
Salud ambiental

Una propuesta para el cuidado de la casa común

Luis Camilo Blanco Becerra
EDITOR ACADÉMICO



Salud ambiental

Una propuesta para el
cuidado de la casa común

Salud ambiental

Una propuesta para el
cuidado de la casa común

Luis Camilo Blanco Becerra

EDITOR ACADÉMICO



González Gil, Fray Eduardo O. P.

Salud ambiental: Una propuesta para el cuidado de la casa común/ Fray Eduardo González Gil O. P. [y otros veinticuatro autores]; editor académico, Luis Camilo Blanco Becerra, Primera edición, Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2023.

134 páginas; fotografías a color, gráficos, ilustraciones, mapas y tablas.

Incluye referencias bibliográficas e índice temático y de autores.

ISBN: 978-958-782-635-7

E-ISBN: 978-958-782-636-4

1. Salud Ambiental 2. COVID-19-Pandemia 3. Contaminación del aire 4. Calidad el aire 5. Aerosoles bibliológicos -- Aspectos Ambientales 6. Contaminación -- Ambiental I. Universidad Santo Tomás (Colombia).

CDD 613.1

CO-BoUST



© Luis Camilo Blanco Becerra, editor académico, 2023

© Fray Eduardo González Gil O. P., Luis Camilo Blanco Becerra, Edwin Leonardo Gutiérrez Alfonso, Karen Johana Rivera Sánchez, Katherine Natalia Aguirre Guataqui, Paola Andrea Suárez Ramírez, Rafael Gabriel Barragán González, Giovanni Antonio Rodríguez Leguizamón, Claudia Marcela Parra Giraldo, Erika Alejandra Noguera López, Diana Julieth Salguero Guerrero, Ana María Mosquera Monguí, Yuritza Alejandra Garavito Gamboa, Carolina Guzmán Luna, María Fernanda Torres Herrera, Andrea Estefanía Silva Atuesta, Nidia Isabel Molina Gómez, Miguel Ángel Díaz Salas, Andrés Felipe Martínez Urrego, Ángela María Jaramillo Londoño, Johan Alexander Álvarez Berrio, Angie Lorena Bernal Bernal, María Paula Díaz Zúñiga, Juan Sebastián Hernández Gamboa, Andrés Felipe Ballesteros Rodríguez, autores, 2023

© Universidad Santo Tomás, 2023

Ediciones USTA

Carrera 9 n.º 51-11

Bogotá, D. C., Colombia

Teléfono: (+571) 587 8797 ext. 2991

editorial@usta.edu.co

<http://www.ediciones.usta.edu.co>

Corrección de estilo: John Fredy Güechá

Diagramación y montaje de portada: Myriam Enciso F.

Hecho el depósito que establece la ley

ISBN: 978-958-782-635-7

E-ISBN: 978-958-782-636-4

Primera edición, septiembre de 2023

Esta obra tiene una versión de acceso abierto disponible en el Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás: <https://doi.org/10.15332/li.lib.2022.00362>

Universidad Santo Tomás

Vigilada MinEducación

Reconocimiento personería jurídica: Resolución 3645 del 6 de agosto de 1965,

MinJusticia Acreditación Institucional de Alta Calidad Multicampus: Resolución

014525 del 28 de julio de 2022, 8 años, MinEducación

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin la autorización previa por escrito del titular de los derechos.

Contenido

INTRODUCCIÓN	13
Referencias	16
PARTE I. EL AIRE QUE NOS DA ALIENTO	19
Referencias	20
Investigación en bioaerosoles	22
Estimación del riesgo por la presencia de bioaerosoles en el aire del área de urgencia de un hospital privado de Bogotá Karen Johana Rivera Sánchez, Paola Andrea Suárez Ramírez, Katherine Natalia Aguirre Guataqui, Rafael Gabriel Barragán González, Johan Alexander Álvarez Berrio, Giovanni Antonio Rodríguez Leguizamón, Claudia Marcela Parra Giraldo, Luis Camilo Blanco Becerra	22
Caracterización de bioaerosoles en ambientes intramurales y extramurales ubicados en la calle 51 con carrera 13 de Bogotá Erika Alejandra Noguera López, Diana Julieth Salguero Guerrero, Ana María Mosquera Monguí, Yuritza Alejandra Garavito Gamboa, Claudia Marcela Parra Giraldo, Carolina Guzmán Luna, Luis Camilo Blanco Becerra	46
Investigación en contaminantes químicos	65
Medición del riesgo a la salud por cadmio y plomo en material particulado en un municipio industrial de Boyacá, Colombia María Fernanda Torres Herrera, Andrea Estefanía Silva Atuesta, Nidia Isabel Molina Gómez, Miguel Ángel Díaz Salas, Johan Alexander Álvarez Berrio, Luis Camilo Blanco Becerra	65
PARTE II. EL AGUA QUE VIVIFICA Y RESTAURA	83
Referencias	85
Investigación en calidad de agua y gestión del riesgo	86
<i>Escherichia coli</i> resistente a ampicilina y meropenem en un vertimiento hospitalario público de Bogotá, Colombia Edwin Leonardo Gutiérrez Alfonso, Luis Camilo Blanco-Becerra	86

