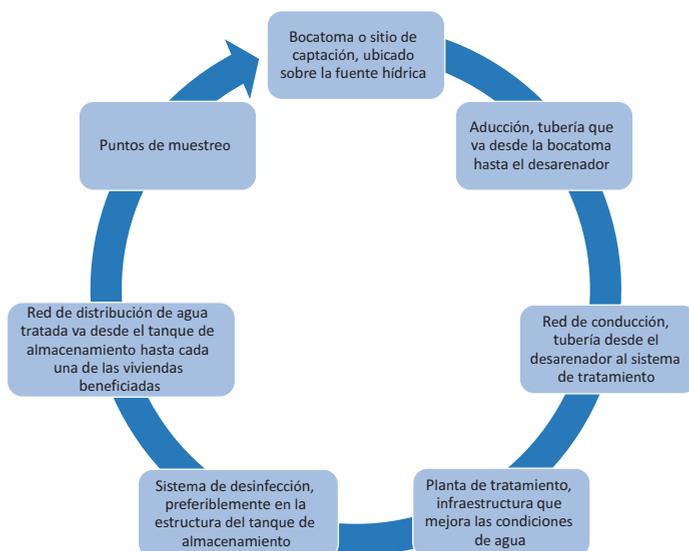
- Índice de riesgo por abastecimiento de agua de la persona prestadora (IRABApp): evalúa el sistema de tratamiento, la dotación básica del laboratorio, las competencias laborales del operario y el índice de continuidad. Dicho resultado permite emitir, por parte de la autoridad sanitaria, el correspondiente nivel de riesgo asociado al resultado de la puntuación obtenida y, por ende, requerir el mejoramiento de los componentes del sistema de suministro de agua para consumo humano de la persona prestadora del servicio público de acueducto y de la calidad del agua, al terminar la inspección sanitaria en dicho sistema.
- Indicador de buenas prácticas sanitarias (BPS): este aspecto lo conforman los procedimientos de limpieza y desinfección de las estructuras y equipos que se utilizan en el proceso de almacenamiento, tratamiento y distribución del agua para consumo humano.
- Índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano (IRCA): es la metodología por la cual se evalúan los resultados de los análisis de muestras de agua para consumo humano.

Inspección - IRABA - BPS

La Secretaría de Salud de Boyacá, en su calidad de autoridad sanitaria, cuenta con un equipo de profesionales en Ingeniería Sanitaria y técnicos de Saneamiento Ambiental que llevan a cabo las actividades de inspección a todos los constituyentes de los sistemas de suministro de agua para consumo humano (Figura 3), en el departamento de Boyacá.

Los profesionales en Ingeniería Sanitaria, son los encargados de hacer las visitas de inspección a los acueductos vigilados, es decir, 123 acueductos urbanos y 538 acueductos rurales para el año 2022. Estas visitas se llevan a cabo con el acompañamiento de algún miembro de las empresas o unidad de servicios públicos, en el caso de los cascos urbanos o las juntas administradoras de los acueductos rurales.

Figura 3. Componentes del sistema de suministro de agua para consumo humano



Fuente: Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

Se inicia un recorrido desde el sitio de la captación (río, quebrada, nacimiento, pozo profundo o lago), donde se identifican las posibles afectaciones que puedan dañar la calidad de agua, y se comprueba el estado de la misma estructura de captación.

Luego, se analiza la línea de aducción hasta el desarenador o planta de tratamiento, identificando el tipo de tubería, diámetro y factores externos que puedan causar incidentes donde se desacople la tubería. A continuación, en el desarenador se analiza el funcionamiento y las condiciones de limpieza, toda vez que es uno de los pretratamientos más importantes dentro del sistema de acueducto, especialmente cuando la fuente abastecedora es un río o una quebrada, la cual puede transportar sedimentos o aumento de los mismos en temporadas de lluvia.

Seguidamente, en el sistema de tratamiento, se verifica el correcto funcionamiento y estado de los pretratamientos (torre de aireación y ajuste de pH) y los procesos unitarios de potabilización, el cual debe ser acorde

con las características del agua cruda que se trata. Además, se comprueba la experiencia y destreza del operario del sistema de tratamiento en el manejo y utilización de equipos, ya que esta persona es parte fundamental de la correcta potabilización del líquido.

Dentro de la visita de inspección se evalúan las condiciones del laboratorio, donde se deben tener los procedimientos técnicos y los equipos básicos (prueba de jarras para dosificación óptima de coagulantes y alcalinizantes; demanda de cloro; turbiedad; color aparente, pH y cloro residual libre), con los que se realizan los controles y ajustes necesarios a fin de tener mayor eficiencia en los procesos unitarios de potabilización y obtener un agua potable con el sistema de tratamiento. Allí, se hace una verificación de los insumos químicos y las fechas de vencimiento, así como del estado de toda la infraestructura de la PTAP (Planta de tratamiento de agua potable) y de los tanques de almacenamiento, entre otros.

En el proceso de desinfección se verifica la correcta dosificación, el funcionamiento de los equipos y el sistema utilizado, indicando que se debe hacer autocontrol del agua filtrada, garantizando los rangos permisibles para los parámetros de turbiedad y color, previa a la desinfección, con utilización de las sustancias hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio o cloro gaseoso. Este es un aspecto muy importante asociado a que los operarios del sistema de tratamiento estén capacitados, adiestrados y certificados mínimo en tres normas colombianas de competencia laboral.

Luego se hace una evaluación de la red de distribución y la ubicación de los puntos de muestreo, aplicando la Resolución 0811 de 2007, verificando el índice de continuidad en todos los puntos de la red de distribución, con requerimiento de planos actualizados (Figura 3).

Con todos estos datos plasmados en el formulario único “Acta de inspección sanitaria a los sistemas de suministro de agua para consumo humano”, se calcula el IRABApp, el cual se realiza teniendo en cuenta la Resolución 2115 de 2007, y se asigna el puntaje de riesgo según el Artículo 19: “*Clasificación del nivel del riesgo por abastecimiento de agua*”. Teniendo en cuenta el promedio

de los IRABApp e IRABAm, se define la clasificación del nivel de riesgo a la salud humana, las acciones según el tratamiento, la continuidad por parte de las personas prestadoras, y la distribución a nivel municipal.

Una vez hecha la verificación de cada uno de los componentes del sistema de tratamiento, el profesional en Ingeniería Sanitaria procede a evaluar lo correspondiente a las Buenas Prácticas Sanitarias (BPS), las cuales se encuentran relacionadas las instalaciones físicas como oficinas, laboratorios, almacenes, salas de operación, estructuras hidráulicas, equipos, aspectos locativos y de procedimientos administrativos requeridos para la correcta operación de la planta de tratamiento.

Así mismo, se deben verificar las vías de acceso, aseo y estado de presentación de las instalaciones físicas, procedimientos de higiene, asepsia y protección, y instrumentación de la planta de tratamiento. Además, se debe tener vigente un contrato con un laboratorio externo, autorizado por el Ministerio de Salud y Protección Social para hacer análisis de control, de acuerdo a lo señalado en la Resolución 2115 de 2007. Una vez se cuenta con el formato debidamente diligenciado y verificado cada uno de los ítems, se procede a calcular las BPS.

Vigilancia – IRCA, desde la toma de muestra hasta el cargue en el SIVICAP (Sistema de información de calidad de agua potable)

A nivel departamental, la parte operativa la llevan a cabo las gobernaciones con el apoyo de las secretarías de salud departamentales, quienes ejercen como autoridad sanitaria y realizan toma de muestras en puntos estratégicos de la red de distribución con análisis periódicos del agua para verificar el cumplimiento de dichas normas.

La Resolución 2115 de 2007, establece los valores máximos aceptables, las frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, entre otros, los cuales deben cumplir las personas prestadoras.

Con los requerimientos establecidos en la Resolución 2115, la Secretaría de Salud diseña un cronograma de toma de muestras para los 123 acueductos

urbanos y los 538 acueductos rurales; las muestras son traídas por los técnicos de saneamiento ambiental al laboratorio departamental de salud pública, quien emite resultados y calcula el IRCA con los resultados que se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Índice de riesgo por calidad de agua para consumo humano urbano y rural para el año 2022

Riesgo	Rango	Municipios	Porcentaje
0 – 5,09	Sin riesgo	5	4,07
5,1 – 14,09	Riesgo bajo	11	8,94
14,1 – 35,09	Riesgo medio	31	25,20
35,1 – 80,09	Riesgo alto	64	52,03
80,1 – 100	Inviabile sanitariamente	11	8,94
No reporta	No reporta	1	0,81
Total		123	100

Fuente: Laboratorio de salud pública de Boyacá.

Los parámetros que se evalúan en la vigilancia de la calidad del agua pueden incluir el pH, la turbiedad, el color aparente, el cloro residual libre, la presencia de microorganismos patógenos, metales pesados, pesticidas y otros contaminantes definidos en el mapa de riesgo. Los resultados de estos análisis se comparan con los estándares establecidos en la anterior resolución.

En caso de detectarse problemas de calidad del agua, se toman medidas correctivas para minimizar los riesgos para la vida y la salud pública. Esto puede incluir la implementación de sistemas de tratamiento del agua que cumplan con los requisitos mínimos, de acuerdo la Resolución 330 de 2017, el cierre de fuentes de contaminación, la restricción del acceso al agua contaminada, y la educación de la población sobre prácticas seguras de consumo de agua.

Es importante destacar que la vigilancia de la calidad del agua no es un proceso estático, sino que se lleva a cabo de forma continua para garantizar que el agua sea segura a largo plazo. Además, la colaboración y la participación activa de

la comunidad son fundamentales para detectar y abordar los problemas de calidad del agua de manera efectiva.

En el departamento de Boyacá, el análisis de las muestras de agua tomadas en los acueductos urbanos y rurales vigilados, se realiza por el Laboratorio departamental de salud pública (LDSP), el cual hace parte de la Secretaría de Salud de Boyacá. Desde el LDSP se da cumplimiento a los lineamientos nacionales avalados por el Instituto Nacional de Salud para la toma, conservación, transporte y análisis de las muestras. Desde el LDSP se cargan al aplicativo SIVICAP (Sistema de información para la vigilancia del agua) los resultados de los análisis hechos según el cronograma de muestras de agua, el cual, es elaborado desde el Programa de calidad de agua para consumo humano y uso recreativo de la Secretaría de Salud de Boyacá.

Control – Cómo, cuándo y a quienes se aplican medidas sanitarias, acciones populares, tutelas, entre otras

La autoridad sanitaria representada por la Secretaría de Salud de Boyacá tiene la responsabilidad de realizar el control, el cual está constituido por las medidas sanitarias de seguridad, consistente en: a) la suspensión del servicio de agua: se requiere de muestras de agua que demuestren que la calidad de agua puede llegar a afectar o a poner en peligro la vida y la salud de una comunidad; con los análisis de laboratorio se hace una visita a la fuente abastecedora o al sistema de tratamiento, específicamente al tanque de almacenamiento, se hace el cierre de válvulas (se coloca un sello como algo simbólico, el cual informa que está prohibido manipular la válvula o registro hasta que la autoridad sanitaria realice la inspección); b) así mismo se da inicio a un proceso sancionatorio, que lo llevará la oficina jurídica respectiva. La medida sanitaria aplicada se quitará una vez desaparezcan las causas que la ocasionaron (Ley 09 de 1999, Código Sanitario Nacional).

En el caso del departamento de Boyacá, la autoridad sanitaria se ha apoyado en los entes de control como la Procuraduría y la Contraloría, así como también en la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, quienes hacen su trabajo basado en los resultados del índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano (IRCA), que se da a conocer cada trimestre.

Con la creación de los Consejos Territoriales de Salud Ambiental (COTSA), se reactiva la Mesa intersectorial de calidad de agua y saneamiento básico, la cual se convirtió en una herramienta muy importante, cuyo objetivo es generar un espacio intersectorial de análisis, debate y búsqueda de soluciones sobre el derecho humano al agua potable en el departamento de Boyacá. De esta reunión trimestral hacen parte las siguientes entidades: Procuraduría Judicial, Ambiental y Agraria, Contraloría General de la República, Defensoría del Pueblo, Secretaría de Salud de Boyacá, Secretaría de Infraestructura Pública, Empresa de Servicios Públicos de Boyacá, Corporación Autónoma Regional de Boyacá “Corpoboyacá”, Corporación Autónoma Regional de Chivor “Corpochivor”, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca “CAR” Seccional Chiquinquirá, SENA, alcaldías invitadas, Universidad de Boyacá, Universidad Santo Tomás, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia “UPTC”, entre otros.

Sistemas de tratamiento – aspectos a tener en cuenta para el diseño y construcción de sistemas de tratamiento de agua para consumo humano

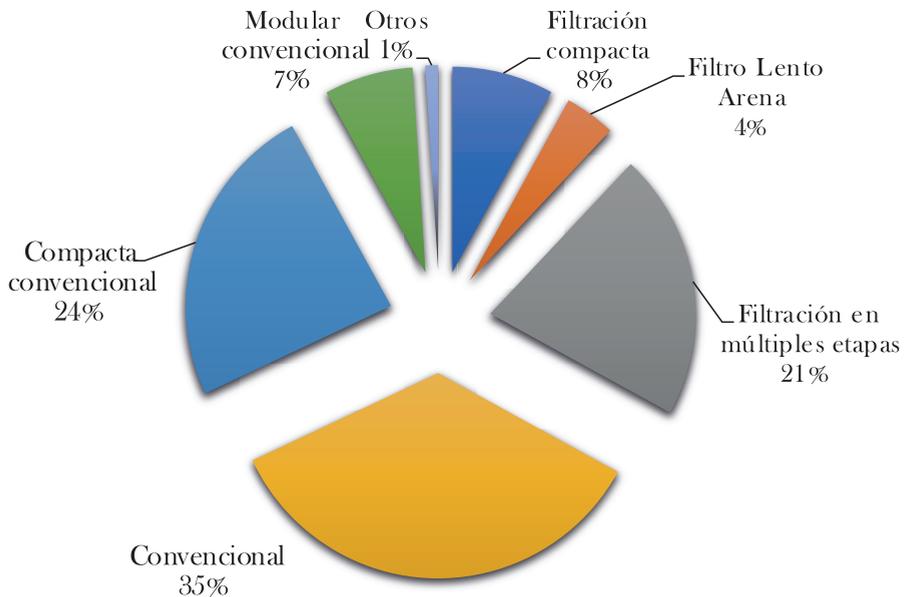
Según información de la Secretaría de Salud de Boyacá, el mayor porcentaje de sistemas de tratamiento de agua para consumo humano en el departamento son sistemas convencionales clásicos y compactos (35 % y 24 %) respectivamente (Figura 4) (son los que cuentan con todos los procesos convencionales como su nombre lo dice: coagulación y floculación, sedimentación, filtración y desinfección); los compactos en los cuales se llevan a cabo todos o parcialmente los procesos unitarios como: coagulación, floculación, sedimentación y filtración. La filtración en múltiples etapas (FiME), es la combinación de unidades de pretratamiento con filtración en grava de diferente granulometría y unidades de tratamiento con filtración lenta en arena (FLA), con la finalidad de obtener un efluente de calidad sin necesidad del uso de químicos durante el proceso, adicionando el proceso de desinfección.

En todos los acueductos urbanos se hace el proceso de desinfección por medio de diferentes sistemas, el cual es implementado según condiciones técnicas y económicas para cada prestador. Las sustancias químicas utilizadas en el

departamento para la desinfección son: hipoclorito de calcio, hipoclorito de sodio y cloro gaseoso.

Según las características del agua cruda de las diferentes fuentes de abastecimiento se hacen los pretratamientos necesarios como ajuste de pH y remisión de hierro con torre de aireación. Todo estudio, diseño y construcción de un sistema de tratamiento de agua potable, debe cumplir con todos los lineamientos y aspectos de diseño establecidos en la Resolución 330 de 2017.

Figura 4. Sistemas de tratamiento en acueductos urbanos del departamento de Boyacá



Fuente: Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

Situación del sistema de desinfección en los 123 acueductos urbanos del departamento

El sistema más utilizado para la desinfección del agua en los acueductos urbanos del departamento, es el uso de un tanque para dilución de la

sustancia desinfectante (hipoclorito de calcio), un motor de mezcla para la agitación periódica de la sustancia y una bomba peristáltica para la impulsión del desinfectante hasta el sitio de mezcla (Figura 5).

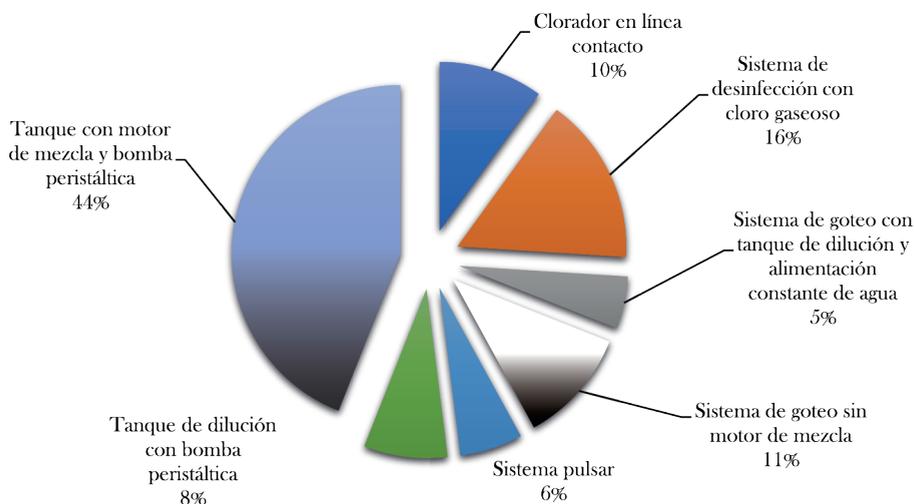
En ocasiones, existen sistemas de alimentación continua de agua al tanque de mezcla y no se tienen motores de mezcla para la agitación de la sustancia, lo cual genera que la concentración del desinfectante no sea estable y se presenten horas de supercloración o subcloración del agua.

Cada sistema de desinfección utiliza una sustancia, que en algunos casos no es acorde a las especificaciones del fabricante, ocasionando taponamientos o cortes de flujo, lo cual interfiere en la dosis óptima a aplicar.

Adicionalmente, algunos sistemas de desinfección requieren electricidad o su funcionamiento es hidráulico, lo cual, asociado a malas prácticas operativas, pueden generar el efecto de supercloración o subcloración, principalmente en los métodos de clorador en línea, sistema de goteo con tanque de difusión y alimentación constante, sistema de goteo sin motor de mezcla, sistema pulsar y tanque de difusión con bomba peristáltica sin motor de mezcla.

Cada sustancia como hipoclorito de calcio al 68 % en presentación: granulado, briquetas y pastillas o hipoclorito de sodio, que en algunos casos no son acordes a las especificaciones del fabricante, ocasionando taponamientos o cortes de flujo, lo cual interfiere en la dosis óptima a aplicar.

Figura 5. Sistemas de desinfección acueductos urbanos del departamento de Boyacá



Fuente: Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

Sustancias usadas para la desinfección en los 123 acueductos urbanos del departamento

El hipoclorito de calcio es la sustancia más utilizada en los acueductos urbanos debido a sus diferentes presentaciones (granulado, briquetas y pastillas); el cual se adiciona en sistemas de contacto, tanques de mezcla o sistemas pulsar.

Según visitas de inspección, vigilancia y control (IVC), el hipoclorito de calcio granulado es la sustancia que más dificultades operativas presenta, debido a que en algunos sistemas no se tienen sistemas mecánicos para hacer la agitación o se realiza alimentación continua de agua en el tanque de mezcla, lo cual no permite una dosis óptima de la sustancia. Lo anterior genera que el cloro residual libre en la red de distribución pueda exceder los rangos permisibles de la normatividad vigente.

Para el ajuste de la dosis del desinfectante se deben tener los equipos necesarios en la planta de tratamiento y llevar a cabo las pruebas de demanda

de cloro, la cual debe ser periódica y ajustarse según las características del agua cruda de las fuentes de abastecimiento.

Mapas de riesgo de calidad de agua

El mapa de riesgo de calidad de agua para consumo humano es un instrumento que define las acciones de inspección, vigilancia y control de factores de riesgo, asociadas a las condiciones de calidad de las cuencas abastecedoras y a las características físicas, químicas y microbiológicas del agua de las fuentes, que puedan generar riesgos graves a la salud humana.

El Estado colombiano, en el Artículo 2° del Decreto 1575 de 2007, establece responsabilidades a los ministerios de vivienda y desarrollo territorial, ambiente y salud, y las características para su elaboración.

Teniendo en cuenta las herramientas que da el Estado colombiano en cuanto a la elaboración de los mapas de riesgo (Artículo 2° del Decreto 1575 de 2007), este es el instrumento que define las acciones de inspección, vigilancia y control de riesgo, asociadas a las condiciones de calidad de las cuencas abastecedoras y a las características físicas, químicas y microbiológicas del agua de las fuentes, que puedan generar riesgos graves a la salud humana, si no son adecuadamente tratadas, independientemente de si provienen de una contaminación por eventos naturales o antrópicos.

Los encargados de hacer estos mapas de riesgo son los profesionales en ingeniería sanitaria que realizan la inspección y vigilancia. Como la norma lo dice, de este trabajo deben hacer parte la autoridad ambiental, en el caso de Boyacá, representada por las cuatro corporaciones autónomas regionales, y las administraciones municipales en las cuales se va a realizar el mapa de riesgo, la empresa de servicios públicos y las juntas administradoras de los acueductos, si es el caso. Para esto se hace una visita conjunta, en donde las instituciones mencionadas hacen un recorrido aguas arriba del sitio de captación. Este recorrido debe llevarse a cabo en el lecho del río o quebrada, toda vez que se deben referenciar todos y cada una de las afectaciones que descarguen en la fuente abastecedora (Figura 6).

Figura 6. Visita de campo para elaboración de mapa de riesgo



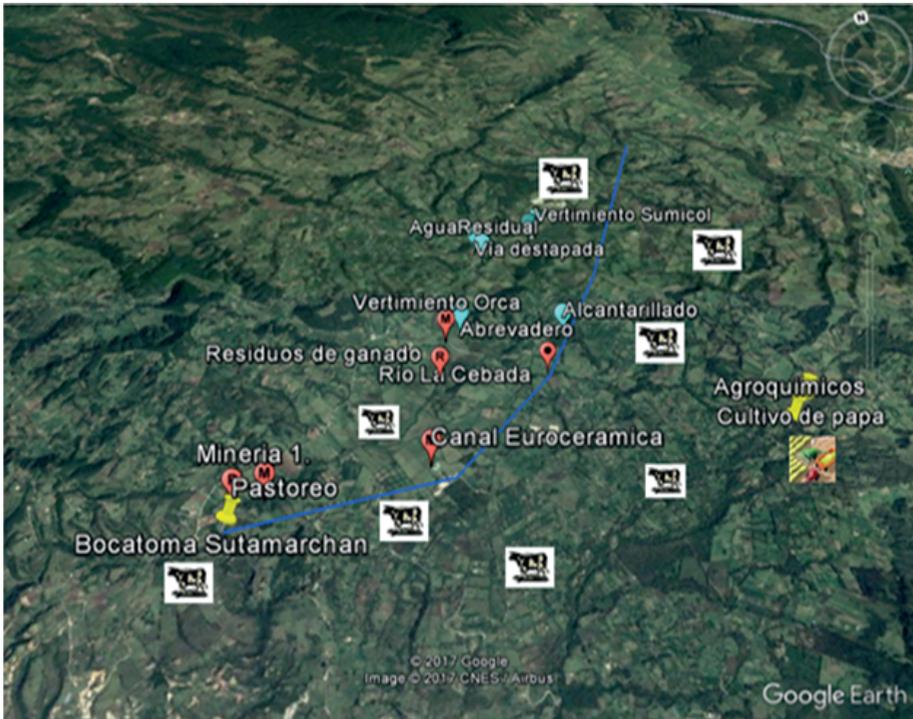
Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

La autoridad sanitaria, en este caso la Secretaría de Salud de Boyacá, tiene adelantados los mapas de riesgo de calidad de agua de las fuentes abastecedoras de los 123 municipios del departamento.

En la Figura 7, se observa el resultado del mapa de riesgo del río La Cebada que surte de agua a la zona urbana del municipio de Sutamarchán y a varios acueductos rurales de la zona. La gráfica nos indica las coordenadas exactas del sitio de descarga de la industria contaminante y las afectaciones que impactan negativamente el cuerpo de agua.

Este mapa de riesgo es presentado a la administración municipal para que realice los requerimientos a que haya lugar, especialmente con el apoyo de la autoridad Ambiental (Corporaciones Autónomas Regionales).

Figura 7. Mapa de riesgo del río La Cebada del municipio de Sutamarchán

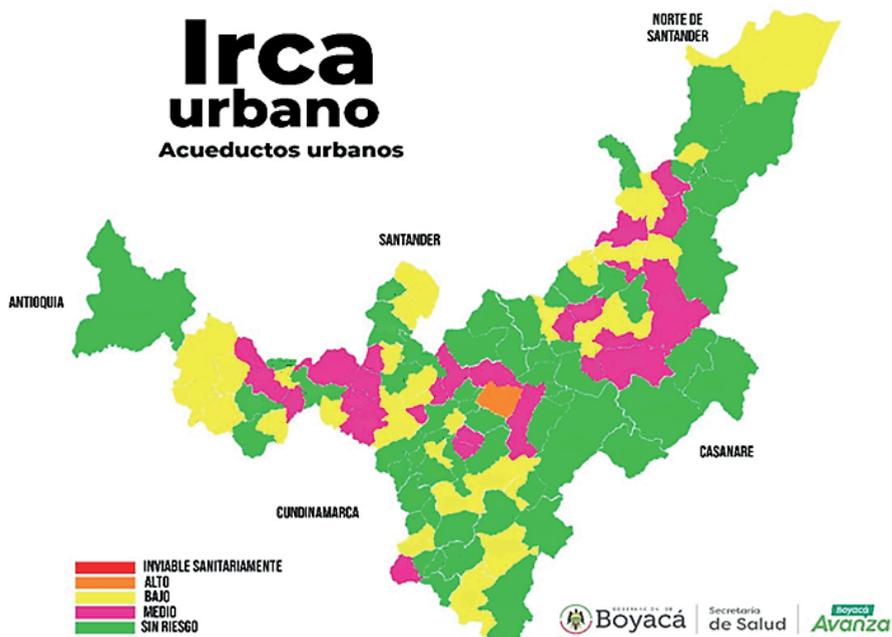


Fuente: Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

Situación de la calidad del agua del departamento en el año 2022 – mapas con IRCA, IRABA y BPS

Para el año 2022, esta sectorial evidenció que en la zona urbana desmejoró notablemente la calidad de agua en algunos municipios, donde sesenta y cuatro (64) continúan con un agua NO apta para consumo humano, generando preocupación en sus habitantes. En él se destaca el municipio de Toca, que se encuentra en riesgo alto; veinticuatro (24) más en riesgo medio y treinta y nueve (39) en riesgo bajo, y solamente 59 de los 123 tienen agua potable (Figura 8).

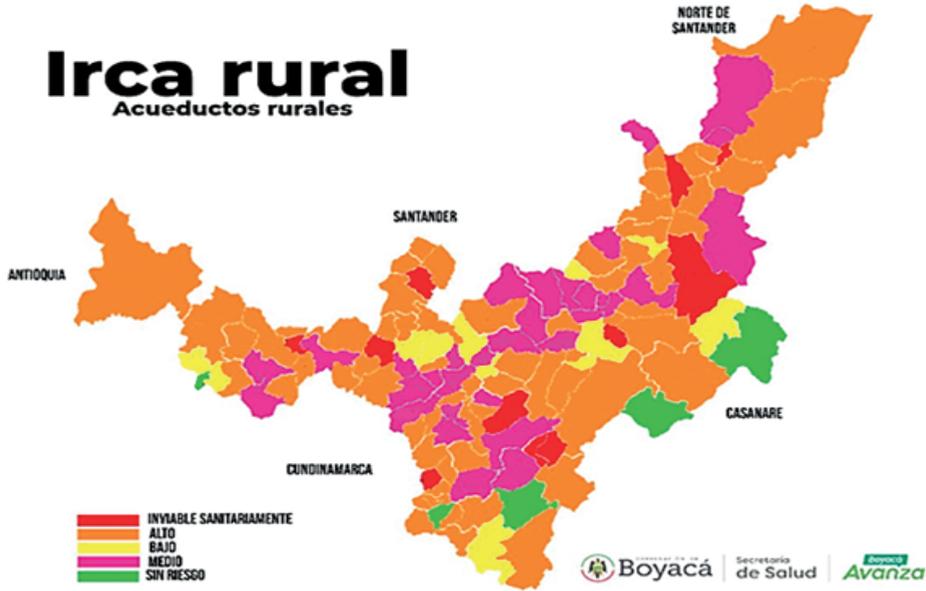
Figura 8. IRCA urbano del departamento de Boyacá, año 2022



Fuente: Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

En la zona rural, la situación es aún más crítica, debido a que, en el departamento, la zona rural de solo cinco (5) municipios, tienen agua potable en los acueductos vigilados; los restantes 118 municipios están entre inviable sanitariamente, alto, medio y bajo, considerando que no cuentan con agua apta para consumo humano (Figura 9).

Figura 9. IRCA rural del departamento de Boyacá año 2022



Fuente: Programa de calidad de agua para consumo humano. Secretaría de Salud de Boyacá.

Desafíos y perspectivas

Para la autoridad sanitaria, la situación de la calidad de agua potable en el departamento de Boyacá es muy preocupante, especialmente en los acueductos en que los parámetros de turbiedad y color están por fuera de la norma. Así mismo, en estos sistemas se lleva a cabo el proceso de desinfección, prioritariamente con hipoclorito de calcio, con la subsecuente formación de cloraminas y trihalometanos. El cambio permanente de operarios del sistema de tratamiento por personas sin experiencia y sin la formación adecuada, agrava el desempeño de los sistemas de potabilización.

Desinfección y subproductos de desinfección⁷

Mildred F. Lemus Pérez
Manuel S. Rodríguez Susa⁸

Introducción

La desinfección como mecanismo de control patogénico ha sido una de las herramientas más importantes para la reducción de mortalidad y morbilidad por consumo de agua. Desde la masificación de la distribución de agua potable por la implementación de plantas de tratamiento en el mundo, se ha visto una reducción en las enfermedades gastrointestinales, como la enfermedad diarreica aguda (EDA). Es por esto que la desinfección hace parte obligatoria de los procesos por los que pasa el agua para ser considerada potable. La desinfección se lleva a cabo en las plantas de tratamiento, de tal forma que se garantice la calidad microbiológica del agua potable antes de ser distribuida; esta calidad microbiológica debe cumplir con la norma de calidad de agua potable específica para cada país. En el caso colombiano, la norma indica que para que el agua pueda ser consumida y no generar ningún riesgo, debe estar libre de bacterias indicadoras de la presencia de materia fecal (*E. Coli*, coliformes fecales) o bacterias ambientales de la misma familia (coliformes totales); tampoco debe haber presencia de parásitos como *Giardia* y *Cryptosporidium*. Estos son indicadores, es decir, representan al

7 doi: <https://doi.org/10.19053/uptc.9789586608459.4>

8 Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá. Colombia.

grupo de microorganismos que se quieren inactivar durante el tratamiento, y sirven para hacer un seguimiento a la calidad. A nivel mundial, estos parámetros microbiológicos son ampliamente utilizados, pero también se discute su efectividad en el control de la calidad, debido a que no todas las bacterias y parásitos se inactivan de la misma forma al estar en contacto con el desinfectante.

Algunos microorganismos son más resistentes y es por esto que existen múltiples desinfectantes con diferentes mecanismos de acción. Los más utilizados por su disponibilidad y costo son a base de cloro como el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio, el cloro gaseoso, el dióxido de cloro y derivados del cloro como las cloraminas. También se usa el ozono y los rayos ultravioleta (UV) en sistemas más avanzados. La cantidad y el tiempo en que debe actuar cada uno de estos desinfectantes depende del microorganismo y la población microbiana que se quiere inactivar, por lo que técnicamente se debe hacer la evaluación con el más resistente. ¿Por qué no agregar una cantidad alta de tal forma que se inactiven todos los microorganismos presentes? Primero, económicamente no es eficiente, y segundo y más importante, se debe garantizar que no se produzcan concentraciones de sustancias no deseables, que puedan desmejorar la calidad del agua que es consumida durante la desinfección.

Las sustancias que se forman como compuestos secundarios en la desinfección se denominan subproductos de la desinfección (SPD). Los SPD se generan porque el desinfectante no tiene la capacidad de seleccionar sobre qué actúa y, así como oxida parte de la estructura de la que están hechos los microorganismos, también lo hace sobre otros compuestos orgánicos, como la materia orgánica natural (MON). La MON está presente en todos los cuerpos de agua por la lixiviación y descomposición de seres vivos o sus partes, tales como las ramas y hojas de un árbol. La MON se encuentra normalmente diluida en forma de ácidos húmicos y fúlvicos. Los ácidos húmicos (especialmente) y fúlvicos, tienen estructuras en forma de anillo que les dan una reactividad alta, las cuales, al entrar en contacto con el desinfectante, se rompen y se forman compuestos más pequeños.

El tipo y cantidad de compuestos formados por la reacción depende de múltiples variables, entre ellas, el tipo de desinfectante, la naturaleza de

la materia orgánica, la presencia de otros elementos que también puedan reaccionar como otros halógenos (p. ej. bromo, yodo) y las condiciones ambientales, entre las que se encuentran el pH, la temperatura y el tiempo que dure la reacción (1). Es así como a altas concentraciones de materia orgánica y desinfectante se van a formar más SPD; dependiendo de la temperatura y el pH se producen más o menos SPD. Algunos SPD son más estables que otros, por lo que a un tiempo mayor de reacción se incrementa su cantidad en el agua, y la presencia de bromo y yodo favorece la formación de compuestos bromados y yodados sobre los que tienen cloro en su estructura.

El cloro y, específicamente, el hipoclorito, forman principalmente los dos grupos de SPD más estudiados: los trihalometanos (THM) y los ácidos haloacéticos (AHA). Desde mediados de la década de los años 70, se viene hablando de los THM, desde su descubrimiento. A partir de ese momento, se comenzaron a estudiar los posibles efectos de la presencia de los THM en el agua potable y progresivamente de los otros compuestos que se empezaron a descubrir como parte de la reacción de desinfección. Se calcula que habría más de 700 SPD diferentes con estructuras moleculares distintas. La cantidad de los SPD en el agua es pequeña; en el orden de microgramos por litro a nanogramos por litro. Aunque bajas en comparación con el desinfectante adicionado y las normas de su concentración residual en la red, la exposición continua a estas sustancias y durante largos periodos de tiempo (años), tienen muy alto potencial de generar efectos negativos sobre la salud humana. Esto ocurre por los diferentes y recurrentes usos en los que se requiere del contacto con el agua. Por ejemplo, el baño corporal, el lavado de manos, el lavado de ropa, el lavado de loza, el consumo de agua y de alimentos preparados con ella. De esta forma, hay una exposición del consumidor a los SPD presentes en el agua por medio de lo que se ingiere (vía oral), lo que puede absorberse por la piel (vía dérmica), y lo que ingresa al respirar el vapor del agua (vía inhalatoria).

Los estudios que se han desarrollado a partir de la exposición de animales o células a los SPD, partiendo de modelos de evaluación a diferentes concentraciones, han mostrado diversas respuestas con una tendencia a que existe un incremento de la toxicidad del agua por su presencia. Los efectos a nivel toxicológico dependen del tipo de SPD analizado. Es así como los SPD que tienen nitrógeno en su estructura molecular son más perjudiciales, en

comparación con los que solo están compuestos por carbono; los compuestos clorados son menos dañinos que los que tienen bromo y yodo. Por otra parte, los estudios epidemiológicos se han enfocado principalmente en los THM debido a una mayor cantidad de información histórica de su presencia en el agua. Los resultados también son variados, mostrando que existe una relación estadísticamente significativa entre el incremento de los THM consumidos en el agua y la presencia de cáncer de vejiga, principalmente en los hombres.

Teniendo en cuenta los resultados del posible y probable efecto negativo en la salud humana de la presencia de SPD en el agua, la normatividad en calidad del agua potable ha establecido límites para algunos de estos SPD. La normatividad colombiana fijó un límite de 200 microgramos por litro de THM. Los THM se componen de cuatro sustancias principales: el cloroformo, el bromodiclorometano, el dibromoclorometano y el bromoformo. La regulación tiene en cuenta la sumatoria de estos compuestos. Sin embargo, no se exige su medición de manera frecuente al no ser parte del cálculo de los indicadores de riesgo de calidad del agua (IRCA), establecidos para controlar la calidad del agua suministrada.

Al comparar la regulación colombiana, en términos de SPD, con normas internacionales, se pueden observar diferencias especialmente con los países desarrollados. En estos lugares se establecen niveles más restrictivos, y en algunos países se ha optado por evitar ciertas formas de desinfección como la cloración para reducir la formación de THM. Por ejemplo, los Países Bajos ha reducido al mínimo su uso desde la década de los años 90, por medio de sistemas avanzados de tratamiento. El equilibrio entre garantizar la calidad microbiológica y reducir el riesgo por exposición a SPD, es parte del desafío de los sistemas de abastecimiento de agua potable; desafío que debe pasar por evaluar el tipo de fuente de captación y su calidad, la eficiencia de los sistemas de tratamiento y cómo se están operando, además del estado de las redes por donde pasa el agua, cómo se almacena y cómo se usa en cada uno de los hogares.