Estudios preliminares del riesgo en la elaboración de planes de seguridad del agua: experiencias de aplicación en el sector rural Andrés Felipe Martínez Urrego, Ángela María Jaramillo Londoño, Andrés Felipe Ballesteros Rodríguez, Angie Lorena Bernal Bernal, María Paula Díaz Zúñiga, Juan Sebastián Hernández Gamboa	101
CONCLUSIONES	125
SOBRE LOS AUTORES	127
ÍNDICE TEMÁTICO	133

Lista de figuras

Figura 1. Distribución de los puntos de monitoreo en el área de urgencias	25
Figura 2. Identificación de los microorganismos localizados en 32 puntos de muestreo en el área de urgencias de un hospital privado de Bogotá	31
Figura 3. Ubicación del punto de muestreo externo	47
Figura 4. Frecuencia de bacterias y levaduras identificadas dentro del gimnasio	53
Figura 5. Frecuencia de hongos identificados dentro del gimnasio	55
Figura 6. Frecuencia de bacterias identificadas fuera del gimnasio	56
Figura 7. Frecuencia de hongos identificados fuera del gimnasio	56
Figura 8. Localización de la zona de estudio, con los puntos de muestreo	67
Figura 9. Modelo geoespacial de distribución de PST , Cd , Pb y $\text{PM}_{2.5}$	75
Figura 10. Diagrama de bloques de la planta de tratamiento de agua residual de un hospital público de Bogotá, Colombia	87
Figura 11. Valoración del riesgo general por predios en las zonas evaluadas	115
Figura 12. Valoración del riesgo por ganadería en las zonas evaluadas	116
Figura 13. Valoración del riesgo por agricultura en las zonas evaluadas	117
Figura 14. Valoración del riesgo por disposición final de envases en las zonas evaluadas	119
Figura 15. a) Riesgo por transporte en la quebrada Salitre. b) Riesgo por remoción de cobertura vegetal en la quebrada Salitre	120

Figura 16. a) Riesgo por escorrentía en la quebrada Salitre.	
b) Riesgo por acceso no protegido en la quebrada Salitre	121
Figura 17. a) Riesgo por remoción en masa en la quebrada Grande.	
b) Riesgo por sismos en la quebrada Grande	121

Lista de tablas

Tabla 1. Concentraciones de bacterias y hongos (UFC/m ³) en el área de urgencias	32
Tabla 2. Promedios diarios (UFC/m ³) de bacterias identificadas en el área de urgencias	34
Tabla 3. Promedios diarios (UFC/m ³) de hongos identificados en el área de urgencias	35
Tabla 4. Cálculo del riesgo por la presencia de hongos	38
Tabla 5. Cálculo del riesgo por la presencia de bacterias	39
Tabla 6. Concentración de bioaerosoles bacterianos y fúngicos en horas de la mañana y tarde, dentro del gimnasio	51
Tabla 7. Concentración de bioaerosoles bacterianos y fúngicos en horas de la mañana y tarde, fuera del gimnasio	52
Tabla 8. Bacterias y levaduras identificadas dentro del gimnasio y posibles afecciones en la salud	54
Tabla 9. Bacterias y levaduras identificadas dentro del gimnasio y posibles afecciones en la salud	55
Tabla 10. Bioaerosoles identificados fuera del gimnasio y posibles afecciones en la salud	57
Tabla 11. Concentraciones cada 8 horas y 24 horas de PM _{2.5} de plomo y cadmio en los diferentes puntos de muestreo en el municipio de Nobsa, Boyacá (2018)	72
Tabla 12. Riesgo cancerígeno y no cancerígeno por exposición a plomo y cadmio en Nobsa, Boyacá (2018)	73
Tabla 13. UFC de <i>Escherichia coli</i> /ml en el agua residual no tratada a la entrada de la PTAR de un hospital público de Bogotá, Colombia (2017)	91