Este desafío se hace visible en toda Colombia, más aún por el tipo de sistemas de tratamiento con el que cuentan los municipios. Estos no son lo suficientemente adecuados para reducir la cantidad de materia orgánica en el agua a niveles bajos donde el desinfectante requerido, para garantizar la calidad microbiológica, no reaccione y forme niveles excesivos de SPD.

El departamento de Boyacá no es ajeno a esta realidad. Es por esto que el conocimiento de los procesos de desinfección que se usan para el tratamiento del agua potable, los subproductos que se forman como consecuencia y los retos asociados a una gestión adecuada para el control de la calidad del agua, son fundamentales en el área de saneamiento y salud.

Para tener un panorama de este tema en Boyacá, en este capítulo se abordarán las siguientes temáticas: i) desinfección en Boyacá, tipos de desinfectantes utilizados, en qué concentraciones y en qué tipo de sistemas de tratamiento de agua potable, esto permitirá entender el estado actual de la desinfección en el departamento; ii). Estudios realizados sobre SPD en Boyacá y desinfección, de tal forma que se tenga un inventario de la información base con la que cuenta el departamento; iii) Desafíos y perspectivas de una gestión adecuada de la calidad al afrontar retos como cambios en la calidad de la fuente de agua cruda, el cambio climático, el estado y operación de las plantas de tratamiento.

Desinfección en Boyacá

Según la base de datos de la Secretaría de Salud de Boyacá, los datos relativos a procesos de desinfección utilizados en los 123 municipios del departamento muestran que solo se llevan a cabo procesos químicos de desinfección, tanto en las plantas de potabilización de los cascos urbanos, como en las plantas de las zonas rurales. En el caso de los hogares rurales dispersos, al igual que en otras partes del país, el proceso de desinfección está mucho más inclinado hacia procesos térmicos (hervir el agua). No se tiene información sobre el uso de procesos de desinfección ultravioleta ni con ozono en ninguna de las plantas de producción de agua potable del departamento, aun cuando a nivel industrial, y quizá institucional, esta tecnología sea empleada. La planta de tratamiento de la zona urbana del municipio de Chiquinquirá cuenta con un sistema de ozonización, pero a la fecha (septiembre de 2023), no está operativo por fallos en la configuración.

Los procesos de potabilización llevados a cabo en Boyacá, son desarrollados en plantas convencionales, plantas compactas y plantas con filtración de múltiple etapa, siendo la desinfección química, la última etapa de estos procesos. El estado y operación de estos sistemas es una variable relevante

en su eficiencia; sin embargo, por ausencia de información, no se relaciona en este aparte.

Según la Secretaría de Salud de Boyacá, en el caso de los cascos urbanos, cerca del 78 % de los sistemas utilizan hipoclorito de calcio como agente de desinfección. Un 17 % afirma hacer uso de cloro gaseoso, en tanto que el restante de los municipios desinfecta con hipoclorito de sodio. Este hipoclorito de calcio tiene concentraciones entre un 65 y un 70 % de agente activo, se adquiere en fase sólida, y es preferido por su alta concentración y fácil manejo. En la mayoría de los casos es disuelto para ser aplicado en fase líquida, previa disolución, pero en muchos acueductos veredales, se adicionan pastillas en los tanques de contacto, situación que genera dosis irregulares de desinfectante en el agua a potabilizar (Figura 1).

El uso de cloro gaseoso para desinfección demanda instalaciones y estrategias de seguridad mucho más rigurosas que en el caso del hipoclorito de calcio, razón por la cual no es masivo su empleo en cascos urbanos, y no existe en el sector rural. Finalmente, el hipoclorito de sodio, siendo también un buen desinfectante químico, es poco utilizado por los bajos niveles de agente activo que se encuentran comercialmente.

Este uso masivo de sustancias cloradas para los procesos de desinfección, aunado con el muy bajo seguimiento sistemático a la concentración de materia orgánica (medida como carbono orgánico total - COT⁹), a la naturaleza de la misma (medida con indicadores de qué tan reactiva puede ser la materia orgánica UV₂₅₄¹⁰ y SUVA¹¹), y a la concentración de nitrógeno disuelto en el agua cruda, permite intuir un potencial de formación de subproductos de desinfección de las familias de los trihalometanos, ácidos haloacéticos, haloacetonas, furanonas, haloacetronitrilos e hidratos de cloro (1).

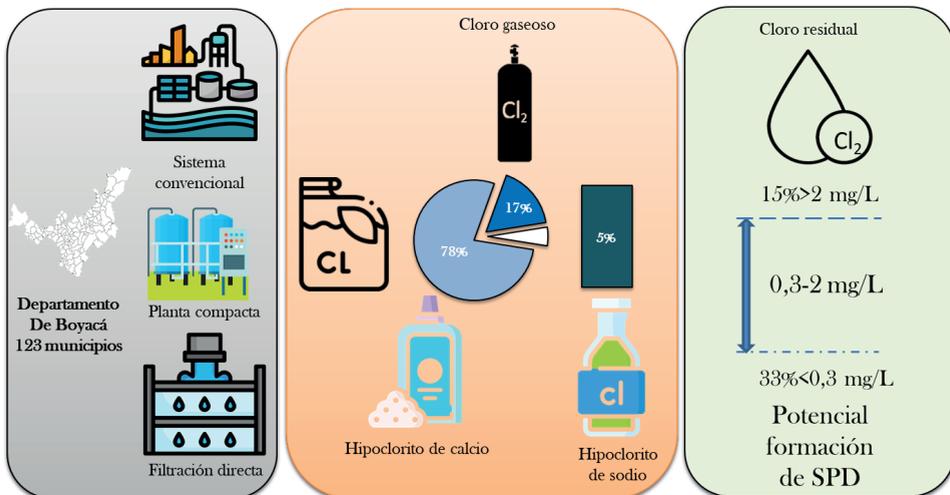
9 El indicador de carbono orgánico total mide de manera global los diferentes tipos de materia orgánica presente en el agua.

10 Este indicador se denomina absorbancia ultravioleta a una longitud de onda de 254 μm , a la cual los compuestos orgánicos más reactivos son más sensibles, es decir, absorben más de esta luz. Este indicador de forma rápida puede dar un indicio de qué tanta materia orgánica reactiva hay en el agua.

11 Este indicador se denomina absorbancia de luz ultravioleta específica y es la relación entre el UV₂₅₄ y el COT y permite clasificar el tipo de materia orgánica presente, de acuerdo a su estructura molecular global. Valores más altos indican que hay predominancia de compuestos más reactivos y, por tanto, formación de THM y AHA.

Las condiciones en las que se lleva a cabo la desinfección como pH y concentración, también son variables en los diferentes municipios del departamento. En 19 de los 123 se superó la norma de 2.0 mg/L de cloro residual, mientras 40 reportaron valores por debajo de 0.3 mg/L para el año 2022. Esto indicaría que en casi el 50 % de los municipios se están cometiendo errores en la dosificación y, por tanto, existe un potencial mayor riesgo de generación de SPD, unos por cloro residual alto y otros porque, al querer cumplir con el IRCA, pueden hacer mal uso del desinfectante. Respecto al pH, solo 1 municipio en 2022 incumplió el rango de pH (6.5-9) con 6.1 en la zona urbana de Chiquinquirá. Esto supondría la formación de sustancias, sobre todo ácidas, como los ácidos haloacéticos, no regulados en el país y con probables efectos en la salud. En general, el valor promedio de pH para los 123 municipios, está muy cerca de la neutralidad (7.3), por lo que se esperaría que bajo estas condiciones de desinfectante, dosis, pH y presencia de nitrógeno se encuentre una amplia variedad de subproductos de la desinfección (Figura 1).

Figura 1. Infografía desinfección en Boyacá



Fuente: Elaboración propia.

Estudios relacionados con subproductos de desinfección en Boyacá

La investigación y control de los subproductos de desinfección en el departamento de Boyacá ha sido incipiente, pues la aproximación que se ha hecho de la desinfección ha sido abordada exclusivamente desde la perspectiva del cumplimiento de la normatividad. En la Resolución 2115 de 2007 de calidad del agua se establece que debe existir un excedente de cloro en la red, y que, si este se encuentra por debajo o por encima del rango establecido, hay un incremento del riesgo a la salud del 15 %. Esta visión desconoce la poca efectividad del cloro residual sobre la formación y el desprendimiento de biopelículas en la red de acueducto, y las dinámicas de generación de subproductos de desinfección en el tiempo de permanencia del agua durante su distribución.

El otro parámetro determinante en la formación de subproductos de desinfección, la materia orgánica, que normalmente se cuantifica a través del carbono orgánico total (COT), no es obligatorio como indicador de riesgo. La turbiedad que se presenta por la presencia de coloides inorgánicos y el color asociado a material orgánico disuelto, son medidos regularmente y al sobrepasar la norma representan un incremento del riesgo del 10 y el 6 % respectivamente.

Se esperaría que los municipios abastecidos por sistemas con baja remoción de estos dos parámetros tengan una probabilidad más alta de presentar mayores concentraciones de subproductos de desinfección (SPD), aun si la dosificación se realiza de manera adecuada. Sin embargo, la remoción de turbidez y color a los niveles de la norma colombiana no garantizan una reducción suficiente de materia orgánica, para llevar a concentraciones mínimas los subproductos de desinfección.

En el estudio Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano en zonas urbanas del departamento de Boyacá, Colombia 2004-2013, del Grupo de Investigación del Laboratorio de Salud Pública de Boyacá (2), se reporta una reducción del IRCA desde el año 2004 hacia niveles de riesgo bajo; sin embargo, se hacen recomendaciones sobre el seguimiento a otros parámetros microbiológicos (*Giardia* y *Cryptosporidium*) y sustancias

químicas (metales, pesticidas) que deben ser medidos para establecer el riesgo real por consumo de agua potable. Existe la posibilidad que como los parámetros microbiológicos son los que más pesan en el cálculo del índice de riesgo por calidad del agua (IRCA), los prestadores del servicio, intentando minimizar los valores de IRCA, utilicen mucho más cloro en sus procesos de desinfección, lo cual se ha comprobado tiende a generar muchos más SPD y en mayor concentración.

Debido a este vacío en la investigación y el control de los subproductos de desinfección en el departamento de Boyacá, se desarrolló el proyecto *Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer*. En este primer trabajo se seleccionaron 15 municipios (uno por provincia): Chiquinquirá (Provincia Occidente), Duitama (Provincia Tundama), El Cocuy (Provincia Gutiérrez), Guateque (Provincia Oriente y Neira), Labranzagrande (Provincia La Libertad), Miraflores (Provincia Lengupá), Nobsa (Provincia Sugamuxi), Puerto Boyacá (Zona de Manejo Especial), Ráquira (Provincia Ricaurte), Soatá (Provincia Norte), Socha (Provincia Valderrama), Sogamoso (Provincia Sugamuxi), Sutamarchán (Provincia Ricaurte), Tunja (Provincia Centro) y Viracachá (Provincia Márquez). Dentro de esta selección se encuentran municipios de todos los rangos poblacionales: gran tamaño entre 80.001 y 150.000 habitantes, intermedio entre 20.001 y 80.000 habitantes, pequeño entre 2.501 y 10.000 habitantes y muy pequeño de menos de 2.500 habitantes.

En este proyecto se caracterizaron tres (3) grupos de SPD: los ácidos haloacéticos (AHA), los trihalometanos (THM) y algunos subproductos emergentes (SPDe). Estas sustancias tienen un probable efecto negativo en la salud, de acuerdo a los diversos estudios internacionales que se han realizado. Los resultados que indican probable efecto en salud se basan en ensayos con animales (*In vivo*), células (*In vitro*) o seguimiento poblacional (epidemiología). En los ensayos *In vivo* de los AHA, se ha identificado que estos elevan la probabilidad de la presencia de lesiones en el hígado de los roedores evaluados (3), que los AHA pueden generar daños en los espermatozoides (4,5). Además, la Oficina de Evaluación de Peligros para la Salud Ambiental de los Estados Unidos ha asociado a estas sustancias

efectos cancerígenos, anomalías reproductivas, retraso del crecimiento, genotoxicidad, citotoxicidad, y daño al bazo, al hígado y al riñón.

A partir de los ensayos *In vivo* con roedores, se ha podido observar que su exposición a los THM por vía oral puede generar tumores en hígado, riñón e intestino (1,6,7). Por otra parte, los estudios epidemiológicos de Villanueva y Jones han mostrado una relación positiva entre la exposición a THM y el desarrollo de cáncer (8,9).

Los ensayos *In vitro* realizados a los haloacetnitrilos (HAN), que hacen parte del grupo de SPDe, han arrojado como resultado que su exposición induce daño en el ADN de las células, es decir, en el material genético (8,9). Adicionalmente, en pruebas *In vivo* se encontró una relación directa entre la cantidad de halógenos (bromo, yodo, cloro) y el potencial de inducción de daño en el ADN, y una mayor influencia por parte de los compuestos bromados que los clorados (10), es decir, una mayor toxicidad.

Selección de puntos de muestreo. Al no tener datos preliminares de SPD, a excepción de los suministrados por la empresa prestadora de la ciudad de Tunja para aquellos regulados por la norma (trihalometanos), fue necesaria la caracterización de la calidad del agua en diferentes sectores de la zona urbana de los 15 municipios, en distintas épocas del año. Se llevaron a cabo 4 campañas de muestreo distribuidas en los meses de abril-mayo, junio-julio, septiembre-octubre y octubre-noviembre de 2022. A partir del protocolo descrito en el *Stage 2 DBP* de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos, USEPA, de 2006 (11), el cual tiene en cuenta al tamaño de la población abastecida (Tabla 1), se estableció un número mínimo de subsectores a muestrear para cada municipio. La localización de los subsectores se realizó tomando como base las actas que generan los prestadores del servicio de acueducto y la Secretaría de Salud del departamento para el seguimiento rutinario de la calidad, donde se establecen unos puntos concertados. Los puntos concertados están conectados directamente a la red de suministro y distribuidos al inicio, al intermedio y en la parte final de la red. En paralelo, se caracterizó la calidad de los puntos de uso cercanos a los concertados. En total se tomaron 448 muestras distribuidas en los 15 municipios (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de muestras caracterizadas en los 15 municipios de Boyacá, de acuerdo a su población

Rango de población (1)	Provincia	Municipio	Población urbana (2)	Subsectores por muestreo (3)	Muestras totales (4)
80.001 – 150.000	Centro	Tunja	130.167	8 (6)	64
	Sugamuxi	Sogamoso	89.345	8	64
	Tundama	Duitama	85.988	8 (6)	64
20.001 – 80.000	Occidente	Chiquinquirá	37.271	8	64
	Zona de Manejo especial	Puerto Boyacá	25.122	4	32
2.501 – 10.000	Oriente	Guateque	6.067	2	16
	Norte	Soatá	4.909	2	16
	Sugamuxi	Nobsa	4.264	4 (5)	32
	Lengupá	Miraflores	4.225	2	16
	Valderrama	Socha	3.139	2	16
< 2.500	Ricaurte	Ráquira	1.874	2	16
	Ricaurte	Sutamarchán	1.687	2	16
	Gutiérrez	Cocuy	1.684	2	16
	La Libertad	Labranzagrande	939	2	16
	Márquez	Viracachá	333	2	16
				Total	448

- (1) Rangos de población establecidos para agrupar a los municipios de acuerdo a su tamaño, para la presentación y análisis de resultados.
- (2) Datos de proyección DANE para 2022. Orden de los 15 municipios de mayor a menor población, que se seguirá en la presentación de resultados (12).
- (3) Subsectores seleccionados de acuerdo con el protocolo USEPA 2006.
- (4) Las muestras totales son el producto del total de subsectores por el número de campañas (cuatro) y por los puntos tomados en cada subsector (dos).
- (5) El municipio de Nobsa tuvo un incremento de subsectores de 2 a 4 por los reportes históricos del IRCA que indicaban un mayor riesgo. El 50 % de las muestras de este municipio se tomaron en la zona rural.
- (6) En los municipios de Tunja y Duitama se tomaron muestras en la zona rural; se mantienen los 8 subsectores para la zona urbana. Las muestras rurales representaron el 12.5 % del total.

Toma de muestras y análisis. Los métodos para la toma de muestras, preservación y análisis fueron los establecidos en los protocolos utilizados en el Laboratorio de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes. La toma de muestras se realizó en frascos de vidrio ámbar de 125 mL, los cuales se llenaron en su totalidad, previa apertura de la llave y a bajo caudal para evitar burbujeo y pérdida de compuestos volátiles; posteriormente, fueron refrigeradas y trasladadas a los laboratorios dentro de las 24 horas de la toma. Se midieron tres grupos de SPD por técnicas cromatográficas que permiten la detección de sustancias a bajas concentraciones: i. trihalometanos (THM) (técnica de purga y trampa; Método 5030 y 8260 de la USEPA (5,11): cloroformo (CF), bromoformo (BF), bromodichlorometano (BDCM) y dibromoclorometano (DBCM); ii. ácidos haloacéticos (AHA) (técnica de extracción líquida y cromatografía de gases Método 552.3 de la USEPA (idem): ácido monocloroacético (AMCA), ácido dicloroacético (ADCA), ácido tricloroacético (ATCA), ácido monobromoacético (AMBA), ácido dibromoacético (ADBA), ácido bromocloroacético (ABCA), ácido bromodichloroacético (ABDCA), ácido clorodibromoacético (ACDBA) y ácido tribromoacético (ATCA); iii. Subproductos No Regulados o emergentes (SPE) (técnica de extracción líquida y cromatografía de gases; Método 551 de la USEPA): dicloroacetoniitrilo (DCAN), tricloroacetoniitrilo (TCAN), bromocloroacetoniitrilo (BCA), 1,1,1, tricloro 2 propanona (TCP), 1,1-dicloro 2 propanona (DCP) y cloropicrina (CPK). Los AHA seleccionados fueron los mismos que son regulados internacionalmente. En el caso de los emergentes, se escogieron sustancias no reguladas, pero con alto nivel de toxicidad.

Resultados

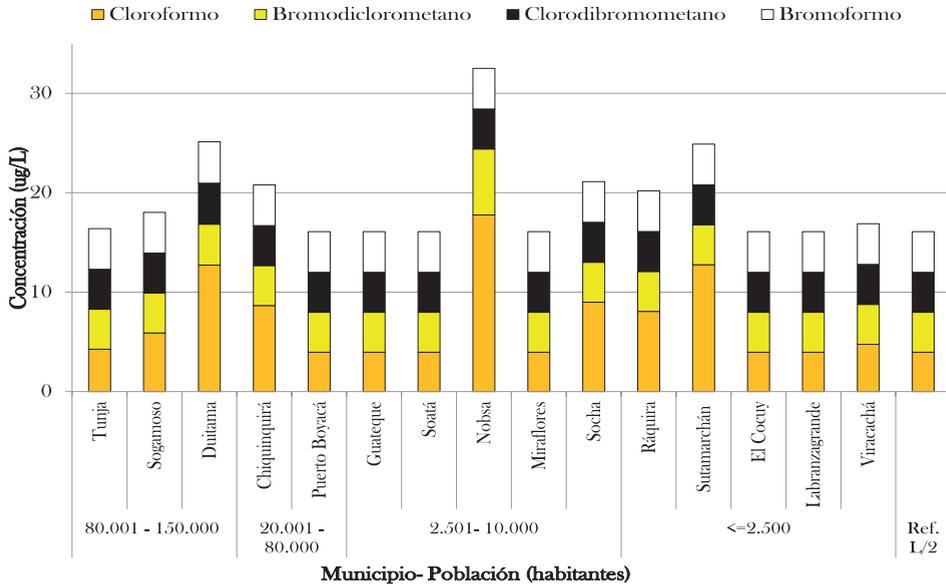
Los resultados se basan en los datos reportados por el laboratorio y los límites de detección de cada uno de los métodos; estos corresponden al valor promedio de concentración de cada sustancia en cada uno de los 15 municipios. El límite de detección (LD), es el valor mínimo que se puede reportar de manera precisa y que se determina a partir de la estandarización del protocolo usado en el laboratorio. Cuando una muestra reporta un valor menor a LD, indica que la concentración de la sustancia no se puede

detectar por el método utilizado, aunque esta esté presente. Por esta razón, los reportes de las muestras por debajo de LD se reemplazaron por la mitad de este valor (13), ya que no es posible asegurar la ausencia de estos SPD. Tanto los valores reportados como aquellos reemplazados por LD/2 fueron sumados para establecer los promedios de cada uno de los SPD medidos en los 15 municipios. Se calculó un valor promedio para cada uno de los cuatro periodos de muestreo con el fin de determinar el valor promedio anual (VPA), que equivale al promedio de los cuatro valores calculados. Se estableció el valor promedio anual (VPA) como el valor que representa los resultados obtenidos, ya que es el usado por el “*Disinfectants and Disinfection By Products Rules*” de la USEPA para establecer el cumplimiento de la norma.

A partir de los VPA de los SPD medidos en los 15 municipios (Anexo 1), se pudo determinar que las sustancias que se forman en mayor concentración son los ácidos haloacéticos, seguidos de los trihalometanos y en menor concentración los subproductos emergentes. Se calculó la concentración total de cada grupo de SPD, obteniendo para cada municipio: a. el TAHA9 como la suma de los VPA de los nueve AHA medidos, b. el TTHM4 igual a la suma de los VPA de los cuatro THM medidos c. el TSPDe6 equivalente a la suma de los VPA de los seis SPD medidos. Los rangos encontrados, incluyendo los 15 municipios, fueron: a. TAHA9 entre 6.8 µg/L reportado para Labranzagrande y 66.7 µg/L para Nobsa; b. TTHM4 entre 16.1 µg/L (El Cocuy, Guateque, Labranzagrande, Miraflores, Puerto Boyacá y Soatá) y 32.5 µg/L (Nobsa); c. TSPDe6 entre 1.69 µg/L de Labranzagrande y 14.3 µg/L de Nobsa.

Trihalometanos. Para los 15 municipios analizados, el THM que tuvo el mayor número de resultados por encima del límite de detección fue el cloroformo (rango VPA entre 3.96 µg/L y 17.76 µg/L), seguido del bromodiclorometano (rango VPA de 4.02 µg/L a 6.63 µg/L). El clorodibromometano y el bromoformo solo se detectaron en una muestra de Duitama. La suma de los valores promedio para los THM (TTHM4) fue mayor para Nobsa (TTHM4 = 32.5 µg/L), Duitama (TTHM4 = 25.1 µg/L) y Sutamarchán (TTHM4 = 24.9 µg/L), mientras que, en El Cocuy, Guateque, Labranzagrande, Miraflores, Puerto Boyacá y Soatá, todas las muestras analizadas estuvieron por debajo de LD (Figura 2).

Figura 2. TTHM4 para los 15 municipios de estudio de acuerdo al tamaño de la población. Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

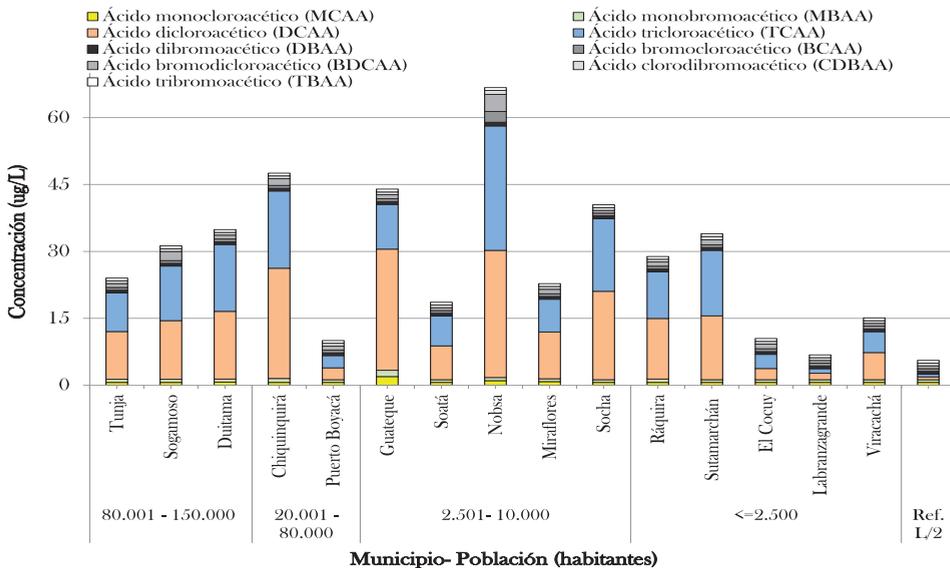
A diferencia de los AHA, los THM muestran promedios ponderados entre grupos más homogéneos, TTHM4: 18.9 µg/L (20.001 y 80.000 habitantes); 19.3 µg/L (80.001 y 100.000 habitantes) 19.6 µg/L (menores a 2.500 habitantes); 19.9 µg/L (2.501 y 10.000 habitantes).

Ácidos haloacéticos. Tomando como base los resultados de los 15 municipios, de las nueve sustancias analizadas, las más prevalentes fueron el ácido dicloroacético (rango VPA entre 1.4 µg/L de Labranzagrande y 28.5 µg/L de Nobsa) y el ácido tricloroacético (rango VPA entre 1.0 µg/L de Labranzagrande y 27.9 µg/L de Nobsa), mientras el ácido tribromoacético estuvo siempre por debajo de límite de detección. A partir de la suma de los promedios de los nueve AHA (TAHA9), se observó que Nobsa (66.7 µg/L), Chiquinquirá (47.5 µg/L) y Guateque (44 µg/L), fueron los municipios con mayores concentraciones, mientras los de menores concentraciones fueron: Labranzagrande (6.8 µg/L), Puerto Boyacá (10 µg/L) y El Cocuy (10.5 µg/L). Respecto a la presencia de un mayor número de sustancias analizadas,

Nobsa tuvo al menos un reporte por encima del LD en ocho (8) de las nueve sustancias, mientras Viracachá y Labranzagrande solo reportaron al ácido dicloroacético y al ácido tricloroacético (Figura 3).

Si se tiene en cuenta los grupos de municipios por rango poblacional, se observa que tres (3) de los que reportan mejor calidad: El Cocuy, Labranzagrande y Viracachá, pertenecen a poblaciones de menos de 2.500 habitantes. Para determinar diferencias entre grupos se calculó el promedio ponderado de cada uno, el cual se basa en el valor de TAHA9 y el peso poblacional de cada municipio sobre el total. El promedio ponderado para el grupo de municipios de menor población es igual a 21.54 µg/L, seguido por el de mayor población (80.000-150.000 habitantes) con 29.15 µg/L, 32.43 µg/L para aquellos con entre 20.001 y 80.000 habitantes y, finalmente, de 38.3 µg/L para los municipios pequeños entre 2.001 y 10.000 habitantes. Existe una diferencia de 17 µg/L entre los dos grupos de mayor y menor TAHA9 ponderado.

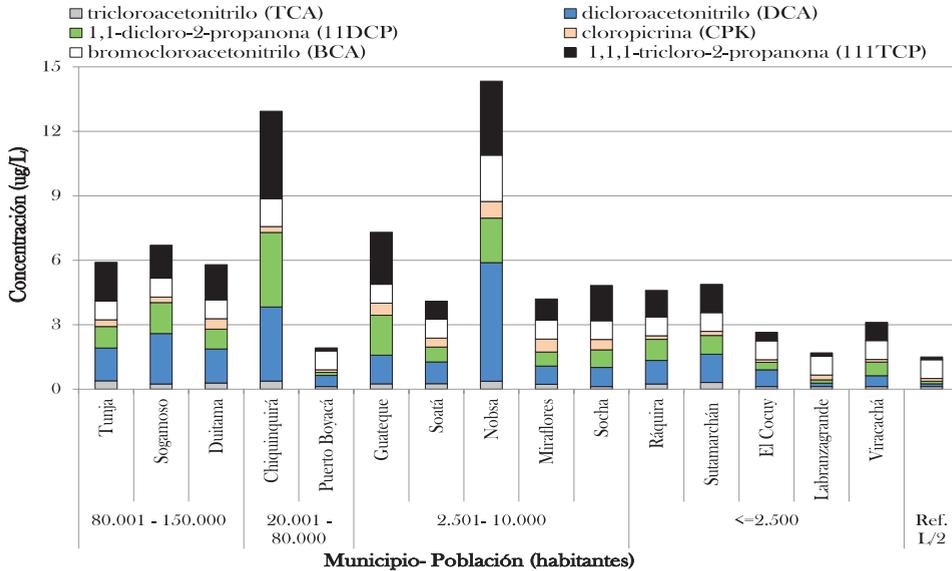
Figura 3. TAHA9 para los 15 municipios de estudio de acuerdo al tamaño de la población. Están organizados de mayor a menor población de izquierda a derecha.
 Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

Subproductos emergentes. Teniendo en cuenta los resultados de los municipios de estudio, los subproductos dicloroacetoniitrilo (DCAN) (rango VPA entre 0.159 $\mu\text{g/L}$ y 5.5 $\mu\text{g/L}$), 1,1,1, tricloro 2 propanona (TCP) (rango VPA entre 0.145 $\mu\text{g/L}$ y 4.07 $\mu\text{g/L}$) y 1,1-dicloro 2 propanona (DCP) (rango VPA entre 0.141 $\mu\text{g/L}$ y 3.47 $\mu\text{g/L}$), fueron los SPDe que mostraron los valores promedio de concentración más altos. Por el contrario, la cloropicrina (rango VPA entre 0.12 $\mu\text{g/L}$ y 0.77 $\mu\text{g/L}$) fue la sustancia con valores más bajos y el bromocloroacetoniitrilo (BCA), el que fue reportado en un mayor número de muestras por debajo de LD; solo en Nobsa (VPA=2.16 $\mu\text{g/L}$) y Chiquinquirá (VPA =1.29 $\mu\text{g/L}$), el promedio fue superior al LD/2 de 0.87 $\mu\text{g/L}$. Acorde con esto, en Nobsa (TSPDe6 =14.33 $\mu\text{g/L}$) y Chiquinquirá (TSPDe6 =12.93 $\mu\text{g/L}$), además de Guateque (TSPDe6 = 7.3 $\mu\text{g/L}$), las muestras de agua tuvieron la concentración total promedio de los 6SPDe más alta. Adicionalmente, Nobsa y Chiquinquirá mostraron resultados superiores a los LD en todos los SPDe, en al menos una muestra. Por otra parte, la mejor calidad del agua potable, a partir de estos parámetros, fue la muestreada en Labranzagrando (TSPDe6 =1.69 $\mu\text{g/L}$) y Puerto Boyacá (TSPDe6 =1.92 $\mu\text{g/L}$), ya que tuvo la cantidad más baja de estas sustancias. Las muestras tomadas en Puerto Boyacá y Viracachá solo reportaron valores por encima de los LD para los 3 SPDe más prevalentes: DCAN, TCP y DCP (Figura 4).

Figura 4. TSPDe6 para los 15 municipios de estudio de acuerdo al tamaño de la población. Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el tamaño de la población, el valor promedio ponderado basado en el TSPDe6 es menor para los municipios más pequeños ($3.67 \mu\text{g/L}$), le sigue el promedio para los de mayor tamaño ($6.1 \mu\text{g/L}$), los pequeños entre 2.500 y 10.000 habitantes con $7.1 \mu\text{g/L}$ y, finalmente, los medianos entre 20.000 y 80.000 habitantes con un TSPDe6 ponderado de $8.5 \mu\text{g/L}$. Las diferencias son significativas entre grupos, sin embargo, es importante tener en cuenta el efecto de los valores de Chiquinquirá y Nobsa que pueden llegar a ser hasta 8 veces el valor más bajo reportado por Labranzagrande.

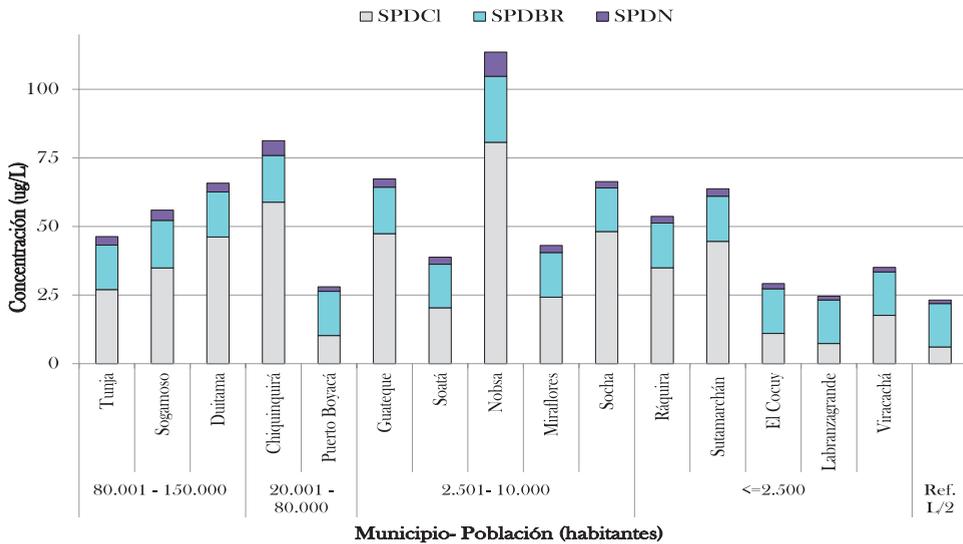
Subproductos totales. Es importante diferenciar la estructura de los SPD, ya que la toxicidad de los compuestos clorados es menor a la de aquellos subproductos bromados o los que tienen nitrógeno en su estructura. Para esta clasificación se agruparon los valores de VPA para cada municipio así:

- SPD-Cl: cloroformo (CF), ácido monocloroacético (MCA), ácido dicloroacético (DCA), ácido tricloroacético (TCA), 1,1,1, tricloro 2 propanona (TCP) y 1,1-dicloro 2 propanona (DCP).

- SPD-Br: bromoformo (BF), bromodiclorometano (BDCM), dibromoclorometano (DBCM), ácido monobromoacético (MBA), ácido dibromoacético (DBA), ácido bromocloroacético (BCA), ácido bromodicloroacético (BDCA), ácido clorodibromoacético (CDBA) y ácido tribromoacético (TBA).
- SPD-N: dicloroacetoniitrilo (DCAN), tricloroacetoniitrilo (TCAN), bromocloroacetoniitrilo (BCA) y cloropicrina (CPK).

De acuerdo con esta clasificación, se puede ver que los SPD-Cl son los que aportan la mayor concentración del total de SPD (entre un 29 % y un 72 %), seguido de los bromados con una participación del 20 al 64 % y, por último, los nitrados que representan del 4.4 al 7.7 % de los 19 SPD medidos en este estudio. La calidad del agua que se vio más comprometida por la presencia de estas sustancias fue la de Nobsa (SPD-Cl: 80.67 $\mu\text{g/L}$; SPD-Br: 24.06 $\mu\text{g/L}$; SPD-N: 8.82 $\mu\text{g/L}$; Total 113.56 $\mu\text{g/L}$) y Chiquinquirá (SPD-Cl: 58.86 $\mu\text{g/L}$; SPD-Br: 17.01 $\mu\text{g/L}$; SPD-N: 5.39 $\mu\text{g/L}$; Total 81.27 $\mu\text{g/L}$). Caso contrario, la mejor calidad del agua respecto a concentración de estos SPD fue la del municipio de Labranzagrande (SPD-Cl: 7.35 $\mu\text{g/L}$; SPD-Br: 15.85 $\mu\text{g/L}$; SPD-N: 1.38 $\mu\text{g/L}$; Total 24.57 $\mu\text{g/L}$). Existe una brecha de casi cinco veces entre el de mejor calidad y el de más baja calidad (Figura 5).

Figura 5. Concentraciones totales promedio de SPD para los 15 municipios de estudio. Suma de los VPA de SPD clorados, bromados y nitrados.
 Ref. L/2: Límite de detección/2



Fuente: Elaboración propia.

Se determinó el promedio total ponderado por subgrupo, tomando como base la suma de los VPA de los 19 SPD medidos (SPDt) y el peso poblacional de cada municipio. Para los municipios más pequeños el SPDt promedio es de 44.8 µg/L, seguido del SPDt de los municipios más grandes con 54.6 µg/L, el SPDt de 59.8 µg/L de los municipios de tamaño intermedio y, por último, el SPDt de los municipios pequeños de 65.2 µg/L. Existe una diferencia aproximada del 50 % entre los grupos de menor y mayor promedio.

Discusión

Debido a que la desinfección con cloro (hipoclorito de sodio y de calcio, y cloro gaseoso) se utiliza en el proceso de potabilización de todos los municipios estudiados (Tabla 2), es de esperar que se encuentren en mayor concentración los dos grupos que se han reportado como más prevalentes: los THM y los AHA; mientras que la mayor presencia del grupo de emergentes se podría

asociar principalmente a la disponibilidad de nitrógeno en el agua afluente a las plantas de potabilización. Los SPD son un parámetro de calidad al que no se le ha dado la suficiente importancia a nivel nacional; esto se ve reflejado en la poca información de su concentración en el agua potable, en los nulos reportes del riesgo que ocasiona su presencia en el agua de consumo, y en que no se incluye como un indicador relevante en el cálculo del índice de riesgo de calidad del agua (IRCA).