Tabla 14. Análisis ANOVA de un factor con variable dependiente las UFC/ml y el factor de la fase del muestreo	92
Tabla 15. Análisis ANOVA de un factor con variable dependiente las UFC y el factor el día del muestreo	92
Tabla 16. UFC de <i>Escherichia coli</i> /ml en el agua residual tratada a la salida de la PTAR de un hospital público de Bogotá, Colombia (2017)	93
Tabla 17. Resultados de las pruebas de susceptibilidad de <i>Escherichia coli</i> a ampicilina y meropenem, en agua residual no tratada y agua tratada de un hospital público de Bogotá, Colombia (2017)	94
Tabla 18. Eventos que están afectando la calidad del agua	105
Tabla 19. Parámetros y métodos de medición seleccionados	106
Tabla 20. Matriz para la evaluación de riesgos	107
Tabla 21. Caracterización o valoración del riesgo en la quebrada Salitre	108
Tabla 22. Tabla de ponderación por proximidad a la bocatoma	108
Tabla 23. Escala de valoración del riesgo y código de colores en la quebrada Grande	109
Tabla 24. Resultados de análisis fisicoquímicos en la quebrada Grande	111
Tabla 25. Resultados de análisis fisicoquímicos en la quebrada Salitre	113

Introducción

La salud ambiental es un campo de la salud pública que engloba los factores ambientales que afectan la salud, identificando y generando medidas de prevención de la enfermedad, que conllevan a la creación de entornos saludables (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2016a). Esta definición se enfoca particularmente en el ser humano; sin embargo, con el paso del tiempo se ha venido ajustando, señalando que el hombre hace parte de los ecosistemas y que, por ende, tiene la misión de administrar y velar por su cuidado. En las últimas décadas, países como Colombia han adoptado esta directriz, siendo prueba de ello lo estipulado en 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, donde se define la salud ambiental como “un componente esencial de la salud pública que promueve la calidad de vida, donde el ser humano debe ser tomado en cuenta como un integrante más de los ecosistemas” (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2008). Sumado a esto, el Papa Francisco en su encíclica *Laudato si’: sobre el cuidado de la casa común*, explora en forma más amplia el papel del hombre dentro de los ecosistemas, resaltando en sus palabras “nuestro propio cuerpo está constituido por los elementos del planeta, su aire es el que nos da aliento y su agua nos vivifica y restaura” (Francisco, 2015). Esta afirmación entra en consonancia con la doctrina de la Orden de

Predicadores que, inspirada en el realismo dominicano y tomista, entiende que el medio ambiente y el ser humano son más que una dualidad, que se relacionan y afectan mutuamente. No somos el centro del mundo, somos una parte de este, por lo que la responsabilidad que nos atañe consiste en cuidar y mejorar el entorno.

Es por ello por lo que, adoptando estas directrices en el campo del conocimiento de la salud ambiental, la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás ha liderado proyectos de investigación enfocados en los recursos agua y aire, aplicando en ellos los conocimientos de los ingenieros tomasinos, en busca del bien común, bajo un enfoque ecosistémico. Es de esta forma que inmersas en las competencias del ingeniero ambiental tomasino se resalta el cuidado por la casa común, que, en términos actuales, le permite desarrollar políticas como el Plan Decenal de Salud Pública 2012-2021 y trabajar en las líneas de intervención de la Política Distrital de Salud Ambiental de Bogotá 2011-2023, que se articulará en sus nuevas vigencias con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