Tabla 2. Características y concentración total de SPD de los sistemas muestreados, de acuerdo con la población urbana proyectada para el año 2022

Población (1)	Municipio	SPDt (µg/L)	IRCA (2)	Fuera de norma (2)	Tratamiento	Empresa (2)	Fuente (2)
130.167	Tunja	46,32	1	Manganeso, Aluminio, COT	Convencional, cloro gaseoso, hipoclorito de calcio	Veolia S.A. E.S.P.	Represa Teatinos, pozos
89.345	Sogamoso	55,96	1	Aluminio, Hierro	Planta Chacón: convencional; Planta Sur: filtración directa; Planta El Mode: compacta cloro gaseoso	Compañía de Servicios Públicos de Sogamoso S.A. E.S.P.	Pozo profundo, Río Tejar, Lago de Tota
85.988	Duitama	65,8	2	Aluminio	2 convencionales y una compacta, cloro gaseoso, hipoclorito de calcio	Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Duitama S.A. E.S.P.	Río Surba, río Chicamocha, pozos quebrada Boyacogua

Desinfección y subproductos de desinfección
Mildred F. Lemus Pérez | Manuel S. Rodríguez Susa

Población (1)	Municipio	SPDt (µg/L)	IRCA (2)	Fuera de norma (2)	Tratamiento	Empresa (2)	Fuente (2)
37.271	Chiquinquirá	81,27	3	Manganeso aluminio COT	Convencional, cloro gaseoso	Empresa Industrial y Comercial de Servicios Públicos de Chiquinquirá	Río Suárez, pozos profundos (2)
25.122	Puerto Boyacá	28,02	2	Color aparente turbiedad	Aireación, filtración, desinfección, cloro gaseoso	Empresas Públicas de Puerto Boyacá E.S.P.	Pozos (7)
6.067	Guateque	67,35	9	Color Turbiedad Aluminio Hierro	Convencional, Cloro gaseoso	Dependencia Empresa de Servicios Públicos de Guateque.	Quebrada La Tocola
4.909	Soatá	38,79	7	Color, Turbiedad, Aluminio, COT	Compacta, Cloro gaseoso	Emposoatá E.S.P.	Quebrada Las Minas
4.264	Nobsa	113,56	0	Ninguno	Compacta convencional modular, hipoclorito de sodio	Empresa de Servicios de Nobsa S.A. E.S.P.	Laguna de Tota y río Chicamocha
4.225	Miraflores	43,05	5	Ninguno	Convencional, hipoclorito de calcio	Servilengupá S.A. E.S.P.	Laguna El Ramo
3.139	Socha	68,09	3	Aluminio color	Convencional, cloro gaseoso	Municipio de Socha	Quebrada El Tirque, nacimiento Ojo de Agua, nacimiento pozo de Las Hojas

Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección
y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá

Población (1)	Municipio	SPDt (µg/L)	IRCA (2)	Fuera de norma (2)	Tratamiento	Empresa (2)	Fuente (2)
1.874	Ráquira	53,66	28	Color aparente turbiedad aluminio hierro	Convencional hipoclorito de sodio	Administración pública Ráquira E.S.P.	Río Dulce
1.687	Sutamarchán	67,39	24	Color aparente turbiedad	Convencional; compacta, hipoclorito de calcio	Unidad administradora de servicios públicos del municipio de Sutamarchán	Río La Cebada, pozo profundo, reservorio La Capellanía
1.684	El Cocuy	29,19	1	Aluminio, calcio	Planta compacta, cloro gaseoso	Municipio de El Cocuy	Quebrada la Rincónada
939	Labranza grande	24,58	0	Ninguno	Filtros rápidos a presión + hipoclorito de calcio	Empresa de Acueducto. Alcantarillado y Aseo de Labranza grande S.A. E.S.P.	Nacimiento Vijagual, nacimiento El Chuscal y nacimiento El Zorro.
333	Viracachá	37,53	15	Manganeso, aluminio, COT	Modular convencional, hipoclorito de Sodio	Aguas de Márquez	Quebrada Juyasia, quebrada El Chuscal

(1) Población urbana proyectada por el DANE para el año 2022.

(2) Datos reportados por la Secretaría Departamental de Salud entre el 1 enero y el 25 de diciembre de 2022.

Fuente: Elaboración propia.

La fórmula del IRCA, que establece si el agua es apta o no para consumo humano, se enfoca primordialmente en el riesgo agudo, es decir, el ocasionado por la exposición en cortos periodos de tiempo, por presencia de algunos

microorganismos patógenos. Ninguno de los acueductos urbanos muestreados estuvo entre el consolidado de parámetros que mayoritariamente incumplen a los coliformes fecales, coliformes totales o al cloro residual. Por otra parte, el COT es reportado como parámetro que afecta la calidad en Chiquinquirá, Soatá, Tunja y Viracachá. Sin embargo, no se encuentra ningún tipo de relación entre el reporte positivo de este parámetro y mayores valores de SPD, excepto para Chiquinquirá. Los parámetros que más frecuentemente se incumplen son el aluminio, la turbiedad y el color, lo que podría estar asociado con la eficiencia de los sistemas, en su mayoría convencionales y su operación. Es de esperar que el IRCA no tenga ninguna relación con los valores de SPD; por ejemplo, se observan valores muy bajos para los municipios de Chiquinquirá (IRCA = 3) y Nobsa (IRCA=0) pero las concentraciones más altas de SPD totales, AHA y SPDe.

Por el contrario, un IRCA que indica riesgo medio como el de Viracachá (IRCA=15), no refleja la calidad que se pudo observar a partir de las concentraciones de SPDt (37.5 µg/L). Otro escenario se ve en los municipios donde la calidad de la fuente es óptima como Labranzagrande y El Cocuy, que tienen IRCA muy bajos e igualmente las menores concentraciones de SPDt. Esto refleja el efecto directo de la calidad del agua a ser tratada en la formación de estas sustancias, donde las características químicas del agua de fuentes superficiales tan afectadas como el río Suárez o el río Chicamocha, no son eficazmente removidas en el tratamiento.

Por otra parte, se observó que existe una variabilidad en los resultados al comparar el SPDt de las cuatro campañas, con una desviación estándar entre el 5 % para Puerto Boyacá y el 70 % para Guateque. Puerto Boyacá, al ser el único municipio que se abastece únicamente de fuentes subterráneas, cuenta con una calidad de agua cruda con características más estables a lo largo del año y concentraciones más bajas de carbono orgánico total, lo que también se ve reflejado en valores bajos de SPD.

En general, las características de calidad no superan las normas internacionales de 80 µg/L para la suma de los 4THM: bromoformo (BF), bromodichlorometano (BDCM), dibromoclorometano (DBCM), y de 60

$\mu\text{g/L}$ para la suma de los 5AHA: ácido monocloroacético (MCA), ácido dicloroacético (DCA), ácido tricloroacético (TCA), ácido monobromoacético (MBA), ácido dibromoacético (DBA). Los promedios VPA en ningún caso superan la norma, pero al ver las muestras de manera individual, se puede decir que algunas de ellas superan estos valores establecidos por la USEPA, especialmente para los AHA. Este es el caso de Nobsa (37.5 % de las muestras superan a los $60 \mu\text{g/L}$), Chiquinquirá (34 %), Guateque (25 %), Sutamarchán (12.5 %), Socha (6.25 %), Duitama (5 %) y Sogamoso (4.7 %). Para el caso de los THM el valor de $80 \mu\text{g/L}$ solo es superado en el 6.25 % de las muestras de Sutamarchán y el 3.12 % de Nobsa. La variación de resultados entre municipios, obedece a la calidad del agua cruda, a los procesos de potabilización utilizados y a las características de la red de distribución. Para un mismo municipio, estos mismos resultados de concentración de SPD varían en función de cómo cambia la condición del agua cruda por efectos climáticos (lluvia y estiaje), y por los parámetros operativos con lo que se opera el sistema de potabilización.

Adicionalmente, los municipios de Chiquinquirá, Guateque y Nobsa tuvieron promedios por campaña superiores a la norma internacional de 5AHA. Chiquinquirá reportó $72.7 \mu\text{g/L}$ en la campaña 2; Guateque $105.4 \mu\text{g/L}$ en la campaña 1 y Nobsa $78.8 \mu\text{g/L}$ en la campaña 2, lo que indicaría un probable efecto temporal sobre el cumplimiento de este parámetro de calidad. Por lo general, periodos de más alta precipitación sobre la cuenca abastecedora, generan más arrastre de material en el agua cruda, lo que puede aumentar el contenido de materia orgánica natural, la cual es precursora en la formación de SPD. Nobsa, al ser el único municipio con el mismo número de datos para la zona urbana que, para un acueducto rural, permite establecer diferencias entre estos dos sistemas. El agua suministrada por el acueducto rural supera en un 52 % el SPDt del sistema urbano. Es así como el SPDt rural es de $137 \mu\text{g/L}$ mientras el urbano de $90.1 \mu\text{g/L}$. Los parámetros de mayor diferencia porcentual fueron el bromodiclorometano (130 %) en el grupo de THM, el ácido bromocloroacético (147 %) en el de AHA, y el 1,1,1, tricloro 2 propanona (322 %) seguido del bromocloroacetronitrilo (293 %) en el de SPDe. Las diferencias en la calidad del agua suministrada por el acueducto urbano y rural son notorias, sobre todo en sustancias que pueden generar un

efecto toxicológico mayor, como son los bromados y los que tienen nitrógeno en su estructura molecular.

Por otra parte, es relevante ver el impacto de la calidad del agua potable en la población y de los asentamientos sobre las fuentes de abastecimiento. Es por esto que se clasificó la información de acuerdo al tamaño de la población de los municipios analizados. Los municipios de menor tamaño poblacional, menores o iguales a 2.500 habitantes, muestran los promedios ponderados de TAHA9, TSPDe6, y SPDt más bajos. Por otro lado, los de mayor población, 80.001 a 150.000 habitantes, tienen los segundos promedios ponderados de TAHA9, TTHM4, TSPDe6, y SPDt más bajos. Lo anterior se podría asociar a un menor efecto antropogénico sobre las fuentes en aquellos con menor cantidad de habitantes y una buena gestión del servicio en los más grandes, en parte por su capacidad financiera y el acceso a fuentes con una tratabilidad aceptable. Esta gestión permite que una gran cantidad de población se vea beneficiada de una buena calidad del agua, ya que la población de Tunja, Sogamoso y Duitama representa el 77 % de la población total evaluada. Caso contrario, el grupo de municipios de 2.501 a 10.000 es el que presenta los valores de promedios ponderados más altos de TAHA9, TTHM4, y SPDt. Los municipios pequeños se pueden estar viendo afectados por un desarrollo intermedio no controlado y una baja capacidad de las empresas prestadoras para la producción de agua potable baja en subproductos de desinfección de forma permanente.

Es importante prestar atención a todos los municipios, pero con especial enfoque en aquellos con mayor prevalencia de muestras por encima de la norma como Nobsa y Chiquinquirá, y los que prestan el servicio a un mayor número de habitantes, haciendo un seguimiento más frecuente a la operación y mantenimiento de los sistemas y el control de parámetros como carbono orgánico total y cloro residual, que para el caso del seguimiento llevado a cabo por la Secretaría Departamental, tiene una frecuencia que se rige por la norma, pero que para el control operativo puede ser insuficiente.

Es relevante tener en cuenta que, aunque los resultados muestran un cumplimiento generalizado de las normas internacionales, estas no se ajustan a la misma velocidad que exigen los resultados de reportes epidemiológicos.

De acuerdo a Villanueva *et al.* (8), la exposición crónica a los THM fue asociada a un riesgo dos veces mayor a contraer cáncer de vejiga en comparación a población no expuesta (THM > 49 µg/L Vs. THM < 8µg/L). Por otra parte, Jones *et al.* (14) encontraron una asociación positiva entre la exposición más alta a THM y el cáncer rectal (7.83 µg/L Vs. THM < 0.68 µg/L). Esto quiere decir que a partir de valores superiores a 8 µg/L de THM se podrían observar efectos, lo que indicaría un riesgo probable en todos los municipios. Lo anterior genera una pequeña alarma y un llamado al seguimiento y control de la operación de los sistemas de potabilización, en términos de producción de este tipo de sustancias no deseadas.

Desafíos y perspectivas

La diversidad de condiciones en el departamento de Boyacá (i.e. tamaño de municipios, fuentes de abastecimiento, operadores de los sistemas de producción, estado y operación de los trenes de tratamiento y producción, etc.) hacen de la gestión del agua todo un desafío. Para el caso del agua potable, la gestión debe ir ligada a un manejo adecuado de las diferentes etapas del sistema, un control desde la fuente hasta el usuario. Esta gestión incluye el control de la calidad del agua potable, en este caso particular, de las sustancias que no hacen parte del índice de riesgo de la calidad del agua (IRCA), tales como los subproductos de desinfección.

Si bien la mayoría de los datos de concentración de subproductos de desinfección encontrados en los 15 municipios del departamento cumplen con la norma nacional (caso de los THM), y con normas y valores de referencia internacionales (caso de los AHA y algunos SPDE), esto no es sinónimo de bajo riesgo de afectación en la salud pública, pues en el cálculo del riesgo no solo es importante la concentración de las sustancias, sino también la exposición a las mismas y los diversos efectos negativos que sobre la salud humana tiene cada una de estas sustancias.

La cuantificación del riesgo permite una mejor toma de decisión sobre el nivel de medidas requerido, y la focalización de estas, para minimizar los efectos negativos sobre la salud pública asociables a diversos tipos de sustancias.

Por tanto, se hace indispensable complementar este ejercicio de cuantificación de concentraciones de algunos subproductos de desinfección, con estudios sobre la forma como la población boyacense se expone a estos por la vía inhalatoria, de forma dérmica y por ingesta. Es decir, se requiere estudios sistemáticos relativos al uso del agua potable que hacen las personas en el departamento.

A partir de este análisis de exposición, y teniendo los datos de concentración, se puede realizar la cuantificación del riesgo, la cual demanda muchos datos técnicos específicos, que no existen para Boyacá, ni para Colombia. En este caso, se pueden hacer diversos tipos de suposiciones bajo diferentes escenarios, que permitan una aproximación de esta cuantificación del riesgo. A partir de este segundo mejor, se podrán tomar decisiones para minimizar el riesgo sobre la salud pública, asociable a los efectos de estos subproductos de desinfección. No es excusa la ausencia de información específica para todas las variables que demanda este tipo de ejercicios. Es urgente el uso de los estudios de cuantificación de riesgo que orienten sobre mejores prácticas que lleven hacia la minimización del riesgo en salud pública.

Este primer ejercicio de cuantificación de subproductos de desinfección con respecto a Boyacá, requiere ser mejorado. Es recomendable hacer medidas sistemáticas de este tipo de subproductos, y de otros aun más tóxicos (p. ej. halonitrometanos, halofuranonas, halocetonas, entre otros), en todos los municipios del departamento. Por supuesto, medir tantas sustancias en tan diversos puntos urbanos y rurales demanda una gran inversión de recursos, por lo que una alternativa puede ser la medición del nivel de toxicidad, la cual permite evidenciar el efecto negativo en la salud pública, de la exposición a la mezcla de diversas sustancias presentes en el agua potable (p. ej. ensayos con células humanas o de homínidos). De igual manera, es imperativo el desarrollo de estudios en todo el departamento, en cascos urbanos y en zonas rurales, sobre el nivel de exposición que al agua potable tiene la población. Estos estudios pueden ser actualizados cada 10 años. Aparece entonces el desafío de implementar las técnicas analíticas adecuadas con bajos límites de detección en los laboratorios del departamento, para la medición de subproductos o toxicidad, que permitan un mejor acceso a los municipios

y a la población al conocimiento de la presencia de estas sustancias. Como las sustancias precursoras de estos subproductos de desinfección son los desinfectantes clorados, la cantidad de materia orgánica y el nitrógeno en el agua cruda, se pueden considerar estrategias de desinfección alternativas al uso de sustancias cloradas, como la desinfección por radiación UV, la cual se hace cada día más asequible, y la búsqueda de fuentes de agua cruda alternativas. Igualmente, se debe llegar al monitoreo permanente de la materia orgánica por medio de los indicadores COT, UV₂₅₄, SUVA y de las sustancias nitrogenadas en el agua cruda, que permitan garantizar que las fuentes de abastecimiento tienen y mantienen un bajo potencial de formación de subproductos de desinfección. Debido al alto coste de hacer mediciones en línea de COT, la alternativa de mediciones *In situ* de UV₂₅₄ como un indicador global para tomar decisiones rápidas ha sido extendida y ampliamente sugerida.

Finalmente, es muy importante capacitar de manera recurrente a los usuarios y los operadores de los sistemas de generación y suministro de agua potable (urbanos y rurales) en el tema de los subproductos de desinfección, sus orígenes, sus efectos en salud y su control, así como a los tomadores de decisión. Por supuesto, todas estas estrategias de gestión y el reconocimiento de las áreas de mejora requieren del trabajo conjunto y el compromiso de todos los actores del sistema, desde la fuente hasta el punto de uso como operadores, reguladores, gestores y usuarios, más aún con efectos externos que pueden modificar abruptamente las condiciones de los sistemas de abastecimiento como el cambio climático.

Referencias

- 1) Richardson SD, Plewa MJ, Wagner ED, Schoeny R, DeMarini DM. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. *Mutation Research - Reviews in Mutation Research*. 2007. 636, 178-242. [https://doi: 10.1016/j.mrrev.2007.09.001](https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001).
- 2) Dueñas-Celis, MY, Dorado-González LM, Espinosa-Macanal P, Suescún-Carrero SH. Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo

humano en zonas urbanas del departamento de Boyacá, Colombia 2004-2013. 2018. *Revista Facultad Nacional De Salud Pública*, 36(3). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v36n3a10>.

3) Crosby LM, Simmons JE, Ward WO, Moore TM, Morgan, KT, DeAngelo AB. Integrated disinfection by-products (DBP) mixtures research: Gene expression alterations in primary rat hepatocyte cultures exposed to DBP mixtures formed by chlorination and ozonation/postchlorination. 2008. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 71: 1195-1215. <https://doi.org/10.1080/15287390802182581>.

4) Donohue JM, USEPA. Toxicological Review of Dichloroacetic Acid (CAS No. 79-43-6): In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). 2003. US Environmental Protection Agency.

5) USEPA. Preparing Your Drinking Water Consumer Confidence Report: Revised Guidance for Water Suppliers: United States Environmental Protection Agency, Office of Water. 2001.

6) WHO. Guidelines for drinking-water quality: World Health Organization, Distribution and Sales Geneva 27 CH-1211. 2004. Switzerland.

7) Olmedo MT. Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. 2008. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 8, 335-342. ISSN 1579-1734.

8) Villanueva CM, Cantor KP, Grimalt JO, Malats N, Silverman D, Tardon A, Garcia-Closas, R, Serra C, Carrato A, Castaño-Vinyals G, Marcos R, Rothman N, Real FX, Dosemeci M, Kogevinas M. Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. 2007. *American Journal of Epidemiology*, 165(2):148-56. <https://doi: 10.1093/aje/kwj364>.

9) Villanueva CM., Espinosa A, Gracia-Lavedan E, Vlaanderen J, Vermeulen R, Molina A. J, Amiano P, Gómez-Acebo I, Castaño-Vinyals G, Vineis P, Kogevinas M. Exposure to widespread drinking water chemicals, blood inflammation markers, and colorectal cancer. 2021. *Environment International*, 157, 106873. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106873>.

10) Le Curieux F, Giller S, Gauthier L, Erb F, Marzin D. Study of the genotoxic activity of six halogenated acetonitriles, using the SOS chromotest, the Ames-fluctuation test and the newt micronucleus test. 1995. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 341, 289-302. [https://doi: 10.1016/0165-1218\(95\)90100-0](https://doi.org/10.1016/0165-1218(95)90100-0).

11) USEPA. Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule: A Quick Reference Guide for Schedule 1 Systems. 2006. Disponible en: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100A2D4.txt>.

12) DANE. Proyecciones de población. 2023. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.

13) Antweiler RC, Taylor HE. Evaluation of statistical treatments of left-censored environmental data using coincident uncensored data sets: I. Summary statistics. 2008. *Environmental Science and Technology*, 42(10):3732-8. doi: 10.1021/es071301c. PMID: 18546715.

14) Jones RR, DellaValle CT, Weyer PJ, Robien K, Cantor KP, Krasner S, Beane-Freeman LE, Ward MH. Ingested nitrate, disinfection by-products, and risk of colon and rectal cancers in the Iowa Women's Health Study cohort. 2019. *Environment international*, 126, 242-251. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.010>.

15) Onstad GD, Weinberg HS, Krasner SW. Occurrence of Halogenated Furanones in U.S. Drinking Waters. 2008. *Environmental Science & Technology* 42: 3341-3348. <https://doi.org/10.1021/es071374w>.

Cáncer digestivo y calidad del agua de consumo¹²

Bibiana Matilde Bernal Gómez¹³

Introducción

El cáncer digestivo es un término que abarca diferentes tipos de cáncer que afectan al aparato digestivo, desde la boca hasta el ano (1). Según el órgano o la célula donde se origina, se pueden clasificar en: cáncer de la cavidad oral, de lengua y glándulas salivales; cáncer de esófago; cáncer de la unión gastroesofágica; cáncer gástrico; cáncer de intestino delgado, cáncer colorrectal y cáncer anorrectal. Además, se incluyen dentro de los cánceres digestivos las neoplasias que afectan a las glándulas digestivas, como el hígado, el páncreas, la vesícula biliar y los conductos biliares.

Estos cánceres suelen tener un fenotipo celular similar, ya que se originan en un mismo vestigio endodérmico (1,2). El cáncer pancreático es uno de los más estudiados por su asociación con los tóxicos ambientales, con diferencias según la geografía, la ocupación y el género. El cáncer de la vesícula biliar y los conductos biliares también tienen una base genética fuerte, pero su presentación puede estar influenciada por un factor ambiental desencadenante (1). En este libro nos enfocaremos en el cáncer gástrico y el colorrectal, que son dos de los más prevalentes en el departamento de Boyacá. Sin embargo, es

12 doi: <https://doi.org/10.19053/upct.9789586608459.5>

13 Docente e investigadora de la Escuela de medicina de la Uptc. Grupo de Investigación Biomédica y de Patología de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

posible que los factores etiológicos de estas dos enfermedades sean comunes para los cánceres hepático, pancreático, de la vesícula biliar y los conductos biliares, especialmente por las relaciones ambientales con los compuestos denominados ácido dicloro y tricloroacético y el cáncer de hígado.

Su relación con el ambiente puede resumirse en esta tabla:

Tabla 1. Tipos de cáncer digestivo de acuerdo a su subtipo histopatológico y atribución ambiental según referencias de metaanálisis con base en estudios de cohortes o casos y controles

ÓRGANO	SUBTIPO HISTOLÓGICO	ATRIBUCIÓN AMBIENTAL	REFERENCIAS
Hígado	Carcinoma hepatocelular	Aflatoxina B1	(3)
Páncreas	Adenocarcinoma pancreático	Alcohol / alcohol y tabaco	(4)
Estómago	Adenocarcinoma	Asbestos / Helicobacter pylori / Nitrosaminas / trihalometanos	(5-7)
Colon	Adenocarcinoma		(8,9)
Vesícula biliar	Carcinoma	Portador crónico de Salmonella typhi	(10)

Fuente: elaboración propia.

El cáncer gástrico es una de las neoplasias malignas con mayor mortalidad en el mundo, con particular afectación en el mundo en desarrollo. En Colombia, tiene una tasa de mortalidad que va de 10 a 17 casos por cada 100.000 habitantes, siendo muy alta en los departamentos de Caldas y Quindío, situación que cambió en la última década, pues tradicionalmente habían sido los departamentos de Boyacá y Nariño donde era más frecuente (11). Esta es una enfermedad crónica degenerativa con alta morbilidad y mortalidad. Su detección temprana y tratamiento oportuno son clave para mejorar este problema de salud pública. Sin embargo, en Boyacá, en Colombia y en el mundo, se suele diagnosticar en etapas avanzadas, lo que aumenta los costos sanitarios. Aunque su incidencia en mujeres ha disminuido en Colombia, se espera que su diagnóstico sea más precoz en nuestra región gracias a

una mejor formación de los profesionales de salud (12). Esta enfermedad es indolente y se manifiesta por síntomas como la anemia, relacionados con el daño de la mucosa gástrica. Muchas veces, el paciente y su médico confunden el dolor con el consumo de la comida con gastritis o úlcera por estrés. Por eso, es importante realizar una endoscopia temprana en zonas de alta frecuencia de cáncer gástrico para evitar el subdiagnóstico (13). El cáncer de estómago tiene dos variantes principales según la clasificación de Lauren: intestinal y difuso de células en anillo de sello y es una enfermedad genéticamente diversa, con subvariantes según los genes involucrados. Se asocia con infección por virus como el Epstein-Barr, que se extiende hacia el esófago. Tiene una alta variabilidad genómica, con muchas mutaciones intratumorales (TMLs). Algunas de estas mutaciones afectan a genes de reparación del DNA (MSI-H o POLE) o a proteínas de membrana como las acuaporinas o las mucinas como las de tipo MUC 6, 9 y 16 (14,15). Estas características genómicas permiten subtipificar el cáncer gástrico en cuatro grupos moleculares diferentes, según el proyecto TCGA (*The Cancer Genome Atlas Program - National Cancer Institute*). Estos grupos tienen implicaciones clínicas, ya que se relacionan con la complejidad clonal, las mutaciones *driver* o *passengers* y la supervivencia de los pacientes, pero el cáncer se forma por varios eventos de la carcinogénesis química, que implican la iniciación (transformación tumoral), la progresión (proliferación neoplásica) y la metástasis (invasión a otros órganos).

Los carcinógenos ambientales influyen en el desarrollo de esta enfermedad, como el exceso de sal o los pesticidas en los alimentos (16). Así entonces, las buenas prácticas de consumo de agua de calidad idónea, buenas prácticas agrícolas para alimentos y agroindustria y de protección ambiental, han repercutido en el hecho de la disminución en la incidencia del cáncer gástrico, pero no la vulnerabilidad genética de la población más afectada (17,18). La relación entre el exposoma (factores ambientales y vitales) y el exoma (cambios genéticos) (19), es clave para entender el cáncer digestivo como lo son el de orofaringe (19) y, posiblemente, el gástrico y sus variantes genómicas. Para reducir su incidencia, se deben mejorar la calidad del agua, la prevención del tabaquismo, el control de carcinógenos en los alimentos y el acceso a la endoscopia. Además, se debe identificar la vulnerabilidad

genética de los pacientes con síntomas gástricos y hacer más tamizaje para neoplasias y condiciones preneoplásicas en poblaciones de riesgo.

El adenocarcinoma gástrico es un cáncer gástrico de muy mal pronóstico cuando se diagnostica en etapas oncológicas avanzadas y su posibilidad biológica se basa en el alto potencial replicativo del epitelio digestivo que *per se* puede contener múltiples lesiones genéticas en población sana. Sin embargo, se han identificado lesiones previas asociadas a gastritis crónica atrófica y metaplasia intestinal, las dos relacionadas con la respuesta inmunitaria a *Helicobacter pylori* (carcinógeno de tipo 2A). Para su historia natural, se han establecido 3 etapas carcinogénicas: la primera de iniciación o carcinogénica, la segunda asintomática y la tercera sintomática (20).

El cáncer colónico se origina en el intestino grueso, tiene dos localizaciones (derecha e izquierda) y tres subtipos histopatológicos (bien, moderadamente y mal diferenciado). Este se asocia con una dieta rica en alimentos quemados y carne, y pobre en fibra. Existen dos subtipos epidemiológicos: uno con mutaciones genéticas APC y KRAS (abreviaturas de los genes APC o *adenomatous polyposis coli* y KRAS: oncogén homólogo al virus Kirsten de sarcoma de rata), que se origina en pólipos adenomatosos, y otro esporádico que no tiene etapas previas. El primero tiene un proceso degenerativo genético que afecta la producción de mucina y la invasión del estroma. El segundo es más frecuente en Boyacá y se relaciona con la calidad del agua (21,22). Ambos tienen un mal pronóstico según el compromiso de ganglios linfáticos y otros órganos. Los síntomas pueden ser obstrucción o sangrado. Una dieta saludable reduce el riesgo de cáncer colónico (23) y debe suponerse que en su formación factores de inestabilidad satelital genética, moleculares y de interacción genoma-exposoma desempeñan un rol similar como lo que se describe del cáncer de estómago.

Metodología

Este trabajo buscó la literatura científica más relevante sobre subproductos de desinfección en el agua de consumo humano y el cáncer digestivo, usando las etapas de la revisión integrativa descrita en la presentación del libro. Las primeras búsquedas se orientaron a encontrar estudios de causalidad entre algunos de dichos subproductos de desinfección (SPD) entre los que se

identificó como más preponderante al nitrato en el agua de consumo humano, relacionado con el cáncer gástrico y colónico.

Para lo anterior, se usó la base de datos PubMed con los descriptores *Mesh: Nitrate OR Water OR Drinking water AND cancer, AND digestive cancer, AND colorectal cancer.*

A continuación, se filtraron los estudios ambientales y epidemiológicos publicados entre 2013 y 2023. Cabe anotar que se excluyeron los estudios que solo midieron variables moleculares, microbiológicas, histopatológicas, radiológicas o farmacológicas no relacionadas con químicos ambientales. Se incluyeron solamente estudios denominados como RCT del inglés, *randomized control trial* o ensayos clínicos aleatorizados.

De los 141 resultados obtenidos, se descartaron 31 por no cumplir los criterios de inclusión. De los 110 restantes, algunos se centraron en la epidemiología, la relación de células y ambiente con la carcinogénesis de la bacteria *Helicobacter pylori*. Estos estudios se revisaron para extraer algunas ideas, pero se excluyeron del análisis. Se extrajeron datos de 92 artículos en los que se relaciona el agua de consumo con el cáncer digestivo a nivel mundial.

Con el fin de identificar los estudios de mayor robustez científica en cuanto a la exposición a trihalometanos y cáncer digestivo, se hizo un análisis con base en estudios clínicos de asociación entre este tipo de agentes y la enfermedad humana por medio de seleccionarlos en un filtro, del cual se incluyó: estudios hechos en seres humanos, de 8.862 artículos con diferentes enfoques, 45 pasaron el filtro de selección para estudios clínicos de los cuales, 27 fueron clasificados como ensayos clínicos aleatorizados (RCT), 6 en los últimos 10 años. Para el análisis de este libro, se excluyeron los resultados de investigaciones relacionados con procedimientos anestésicos y odontológicos.

Con la aplicación de una búsqueda similar, se seleccionaron 51 estudios en la base de datos de PubMed con las palabras clave “*Bromo in by products disinfection*”, ubicados temporalmente desde 1990, de estos, 11 fueron ensayos aleatorizados.

Adicionalmente a esta búsqueda, se recurrió a literatura gris de origen latinoamericano obtenida de los buscadores de Google y de la biblioteca virtual en salud (BVS) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), por medio de descriptores (*Decs* y *Mesh*) sobre cáncer gástrico, cáncer de colon y exposición crónica a subproductos de desinfección del agua de consumo humano.

Resultados

La infección de la mucosa gástrica por la bacteria *Helicobacter pylori* ha disminuido principalmente en los países desarrollados y ha llegado a una meseta en los países en desarrollo y en vías de industrialización (24), debido a que se asume como verdadero una carga de contribución de aproximadamente un 90 % del cáncer gástrico a la infección crónica por dicha bacteria (ídem).

La gastritis crónica precarcinogénica, causada por la infección de la bacteria *Helicobacter pylori*, se mantiene por su contagio en un contexto familiar y con unas condiciones de higiene y saneamiento ambiental deficientes, incluyendo la falta de agua potable (25). Además, la infección puede persistir o reinfectarse por la resistencia al tratamiento antibiótico o por otros factores de riesgo de cáncer gástrico, como el tabaquismo y una dieta desequilibrada (26).

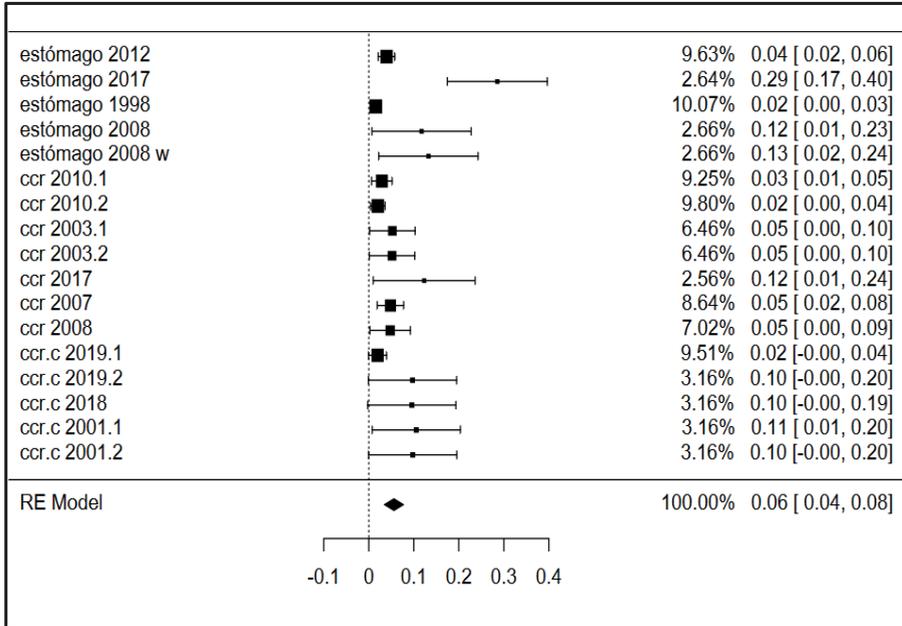
Una dieta balanceada, rica en frutas y vegetales limpios y frescos, así como con una cantidad menor de alimentos procesados con abundante sal, tiene también un efecto protector contra la infección (27), pues se ha comprobado que los alimentos y la manera de prepararlos, así como el agua de consumo, tienen un rol participante en la transmisión del *Helicobacter pylori* (28). Al ser la infección por esta bacteria muy común, es necesario investigar qué otras sustancias contribuyen al daño mutagénico que causa el cáncer gástrico, ya que no todos los infectados por esta bacteria lo desarrollan. Actualmente, también existen investigaciones donde se estudia su asociación con cáncer de colon.

Se ha identificado en cultivos celulares un papel importante de la coinfección con otras bacterias reductoras de nitratos, usualmente aisladas de pacientes

con gastritis atrófica, las cuales parece ser promueven la inflamación persistente *In Vitro* por la activación del ciclo celular a partir de MAPK, una posible ruta de aparición de la neoplasia (29) y se ha identificado en modelos *In Vivo*, su acción sinérgica del crecimiento celular.

Los resultados mostraron que la contaminación del agua con nitratos es un factor de riesgo para el cáncer digestivo, particularmente el gástrico, según varios metaanálisis de calidad y robustez científica (30-32). Sin embargo, no se encontró suficiente evidencia para el cáncer de colon con un nivel similar de exposición. Los nitratos y los nitritos provienen de fuentes superficiales o profundas, como fertilizantes, agroquímicos y actividad antrópica. Estos compuestos forman óxidos nitrosos (NOCs), entre los que las N-nitrosaminas son las más carcinogénicas para los humanos. La dosis de nitrosaminas tiene un gran peso epidemiológico, así como la interacción entre factores genéticos y ambientales. La dificultad para establecer la causalidad se debe al desconocimiento del efecto o peso epidemiológico que tienen el tabaquismo, el consumo de alcohol, una pobre nutrición desde la infancia, así como una exposición continua a múltiples contaminantes ambientales. Se encontró un *Odds Ratio* de 1,91 por cada 10 mg/L de incremento del ion nitrato en el agua de consumo. La siguiente gráfica resume los datos escogidos para el metaanálisis liderado por Picetti *et al.* (32).

Figura 1. Asociación entre cáncer y exposición a nitratos en el agua de consumo humano: cáncer de estómago; ccr: cáncer colorrectal; ccr.c: cáncer colorrectal y de colon. Fuente: elaboración propia con los datos tomados de Picetti *et al.* (32).



El nitrógeno es un elemento vital que se absorbe y elimina por el sistema digestivo. Una parte se transforma en nitrito y nitrato, los dos carcinógenos. La Organización Mundial de la Salud recomienda unos niveles máximos de nitrato y nitrito en el agua potable, pero muchos países los superan. Esto se vincula con un mayor riesgo de cáncer digestivo.

También existen estudios que asocian el arsénico en el agua con el cáncer urotelial. Todos los metabolitos del arsénico incrementan el riesgo de este cáncer y probablemente contribuyan con un peso o carga atribuible, al de tipo gastrointestinal. Se requiere mayor investigación para confirmar esta relación, pero la exposición al arsénico del agua de consumo humano es la principal vía causal de cáncer en poblaciones altamente expuestas.