En el mundo, 844 millones de personas carecen de un servicio básico de suministro de agua potable y al menos 2000 millones se abastecen de una fuente de agua potable que está contaminada por heces (OMS, 2022). En Colombia, en 2017 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estableció que el 60 % del agua procedente de las llaves de los hogares colombianos no presentaba condiciones óptimas de potabilización (Centro de Pensamiento Estratégico Internacional [Cepei], 2020). En cuanto al recurso aire, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), nueve de cada diez personas respiran aire contaminado, lo que mata a cerca de 7 millones de personas por año (OMS, 2021), siendo esta una pandemia que aflige a la población desde hace mucho tiempo, pero a la cual no se le ha dado la relevancia merecida. En Colombia, el Observatorio Nacional de Salud del Instituto Nacional de Salud (INS) estableció que 17 579 muertes en el país se derivan de la exposición a aire y agua de mala calidad, es decir, el 8 % del total de la mortalidad anual (INS, 2019). Todo esto conlleva a que las investigaciones realizadas en la Universidad Santo Tomás se direccionen a la identificación de microorganismos en el recurso aire, antecediendo así a la contingencia mundial de covid-19 (2020-2021), que ha puesto en un primer plano la

transmisión de este virus dentro de la corriente de aire que se respira; sumado a esto, se cuantifican las sustancias químicas que hacen posible que los efectos en la población sean de una mayor magnitud, debido a la exposición a los contaminantes del aire (Félix-Arellano, 2020). La interacción entre los determinantes sociales de la salud afecta el bienestar de las personas, razón por la cual si se trabaja sobre el determinante ambiental, se contribuye a la mejora de las condiciones de los ecosistemas, de los cuales se obtienen servicios ecosistémicos. Por todo esto, los resultados de investigación presentes en este libro brindan un aporte individual en el conocimiento científico relacionado con el cuidado de la casa común, enfocado en la visualización de temas como los bioaerosoles, la exposición a sustancias químicas y la calidad del agua, temáticas que han tomado relevancia en los últimos años.

A continuación, se presentan los trabajos desarrollados en el área de investigación en salud ambiental en dos capítulos. En el primero, titulado “El aire que nos da aliento”, se abordan los temas de bioaerosoles y sustancias químicas, mientras que el segundo capítulo, denominado “El agua que nos vivifica y restaura”, versa sobre la resistencia microbiana a antibióticos en el agua y sobre la calidad del agua y la gestión del riesgo. Como resultado de estos ejercicios académicos se ha obtenido la formación de ingenieros ambientales que cumplen con las competencias que demanda la Política Integral de Salud Ambiental, la cual se encuentra en elaboración, y que bajo el diagnóstico del Conpes 3550, dictamina la formación urgente de recurso humano en esta temática. Por otra parte, los hallazgos derivados del proceso investigativo brindan las bases para la generación de nuevo conocimiento en temáticas ambientales que no son comúnmente abordadas y que actualmente y a futuro tendrán una importancia en la sociedad; tal es el caso de la identificación de bioaerosoles y la resistencia microbiana, que actualmente (año 2020-2021) se ven representadas en la pandemia por covid-19 y los esfuerzos mundiales para el control del uso inapropiado de antibióticos, liderado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016b). Finalmente, las experiencias de este libro aportan soluciones a las problemáticas y necesidades de la sociedad actual, de manera ética, creativa y crítica, cumpliendo de esta forma la misión de la Universidad Santo Tomás, inspirada en el pensamiento humanista y cristiano de Santo Tomás de Aquino. Esperamos que estas

experiencias sean del agrado de los lectores y puedan crear en ellos conciencia en cuanto al cuidado de la casa común.

FRAY EDUARDO GONZÁLEZ GIL O. P.

Referencias

- Centro de Pensamiento Estratégico Internacional (Cepei). (2020, 16 diciembre). 352 municipios de Colombia no cuentan con acceso a agua potable de calidad. *Cepei*. <https://cepei.org/novedad/352-municipios-de-colombia-no-cuentan-con-acceso-a-agua-potable-de-calidad/>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2008, 24 de noviembre). *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* (Documento Conpes 3550). DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3550.pdf>
- Félix-Arellano, E. E., Schilman, A., Hurtado-Díaz, M., Texcalac-Sangrador, J. L. y Riojas-Rodríguez, H. (2020). Revisión rápida: contaminación del aire y morbilidad por COVID-19. *Salud Pública de México*, 62(5), 582-589. <https://doi.org/10.21149/11481>
- Francisco. (2015, 24 de mayo). *Carta encíclica Laudato si' del Santo Padre Francisco sobre el cuidado de la casa común*. Tipografía Vaticana. http://www.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html
- Instituto Nacional de Salud (INS). (2019). *Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia. Informe Técnico Especial 10*. Observatorio Nacional de Salud. <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016a). Salud ambiental. Organización Mundial de la Salud. https://www.who.int/health-topics/environmental-health#tab=tab_1
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016b). *Global action plan on antimicrobial resistance*. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241509763>