Se encontró que el nitrato en el agua es un factor de riesgo para el cáncer gástrico, según varios metaanálisis entre los que se encuentran los elaborados

por Essien *et al.* (31) y Picceti *et al.* (32). Sin embargo, no se halló evidencia suficiente para obtener una concentración asociada con el cáncer de colon. El nitrato proviene de fuentes superficiales o profundas, como fertilizantes, agroquímicos y actividad antrópica y se transforma en nitrito. La dosis de nitrito tiene un gran peso epidemiológico, así como la interacción entre factores genéticos y ambientales.

En el estudio hecho por Hao en 2020 (33), se encontró que uno de los factores de protección para no desarrollar cáncer digestivo, particularmente el gástrico, una vez controlados determinantes sociales y biológicos de confusión estadística, fue que quienes no lo tuvieron del condado de Shenyang, provincia de Jiangsu hervían más frecuentemente el agua de consumo y la tomaban de manera más frecuente. En India, Pinky Taneja en 2017 (34) encontró que la dosis de riesgo de los nitratos para el desarrollo de un incremento del riesgo de cáncer digestivo fue la de un valor superior a 45 mg/L de nitratos en el agua de consumo, esto obtenido de un estudio anidado de casos y controles. Es importante resaltar que la dieta rica en estos componentes y procedente de vegetales puede llegar a contener entre 10 mg y 100 mg de nitratos por cada 100 gramos de vegetales (35,36). Sin embargo, no se ha identificado estadísticamente una asociación causal o un efecto protector versus los otros componentes de las verduras.

Con referencia a los trihalometanos, el riesgo superior de cáncer ante la exposición crónica a subproductos de desinfección se ha identificado en estudios de cohortes y dicha asociación entre la exposición al agua de consumo humano muestra un incremento entre la exposición a trihalometanos por vía oral y la exposición dérmica durante el uso de piscinas, con significancia estadística para el cáncer de vejiga (37-39), aunque no es el único factor contribuyente. Noxas ambientales como el consumo de sacarina y otros edulcorantes, cuya carcinogénesis ha sido explorada e identificada en ratas desde hace tres décadas, se convierten en carga de causalidad vigente asociada (40-43).

En cuanto a la asociación entre los trihalometanos y el cáncer digestivo, podemos documentar que al ser los trihalometanos subproductos de la

desinfección del agua con cloro, hay una relación entre la exposición al agua con trihalometanos por vía oral y dérmica, especialmente en piscinas, como decimos para el cáncer de vejiga incluso con sus cambios epigenéticos (41) pero menos robusta para cáncer de colon y no se encontró una asociación estadística significativa con otros tipos de cáncer digestivo. Esto puede deberse a la etiología multifactorial del cáncer y a la presencia de sesgos y variables de confusión, así como por la superposición de otros agentes carcinógenos.

Por último, se estudió el efecto de los ácidos tricloroacético y dicloroacético en el cáncer digestivo. Estos ácidos son también subproductos de la desinfección del agua con cloro. Se ha comprobado su efecto carcinogénico en animales de laboratorio, especialmente en el hígado. En humanos, se encontró una relación entre la disminución de los índices plaquetarios y la presión arterial con el incremento urinario de estos ácidos (38). Esto podría relacionarse con el riesgo de enfermedad crónica mieloproliferativa. Sin embargo, no se ha confirmado su efecto en el cáncer digestivo. En los resultados de 4 ensayos clínicos aleatorizados (RCT) en los que está definido el fenómeno de exposición aguda, no se encontró una asociación estadística entre estos compuestos y el desarrollo de cáncer digestivo: ni linfoma, ni carcinoma o sarcoma. No obstante, se identificó una asociación con hipospadias, una anomalía congénita del meato uretral masculino y la exposición mixta con los trihalometanos, como hemos anteriormente escrito también con el cáncer de vejiga (42,43) y el cáncer pancreático pero dependientes de la función renal y hepática (44,45).

Con referencia a los 51 estudios obtenidos de la búsqueda “*Bromo in by productos disinfection*” solo 11 fueron ensayos aleatorizados (RCT) y en ninguno se encontró una asociación estadística significativa. Este hecho es común en los resultados de investigación sobre causalidad, cuando la etiología tiene factores múltiples y algunos de ellos inducen a sesgos y variables de confusión.

En animales de laboratorio, se ha comprobado el efecto carcinogénico por la presencia de la presencia de los ácidos tricloroacético (TCA) y dicloroacético.

Sin embargo, no se ha comprobado su efecto en modelos de exposición humana basados en el consumo de agua. La toxicidad hepática y la carcinogénesis están relacionadas con el aumento del daño causado por los dos ácidos, ya que ambos son considerados agentes agonistas del cloroformo y eventualmente incrementan su toxicidad. El TCA solo aumenta la toxicidad renal, pero su actividad como carcinógeno depende del incremento del daño renal y se ha identificado la aparición de hepatocarcinoma en ratones. Un estudio de cohortes realizado en jóvenes con una media de 27 años y un índice de masa corporal de 23.5 Kg/m^2 , cuya tasa de tabaquismo fue menor del 38.2 % y con una mayor frecuencia de consumo de alcohol (57.8 %), identificó una relación entre la disminución de los índices plaquetarios PDW medidos y la presión arterial, debido al incremento urinario de los ácidos tricloroacético y dicloroacético medidos en orina (38,45-47).

Aunque se requiere mayor claridad en este aspecto, se ha sugerido que podría estar relacionada con el riesgo de enfermedad crónica de tipo mieloproliferativa (leucemia mieloide crónica u otro tipo de cáncer). Se ha observado una gran diversidad en la expresión de tumores en ratones después de la exposición a dosis de 26.67 a 20 milimoles litro de TCA en el agua de bebida. Este efecto se ha identificado desde las 7 semanas de edad y hasta el primer y segundo año de exposición. La exposición al TCA es capaz de alterar el desarrollo ocular en el modelo de ratón con dosis de 500 miligramos por kilogramo por día; También se ha identificado que puede afectar el desarrollo de la rata Fisher en combinación con el ácido retinoico; esta mezcla es la que produce una teratogénesis similar al aumento de la vitamina A (48).

Con los estudios realizados en Latinoamérica que se han planteado la hipótesis de que los subproductos de desinfección (SPD) presentes en el agua de consumo humano pueden estar asociados a mayor riesgo de cáncer digestivo han sido escasos y con resultados contradictorios. El objetivo de este trabajo ha sido analizar el riesgo de cáncer gástrico y de colon, por exposición a SPD en el agua potable, en la población boyacense, y estimar la fracción atribuible al cáncer (FAC) de este factor. Un estudio en Costa Rica no encontró ninguna relación entre la mortalidad por el cáncer gástrico y el agua de consumo (49).

Triana *et al.* (50) calcularon un AVAD de cáncer gástrico en Colombia con una proyección del Censo del año 2005 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), involucraron los años de vida potencialmente perdidos (AVPM), por su letalidad y lo compararon con estudios regionales en Chile, identificando tanto en la incidencia, morbilidad y mortalidad, similitudes en sus datos. Para evaluar la carga de la enfermedad en Colombia encontraron que, a pesar de ser un país de alta incidencia, la tasa de AVAD de 304 por 100.000 habitantes, es similar a países desarrollados con incidencia intermedia, infiriendo, entre otras causas, que existe probablemente un subdiagnóstico (50,51). Dichos autores recalcan la importancia de mejorar el registro a nivel municipal, departamental y nacional y la ausencia de publicaciones de conexión del cáncer digestivo con el agua de consumo humano.

Barreto *et al.* (51), publicaron un estudio con la carga del cáncer gástrico para Tunja de 2010 a 2019, en el que es relevante que se perdieron 34,2 AVAD por cada 1.000 personas, a causa del cáncer gástrico en la capital del departamento; dicha carga en salud pública es notoriamente diferente, presentándose más la enfermedad en grupos de edad más joven de forma comparativa (51). Pardo y Cendales (52) encontraron de 2007 a 2011 una tasa de cáncer gástrico de 25,9 en hombres y de 15,8 casos para mujeres por cada 100.000 habitantes; Cuspoca (53) en 2018, como parte del semillero de investigación EMAC (evaluación de moléculas asociadas a cáncer) de la Uptc, junto al semillero GRECO de la escuela de medicina de la Uptc, identificó una tasa de incidencia de 181,7 por 100.000 habitantes con datos de 2010 a 2015, lo cual ha venido en aumento para 2021-2022, obteniéndose una tasa de 157,97 por 100.000 habitantes para cáncer gástrico y 201,9 por 100.000 para cáncer de colon y recto. En 2015 se identificó como zonas de alto riesgo para cáncer digestivo los municipios de Norte y Gutiérrez (San Mateo, Socotá, Tópaga y Tutazá), de la Provincia Centro, Oicatá y Viracachá, y en Tununguá, municipios además relacionados con una mayor longevidad de sus habitantes (53). Caicedo midió su prevalencia entre 2008 y 2013, producto de un proyecto de investigación de la Uptc, identificando que Boyacá superó la tasa global reportada en Colombia en periodos previos, enfocándose en que la mayor magnitud y presencia de factores modificables se encuentran en las Provincias Centro, Valderrama, Márquez, La Libertad, Norte, Tundama y Sugamuxi (54).

Los resultados preliminares del proyecto “Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer”, financiado por Minciencias y ejecutado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la Universidad de los Andes y la Secretaría de Salud de Boyacá, durante el periodo 2021-2023, muestran que el cáncer gástrico tiene una alta incidencia y mortalidad en Boyacá, con una distribución geográfica heterogénea que coincide con zonas de mayor longevidad. Los niveles de SPD encontrados en el agua potable también varían según los municipios, siendo más altos en aquellos con las fuentes más afectadas. Para dirigir la hipótesis de estudio del presente libro se tomó en cuenta los hallazgos de Borda (55), quien encontró que los valores promedio y máximos de los trihalometanos permitidos medidos en el agua potable de una planta regional ubicada en el departamento de Cundinamarca, Colombia, fueron cloro residual con un valor promedio de 0.8 (mg/L) y un valor máximo de 2.5 (mg/L) y los trihalometanos THM en promedio 0.05 (mg/L), máximo de 0.2 (mg/L) y los AHA, promedio de 0.03 (mg/L) y máximo de 0.1(mg/L); algo similar a los obtenidos por Vallejo en el eje cafetero (56), que determinaron los niveles de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida con cromatografía de gases en Pereira, Colombia. El estudio de Arias-Sosa y Cuspoca (53) estimó las tasas de incidencia y mortalidad a nivel municipal en Boyacá, entre 2010 y 2015, y mostró la relación con factores geográficos y demográficos. El estudio de Barreto *et al.* (51), estimó la carga de enfermedad por cáncer gástrico en Boyacá entre 2010 y 2018, usando los años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) como indicador. Con los resultados obtenidos de los 4 estudios anteriores y con base en niveles tóxicos referidos (55), se llevó a cabo un análisis estadístico que revela que existe una asociación positiva entre la exposición a SPD y el riesgo de cáncer gástrico, siendo más fuerte para los THM que para los AHA. El riesgo relativo (RR) estimado para los THM es de 1.5 (IC 95 %: 1.2-1.9), mientras que para los AHA es de 1.2 (IC 95 %: 0.9-1.6). El riesgo relativo se calculó de acuerdo con Llorca (citado en el capítulo 1, referencia 46), por lo que la fracción atribuible al cáncer fue calculada para los trihalometanos con un valor del 30 %; lo que significa que el 30 % de los casos de cáncer gástrico podrían atribuirse a la exposición a este SPD en Boyacá. Con los

valores obtenidos en este proyecto, Minciencias, liderado por el convenio Uptc, UniAndes y la Secretaría de Salud con código SGI 3290 de la Uptc, se desarrolló un modelo de regresión lineal, identificándose que existe una relación entre una mayor concentración de los subproductos de desinfección, dato total obtenido de la tabla: “Características y concentración total de SPD de los sistemas muestreados, de acuerdo con la población urbana proyectada para el año 2022”. El modelo se construyó con las tasas de 2021 para cáncer gástrico de los 15 municipios, identificándose su asociación estadística con una significancia de p de 0,024 (58), sin un ajuste a otros factores de riesgo modificables, lo cual demuestra la importancia de estudiar al cáncer digestivo como un problema de salud pública en Boyacá, y que los SPD presentes en el agua potable podrían ser un factor contribuyente a su etiología.

Desafíos y perspectivas

Se recomienda implementar medidas de control y vigilancia de la calidad del agua potable, así como promover hábitos de prevención y detección temprana del cáncer gástrico y de colon en la población. Asimismo, se sugiere llevar a cabo estudios más amplios y con diseños más robustos que clasifiquen mejor la carga atribuible. Con respecto al cáncer de colon, la asociación puede ser similar, pero se requiere mejorar la atribución, ajustando las cargas de edad y peso para la enfermedad y las de otros determinantes sociales y biológicos, algunos relacionados con la dieta y la cultura, de probable mayor contribución epidemiológica. No existe evidencia actual de estudios de cohortes o casos y controles sobre esta enfermedad en Boyacá. Esta oportunidad de contar con datos de mediciones primarias de un agente etiológico, químico y carcinógeno, como lo son casi la totalidad de los subproductos de desinfección (SPD) en el agua de consumo, nos plantea el reto de seguir buscando evidencia significativa para el control de estas patologías. Por lo tanto, al ser estos modificables por las regulaciones locales, nacionales e internacionales, se podría disminuir la carga atribuible del cáncer digestivo a los años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) a nivel nacional. Además, reducir un factor de exposición puede disminuir los costos sanitarios y el impacto familiar de este problema de salud.

Referencias

1. Kumar V, Abbas AK, Aster, JC. Robbins y Cotran. Patología estructural y funcional (10ª ed.). 2021. Elsevier.
2. Sadler TW. Langman, Embriología Médica (15ª ed.). 2021. Wolters Kluwer.
3. Lu W, Zheng F, Li Z, Zhou R, Deng L, Xiao W, Chen W, Zhao R, Chen Y, Tan Y, Li Z, Liu L, Tan D, Liu N. Association Between Environmental and Socioeconomic Risk Factors and Hepatocellular Carcinoma: A Meta-Analysis. *Front Public Health*. 2022 Feb 18; 10:741490. doi: 10.3389/fpubh.2022.741490. PMID: 35252078; PMCID: PMC8893961.
4. Grigor'eva IN. [Pancreatic cancer risk: alcoholic and non-alcoholic beverages]. *Ter Arkh*. 2022 Feb 15; 94(2):265-270. Russian. doi: 10.26442/00403660.2022.02.201375. PMID: 36286749.
5. Lee YC, Chiang TH, Chou CK, Tu YK, Liao WC, Wu MS, Graham DY. Association Between Helicobacter pylori Eradication and Gastric Cancer Incidence: A Systematic Review and Meta-analysis. *Gastroenterology*. 2016 May;150(5):1113-1124.e5. doi: 10.1053/j.gastro.2016.01.028. Epub 2016 Feb 2. PMID: 26836587.
6. Ghasemi-Kebria F, Semnani S, Fazel A, Etemadi A, Amiriani T, Naeimi-Tabiei M, Hasanpour-Heidari S, Salamat F, Jafari-Delouie N, Sedaghat S, Sadeghzadeh H, Akbari M, Mehrjerdian M, Weiderpass E, Roshandel G, Bray F, Malekzadeh R. Esophageal and gastric cancer incidence trends in Golestan, Iran: An age-period-cohort analysis 2004 to 2018. *Int J Cancer*. 2023 Jul 1;153(1):73-82. doi: 10.1002/ijc.34518. Epub 2023 Mar 25. PMID: 36943026.
7. Di Ciaula A. Asbestos ingestion and gastrointestinal cancer: a possible underestimated hazard. *Expert Rev Gastroenterol Hepatol*. 2017 May;11(5):419-425. doi: 10.1080/17474124.2017.1300528. Epub 2017 Mar 6. PMID: 28276807.
8. Villanueva CM, Espinosa A, Gracia-Lavedan E, Vlaanderen J, Vermeulen R, Molina AJ, Amiano P, Gómez-Acebo I, Castaño-Vinyals G,

Vineis P, Kogevinas M. Exposure to widespread drinking water chemicals, blood inflammation markers, and colorectal cancer. *Environ Int.* 2021 Dec;157:106873. doi: 10.1016/j.envint.2021.106873. Epub 2021 Sep 17. PMID: 34543938.

9. Helte E, Säve-Söderbergh M, Larsson SC, Martling A, Åkesson A. Disinfection by-products in drinking water and risk of colorectal cancer: a population-based cohort study. *J Natl Cancer Inst.* 2023 Aug 8:djad145. doi: 10.1093/jnci/djad145. Epub ahead of print. PMID: 37551954.

10. Nagaraja V, Eslick GD. Systematic review with meta-analysis: the relationship between chronic *Salmonella typhi* carrier status and gall-bladder cancer. *Aliment Pharmacol Ther.* 2014 Apr;39(8):745-50. doi: 10.1111/apt.12655. Epub 2014 Feb 20. PMID: 24612190.

11. Así Vamos en Salud. (s.f.). Estadísticas de mortalidad en Cáncer gástrico [gráfica]. Así Vamos en Salud: seguimiento al sector salud en Colombia.

12. Ministerio de Salud y Protección Social. Plan decenal para el control del cáncer en Colombia 2012-2021 [documento PDF]. 2012. Ministerio de Salud y Protección Social.

13. Emura F, Oda I. Diagnóstico y tratamiento endoscópico del cáncer gástrico estado 0: ¿Qué hacer para que aumente más? 2009. *Revista Colombiana de Gastroenterología*, 24(4), 333-335

14. Tang YH, Ren LL, Mao T. Update on diagnosis and treatment of early signet-ring cell gastric carcinoma: A literature review. *World J Gastrointest Endosc.* 2023 Apr 16;15(4):240-247. doi: 10.4253/wjge.v15.i4.240. PMID: 37138936; PMCID: PMC10150283.

15. Li X, Pasche B, Zhang W, Chen K. Association of MUC16 Mutation with Tumor Mutation Load and Outcomes in Patients With Gastric Cancer. *JAMA Oncol.* 2018 Dec 1;4(12):1691-1698. doi: 10.1001/jamaoncol.2018.2805. PMID: 30098163; PMCID: PMC6440715.

16. Arias SL, Bernal B, Cuspoca A. Supresión tumoral por microARN en el cáncer gástrico. *Gac Mex Oncol.* 2016; 15 (4): 222-230.

17. Msibi SS, Su LJ, Chen CY, Chang CP, Chen CJ, Wu KY, Chiang SY. Impacts of Agricultural Pesticide Contamination: An Integrated Risk Assessment of Rural Communities of Eswatini. *Toxics*. 2023 Sep 10;11(9):770. doi: 10.3390/toxics11090770. PMID: 37755780; PMCID: PMC10534646.

18. Ghasemi-Kebria F, Semnani S, Fazel A, Etemadi A, Amiriani T, Naeimi-Tabiei M, Hasanpour-Heidari S, Salamat F, Jafari-Delouie N, Sedaghat S, Sadeghzadeh H, Akbari M, Mehrjerdian M, Weiderpass E, Roshandel G, Bray F, Malekzadeh R. Esophageal and gastric cancer incidence trends in Golestan, Iran: An age-period-cohort analysis 2004 to 2018. *Int J Cancer*. 2023 Jul 1;153(1):73-82. doi: 10.1002/ijc.34518. Epub 2023 Mar 25. PMID: 36943026.

19. Salazar-García L, Pérez-Sayáns M, García-García A, Carracedo Á, Cruz R, Lozano A, Sobrino B, Barros F. Whole exome sequencing approach to analysis of the origin of cancer stem cells in patients with head and neck squamous cell carcinoma. *J Oral Pathol Med*. 2018 Nov;47(10):938-944. doi: 10.1111/jop.12771. Epub 2018 Aug 16. PMID: 30067878.

20. Oliveros R, Pinilla RE. Facundo Navia Helena, Sánchez Pedraza Ricardo. Cáncer gástrico: una enfermedad prevenible. Estrategias para intervención en la historia natural. *Rev Col Gastroenterol [Internet]*. 2019 June [cited 2023 Sep 25]; 34(2): 177-189.

21. Tafesse N, Porcelli M, Robele-Gari S, Ambelu A. Drinking Water Source, Chlorinated Water, and Colorectal Cancer: A Matched Case-Control Study in Ethiopia. *Environ Health Insights*. 2022 Jan 6;16:11786302211064432. doi: 10.1177/11786302211064432. PMID: 35023924; PMCID: PMC8743978.

22. Helte E, Säve-Söderbergh M, Larsson SC, Martling A, Åkesson A. Disinfection by-products in drinking water and risk of colorectal cancer: a population-based cohort study. *J Natl Cancer Inst*. 2023 Dec 6;115(12):1597-1604. doi: 10.1093/jnci/djad145. PMID: 37551954; PMCID: PMC10699800.

23. Huang HY, Zhu SL, Zhou TH, Li ZF, Liu CC, Wang H, Yan SP, Song SM, Zou SM, Zhang YM, Li N, Zhu L, Liao XZ, Shi JF, Dai M. [Natural history of colorectal cancer: A Meta-analysis on global prospective cohort

studies]. *Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi*. 2019 Jul 10;40(7):821-831. Chinese. doi: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2019.07.017. PMID: 31357806.

24. Kotilea K, Bontems P, Touati E. Epidemiology, Diagnosis and Risk Factors of *Helicobacter pylori* Infection. *Adv Exp Med Biol*. 2019; 1149:17-33. doi: 10.1007/5584_2019_357. PMID: 31016621.

25. Imounga LM, Plenet J, Belliardo S, Chine EC, Louvel D, Cenciu B, Couppié P, Alsibai KD, Nacher M. Gastric Cancer Incidence and Mortality in French Guiana: South American or French? *J Gastrointest Cancer*. 2022 Mar; 53(1): 204-210. doi: 10.1007/s12029-020-00572-z. Epub 2021 Jan 7. PMID: 33411259.

26. Ferro A, Morais S, Pelucchi C, Aragonés N, Kogevinas M, López-Carrillo L, Malekzadeh R, Tsugane S, Hamada GS, Hidaka A, Hernández-Ramírez RU, López-Cervantes M, Zaridze D, Maximovitch D, Pourfarzi F, Zhang ZF, Yu GP, Pakseresht M, Ye W, Plymoth A, Leja M, Gasenko E, Derakhshan MH, Negri E, La Vecchia C, Peleteiro B, Lunet N. Smoking and *Helicobacter pylori* infection: an individual participant pooled analysis (Stomach Cancer Pooling- StoP Project). *Eur J Cancer Prev*. 2019 Sep; 28(5):390-396. doi: 10.1097/CEJ.0000000000000471. PMID: 30272597.

27. Öztekin M, Yılmaz B, Ağagündüz D, Capasso R. Overview of *Helicobacter pylori* Infection: Clinical Features, Treatment, and Nutritional Aspects. *Diseases*. 2021 Sep 23; 9(4):66. doi: 10.3390/diseases9040066. PMID: 34698140; PMCID: PMC8544542.

28. Quaglia NC, Dambrosio A. *Helicobacter pylori*: A foodborne pathogen? *World J Gastroenterol*. 2018 Aug 21; 24(31):3472-3487. doi: 10.3748/wjg.v24.i31.3472. PMID: 30131654; PMCID: PMC6102504.

29. Ojima H, Kuraoka S, Okanoué S, Okada H, Gotoh K, Matsushita O, Watanabe A, Yokota K. Effects of *Helicobacter pylori* and Nitrate-Reducing Bacteria Coculture on Cells. *Microorganisms*. 2022 Dec 16; 10(12):2495. doi: 10.3390/microorganisms10122495. PMID: 36557748; PMCID: PMC9785519.

30. Said-Abasse K, Essien EE, Abbas M, Yu X, Xie W, Sun J, Akter L, Cote A. Association between Dietary Nitrate, Nitrite Intake, and Site-

Specific Cancer Risk: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*. 2022 Feb 4;14(3):666. doi: 10.3390/nu14030666. PMID: 35277025; PMCID: PMC8838348.

31. Essien EE, Said Abasse K, Côté A, Mohamed KS, Baig MMFA, Habib M, Naveed M, Yu X, Xie W, Jinfang S, Abbas M. Drinking-water nitrate and cancer risk: A systematic review and meta-analysis. *Arch Environ Occup Health*. 2022; 77(1):51-67. doi: 10.1080/19338244.2020.1842313. Epub 2020 Nov 3. PMID: 33138742.

32. Picetti R, Deeney M, Pastorino S, Miller MR, Shah A, Leon DA, Dangour AD, Green R. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environ Res*. 2022 Jul; 210:112988. doi: 10.1016/j.envres.2022.112988. Epub 2022 Feb 22. PMID: 35217009.

33. Hao RT, Qian L, Ye BX, Zhang L. [Study of association between drinking water and gastric cancer of the residents in Sheyang county Jiangsu Province: a case-control study]. *Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi*. 2020 Aug 6;54(8):892-896. Chinese. doi: 10.3760/cma.j.cn112150-20200408-00529. PMID: 32842320.

34. Taneja P, Labhasetwar P, Nagarnaik P, Ensink JHJ. The risk of cancer as a result of elevated levels of nitrate in drinking water and vegetables in Central India. *J Water Health*. 2017 Aug;15(4):602-614. doi: 10.2166/wh.2017.283. PMID: 28771157.

35. Taneja P, Labhasetwar P, Nagarnaik P. Nitrate in drinking water and vegetables: intake and risk assessment in rural and urban areas of Nagpur and Bhandara districts of India. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2019 Jan;26(3):2026-2037. doi: 10.1007/s11356-017-9195-y. Epub 2017 Jun 6. PMID: 28589276.

36. Villanueva CM, Kogevinas M, Grimalt JO. Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga [Chlorination of drinking water in Spain and bladder cancer]. *Gac Sanit*. 2001 Jan-Feb; 15(1):48-53. Spanish. doi: 10.1016/s0213-9111(01)71517-8. PMID: 11333625.

37. Villanueva CM, Kogevinas M, Cordier S, Templeton MR, Vermeulen R, Nuckols JR, Nieuwenhuijsen MJ, Levallois P. Assessing exposure and health

consequences of chemicals in drinking water: current state of knowledge and research needs. *Environ Health Perspect.* 2014 Mar; 122(3):213-21. doi: 10.1289/ehp.1206229. Epub 2014 Jan 3. PMID: 24380896; PMCID: PMC3948022.

38. Zhang SH, Guo AJ, Wei N, Zhang R, Niu YJ. Associations of urinary dichloroacetic acid and trichloroacetic acid exposure with platelet indices: Exploring the mediating role of blood pressure in the general population. *J Hazard Mater.* 2021 Jan 15; 402:123452. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123452. Epub 2020 Jul 12. PMID: 32688193.

39. Ghaffari HR, Nasser S, Yunesian M, Nabizadeh R, Pourfarzi F, Poustchi H, Sadjadi A, Fattahi MR, Safarpour AR. Monitoring and exposure assessment of nitrate intake via fruits and vegetables in high and low risk areas for gastric cancer. *J Environ Health Sci Eng.* 2019 Mar 22; 17(1):445-456. doi: 10.1007/s40201-019-00363-0. PMID: 31297219; PMCID: PMC6582015.

40. Beane-Freeman LE, Kogevinas M, Cantor KP, Villanueva CM, Prokunina-Olsson L, Florez-Vargas O, Figueroa JD, Ward MH, Koutros S, Baris D, Garcia-Closas M, Schwenn M, Johnson A, Serra C, Tardon A, Garcia-Closas R, Carrato A, Malats N, Karagas MR, Rothman N, Silverman DT. Disinfection By-Products in Drinking Water and Bladder Cancer: Evaluation of Risk Modification by Common Genetic Polymorphisms in Two Case-Control Studies. *Environ Health Perspect.* 2022 May; 130(5):57006. doi: 10.1289/EHP9895. Epub 2022 May 10. PMID: 35536285; PMCID: PMC9088962.

41. Salas LA, Bustamante M, González JR, Gracia-Lavedan E, Moreno V, Kogevinas M, Villanueva CM. DNA methylation levels and long-term trihalomethane exposure in drinking water: an epigenome-wide association study. *Epigenetics.* 2015;10(7):650-61. doi: 10.1080/15592294.2015.1057672. PMID: 26039576; PMCID: PMC4622514.

42. Villanueva CM, Cantor KP, Grimalt JO, Malats N, Silverman D, Tardon A, Garcia-Closas R, Serra C, Carrato A, Castaño-Vinyals G, Marcos R, Rothman N, Real FX, Dosemeci M, Kogevinas M. Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing,

showering, and swimming in pools. *Am J Epidemiol.* 2007 Jan 15; 165(2):148-56. doi: 10.1093/aje/kwj364. Epub 2006 Nov 1. PMID: 17079692.

43. Pavanello S, Moretto A, La Vecchia C, Alicandro G. Non-sugar sweeteners and cancer: Toxicological and epidemiological evidence. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2023 Mar; 139:105369. doi: 10.1016/j.yrtph.2023.105369. Epub 2023 Mar 3. PMID: 36870410.

44. Chang CC, Ho SC, Wang LY, Yang CY. Bladder cancer in Taiwan: relationship to trihalomethane concentrations present in drinking-water supplies. *J Toxicol Environ Health A.* 2007 Oct;70(20):1752-7. doi: 10.1080/15287390701459031. PMID: 17885932.

45. Quist AJL, Inoue-Choi M, Weyer PJ, Anderson KE, Cantor KP, Krasner S, Freeman LEB, Ward MH, Jones RR. Ingested nitrate and nitrite, disinfection by-products, and pancreatic cancer risk in postmenopausal women. *Int J Cancer.* 2018 Jan 15; 142(2):251-261. doi: 10.1002/ijc.31055. Epub 2017 Oct 25. PMID: 28921575; PMCID: PMC5788281.

46. Spence AA, Linton AL, Patel AR. The influence of renal function of chloroform and halothane anaesthesia in man. *Br J Anaesth.* 1967 Oct; 39(10):789-93. doi: 10.1093/bja/39.10.789. PMID: 6073466.

47. Marsà A, Cortés C, Hernández A, Marcos R. Hazard assessment of three haloacetic acids, as byproducts of water disinfection, in human urothelial cells. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2018 May 15; 347:70-78. doi: 10.1016/j.taap.2018.04.004. Epub 2018 Apr 7. PMID: 29634955.

48. Lebaron K, Mechiri L, Richard S, Austruy A, Boudenne JL, Coupé S. Assessment of individual and mixed toxicity of bromoform, tribromoacetic acid and 2,4,6 tribromophenol, on the embryo-larval development of *Paracentrotus lividus* sea urchin. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019 Jul; 26(20):20573-20580. doi: 10.1007/s11356-019-05279-8. Epub 2019 May 18. PMID: 31104232.

49. Mora-Alvarado DA, Chamizo-García H, Mata-Solano A. Cáncer gástrico en Costa Rica: ¿existe o no relación con la cloración del agua para consumo humano? *Rev. costarric. salud pública [Internet].* 2007 July [cited

2023 Sep 27]; 16(30): 62-73. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-14292007000100009&lng=en

50. Triana JJ, Aristizábal-Mayor JD, Plata MC, Medina M, Baquero L, Gil-Tamayo S. Carga de enfermedad en años de vida ajustados por discapacidad del cáncer gástrico en Colombia. *Rev. Col Gastroenterol* [Internet]. 2017. 32(4): 326-331.

51. Barreto-Noratto C, Limas-Solano L, Porras-Ramírez A, Rico-Mendoza A. Carga de enfermedad de cáncer gástrico durante los años 2010 y 2019 en Tunja, Boyacá, Colombia. 2023. *Revista Colombiana de Gastroenterología* 38, no. 1: 12-18.

52. Pardo C, Cendales R. Incidencia, mortalidad y prevalencia de cáncer en Colombia 2007-2011. 2015. [Internet]. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Cancerología.

53. Arias-Sosa LA, Cuspoca-Orduz AF. Incidencia y mortalidad del cáncer gástrico en el departamento de Boyacá-Colombia. 2018. *Acta Gastroenterológica Latinoamericana* [Internet]. 48(2):121-128.

54. Caicedo A, Triana AN, Niño C, Medina F, Reyes K. Caracterización sociodemográfica y clínica de pacientes diagnosticados con cáncer gástrico en el departamento de Boyacá (Colombia), 2008-2013. 2015. *Rev.salud.hist. sanid.on-line*; 10(3):45-61 (sep-dic).

55. Borda O, Guerrero A, Moreno A, Ayala L. Caracterización de los niveles de trihalometanos (THMs) en muestras de agua potable, provenientes de la planta regional ubicada en el municipio de Cogua - Zipaquirá, Colombia: un estudio de las causas y efectos. 2020. Tesis de pregrado. Universidad La Gran Colombia.

56. Vallejo-Vargas OI, Beltrán L, Franco P, Montoya-Navarrete CH, Alzate-Rodríguez EJ, Reyes H. Determinación de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases en Pereira, Colombia. 2015. *Revista Colombiana de Química*, 44(1), 23-29. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n1.54041>.

57. Chung JY, Yu SD, Hong YS. Environmental source of arsenic exposure. *J Prev Med Public Health*. 2014 Sep; 47(5):253-7. doi: 10.3961/jpmph.14.036. Epub 2014 Sep 11. PMID: 25284196; PMCID: PMC4186553.

58. Bernal B, Rodríguez M, Lemus M, Salas LF. Digestive cancer risk and disinfection by products exposure in drinking water in Boyacá, Colombia. 2023. En proceso de publicación.

Calidad del agua de consumo, subproductos de desinfección
y riesgo de cáncer digestivo en Boyacá

Anexo 1.

Valores promedio anual (VPN) en $\mu\text{g/L}$ para los SPD medidos en los 15 municipios de estudio

Habitantes	80.001 - 150.000			20.001 - 80.000			2.501 - 10.000					<=2.500			Ref. L/2	Max	Min
	Tunja	Sogamoso	Duitama	Chiquinquirá	Puerto Boyacá	Guateque	Soatá	Nobsa	Miraflores	Socha	Ráquira	Sutamarchán	El Cocuy	Labranza-grande			
CF	4,26	5,90	12,72	8,66	3,96	3,96	3,96	17,76	3,96	8,99	8,06	12,76	3,96	3,96	4,75	3,96	3,96
BDCM	4,02	4,02	4,11	4,02	4,02	4,02	4,02	6,64	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02
CDBM	4,02	4,02	4,13	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02	4,02
BF	4,10	4,10	4,16	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10	4,10
SPDe																	
TCA	0,39	0,24	0,29	0,38	0,12	0,25	0,26	0,37	0,23	0,12	0,24	0,31	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
DCA	1,52	2,35	1,58	3,45	0,52	1,33	1,02	5,52	0,85	0,89	1,09	1,32	0,78	0,16	0,50	0,12	5,52
11DCP	1,00	1,44	0,92	3,47	0,14	1,86	0,69	2,07	0,65	0,82	0,99	0,87	0,34	0,15	0,63	0,13	3,47
CPK	0,31	0,26	0,49	0,28	0,13	0,56	0,42	0,77	0,60	0,48	0,16	0,19	0,13	0,22	0,13	0,13	0,13
BCA	0,88	0,88	0,88	1,29	0,88	0,88	0,88	2,16	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
11ITCP	1,80	1,53	1,64	4,07	0,14	2,42	0,84	3,44	0,99	1,64	1,24	1,31	0,40	0,16	0,85	0,12	4,07
AHA																	
MCAA	0,62	0,62	0,71	0,62	0,62	1,94	0,62	1,01	0,81	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	1,94
MBAA	0,71	0,69	0,66	0,89	0,62	1,39	0,62	0,72	0,62	0,62	0,77	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	1,39
DCAA	10,69	13,16	15,18	24,73	2,64	27,19	7,58	28,49	10,50	19,83	13,59	14,30	2,50	1,44	6,06	0,62	28,49
TCAA	8,66	12,25	15,00	17,31	2,76	10,04	6,69	27,90	7,33	16,27	10,46	14,70	3,19	1,02	4,70	0,62	27,90
BCAA	0,62	0,62	0,62	0,63	0,62	0,62	0,62	2,41	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	2,41
DBAA	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,85	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,85
BD-CAA	0,88	2,04	0,86	1,51	0,89	0,93	0,62	3,83	1,02	0,62	0,95	1,10	1,05	0,62	0,62	0,62	3,83
CD-BAA	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,89	0,62	0,62	0,62	0,77	0,62	0,62	0,62	0,62	0,89
TBAA	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62

Nota: Cuadros en azul, indican valores iguales al de referencia del límite de detección sobre dos. Cuadros en rosa, indican los valores máximos de VPN entre los 15 municipios de estudio.

El acceso al agua es un derecho humano, y tenemos la responsabilidad de preservarla y no contaminarla. La ingeniería moderna ha mejorado la calidad del agua para consumo humano, pero persisten factores ecosistémicos imperceptibles que pueden ser potencialmente dañinos que la contaminan, procedentes de las prácticas agrícolas, mineras e industriales, incluyendo también procesos de desinfección con químicos, que producen subproductos de riesgo para la salud en general y, particularmente, causantes de cáncer. Se aborda el tema del riesgo de cáncer digestivo con relación a la calidad del agua en Boyacá del proyecto de investigación Análisis de riesgo por exposición de la población boyacense a subproductos de desinfección presentes en el agua potable y la fracción atribuible al cáncer, financiado por Minciencias, Convocatoria 896.