- Organización Mundial de la Salud (oms). (2021). Cómo la contaminación del aire está destruyendo nuestra salud. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health>
- Organización Mundial de la Salud (oms). (2022). Agua para consumo humano. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

Parte I. El aire que nos da aliento

Diversos países de América Latina y el Caribe se destacan por su diversidad de recursos, su biodiversidad, sus fuentes hídricas y la variedad de pisos térmicos, que dan vida a una multitud de materias primas y de insumos, así como al desarrollo de un sinnúmero de actividades que soportan la economía. En Colombia, el proceso de crecimiento industrial y comercial, además del incremento del parque automotor en grandes centros urbanos, han aumentado las presiones sobre el medio ambiente, agudizando los problemas de calidad del aire y disminuyendo notoriamente la calidad de vida y el bienestar de la población (Álvarez, 2016).

Esta situación ha generado un aumento en los estudios que realizan análisis de la calidad del aire en torno a distintas actividades que pueden tener una influencia directa o indirecta en la generación de problemáticas ambientales y su relación con los principales impactos producidos por la contaminación atmosférica en el país, en especial en las grandes capitales (Green y Sánchez, 2013). Bogotá es un claro ejemplo de ello. En 2002 la ciudad era considerada como la cuarta más contaminada a nivel de América del Sur; posteriormente, en 2011 se ubicó en el puesto siete en cuanto a concentraciones promedio anuales de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y en la medición más reciente (2019) subió dos casillas, ubicándose en el quinto puesto (Ospina-Valencia, 2021).

Esta misma condición ha llevado a que los habitantes de la ciudad se vean afectados en su salud, tanto en la morbilidad como en la mortalidad asociada a la contaminación del aire (Blanco-Becerra, 2014; Rodríguez-Villamizar, 2018).

Aunque se han desarrollado algunas acciones por parte del Estado en busca de fomentar el conocimiento, la conservación y el manejo del recurso, parecen ser poco eficientes para favorecer y promover la calidad de vida y salud de la población, y así materializar el derecho a un ambiente sano, lo que evidencia que esta problemática requiere de atención especial para disminuir los impactos que terminan afectando las condiciones ambientales y la salud de la población.

En este capítulo se abordarán temas como los bioaerosoles y su relación con el componente aire, temática que ha tomado gran relevancia actualmente gracias a la pandemia por covid-19; de igual manera se citará la problemática de calidad del aire en un pequeño municipio de Colombia, escenario que es común en el territorio nacional, pero que no ha sido investigado en función de los riesgos en salud de la población que allí reside.

Referencias

- Álvarez, J. A. (2016). *Modelo para la evaluación de la concentración de plomo, cadmio y cromo contenidos en material particulado respirable en la localidad Los Mártires, Bogotá D.C.* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55935>
- Blanco-Becerra, L. C., Miranda-Soberanis, V., Hernández-Cadena, L., Barraza-Villarreal, A., Juner, W., Hurtado-Díaz, M. y Romieu, I. (2014). Effect of particulate matter less than 10 μm (PM₁₀) on mortality in Bogota, Colombia: a time-series analysis, 1998–2006. *Salud Pública de México*, 56(4), 363-370. <https://doi.org/10.21149/spm.v56i4.7356>
- Green, J. y Sánchez, S. (2013). *La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica*. Clean Air Institute.
- Ospina-Valencia, J. (2021). Las capitales y países de América Latina más contaminados. *Deutsche Welle*. <https://p.dw.com/p/3Icp9>

Rodríguez-Villamizar, L., Rojas-Roa, N., Blanco-Becerra, L., Herrera-Galindo, V. y Fernández-Niño, J. (2018). Short-Term Effects of Air Pollution on Respiratory and Circulatory Morbidity in Colombia 2011–2014: A Multi-City, Time-Series Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8), 1610. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081610>

Investigación en bioaerosoles

Estimación del riesgo por la presencia de bioaerosoles en el aire del área de urgencia de un hospital privado de Bogotá

KAREN JOHANA RIVERA SÁNCHEZ
PAOLA ANDREA SUÁREZ RAMÍREZ
KATHERINE NATALIA AGUIRRE GUATAQUI
RAFAEL GABRIEL BARRAGÁN GONZÁLEZ
JOHAN ALEXANDER ÁLVAREZ BERRIO
GIOVANNI ANTONIO RODRÍGUEZ LEGUIZAMÓN
CLAUDIA MARCELA PARRA GIRALDO
LUIS CAMILO BLANCO BECERRA

Objetivo

Estimar el riesgo por la presencia de bioaerosoles en el aire del área de urgencias de un hospital privado de Bogotá.

Metodología

Se realizó un estudio observacional descriptivo que identificó la presencia de diferentes tipos de bioaerosoles en el área de urgencias de un hospital privado, durante siete días, en el periodo comprendido entre el 27 de octubre y el 5 de diciembre de 2016, en el horario de 9:00 a.m. a 3:00 p.m. Los bioaerosoles son contaminantes ambientales biológicos (hongos, bacterias, virus, polen), que pueden estar relacionados con las enfermedades transmitidas en los hospitales (Burge, 1990; Rui et ál., 2008).

La población expuesta para el estudio fue cualquier persona que se encontrara al interior del área de urgencias, como lo son trabajadores, pacientes y acompañantes, recalcando que el área de urgencias del hospital no brinda atención a población infantil. Para que tenga lugar

la transmisión en el aire, los microorganismos de interés deben entrar en la corriente de aire, lo que puede suceder por medio de una variedad de modos de transmisión; por ejemplo, los microorganismos pueden ser dispersados en el aire como gotas respiratorias/núcleos de condensación cuando una persona infectada tose o estornuda, sin embargo, las vías de exposición están relacionadas con el área en la que se encuentra el paciente, ya que los procedimientos que allí se realicen permitirán o no la exposición a este (Fletcher et ál., 2004). A continuación, se describen las actividades llevadas a cabo para el desarrollo de la presente investigación:

Cálculo de los puntos de muestreo

Para la determinación del número de puntos de muestreo se tuvo en cuenta la aplicación de la norma ISO 14644 (International Organization for Standardization [ISO], 2015), utilizada en ambientes controlados, la cual estipula el número mínimo de puntos de muestreo según el área (m^2) que se pretende monitorear. Se calculó el número de puntos para el área de urgencias, obteniendo un total de 69 puntos; sin embargo, por limitaciones en el tiempo de análisis de muestras, insumos e infraestructura, se redujo a 32 muestras, ajustándose así a los recursos disponibles. Los puntos de muestreo seleccionados se ubicaron en las zonas que podrían llegar a tener un mayor riesgo, por los pacientes que albergan, sumado al flujo de personas que circula por estas zonas (figura 1).

Medios de cultivo seleccionados para los muestreos

Durante el diseño experimental se estableció el uso de dos medios de cultivo, teniendo en cuenta los microorganismos a analizar. Se empleó para el estudio el *Plate Count Agar*, medio de cultivo recomendado para el recuento de poblaciones microbianas como bacterias (Santanbrosio et ál., 2009). Para el aislamiento de hongos y levaduras se utilizó el agar papa dextrosa, medio de cultivo constituido por dextrosa y papa, lo que favorece el crecimiento de microorganismos fúngicos al tener un pH ácido de 5.6 (Francisco Soria Melguizo S.A., 2009).

Identificación del equipo para monitoreo microbiológico y tiempo de monitoreo

Para la toma de muestras se empleó el método de impactación de Andersen, que consiste en aspirar el aire mediante una tapa perforada, utilizando el equipo MAS-100 Eco. Un ventilador radial, controlado por un sensor de flujo, regula con precisión el flujo de aire en tiempo real. El aire aspirado impacta con un medio de crecimiento en una placa de contacto. Dentro de la tapa perforada se encuentra una caja de Petri con el medio de cultivo seleccionado (Merck, 2012). El equipo opera con un caudal constante de 100 litros por minuto, regulándose automáticamente de acuerdo con la presión y la temperatura ambiental. Si la corriente de aire es irregular a causa de factores externos, o bien fuera limitada por cajas de Petri sobrecargadas, la cantidad de aire es automáticamente reajustada (Merck, 2012).

El tiempo de monitoreo fue de tres minutos por cada muestra; para determinar el tiempo de muestreo se utilizaron estudios similares (Bielawska-Drózd et ál., 2018; Stec y Lenart-Boroń, 2019; Wisudawan et ál., 2020), pero al final se estableció el periodo de tres minutos, que facilitó la cuantificación de las unidades formadoras de colonias (UFC) por cada caja.



Figura 1. Distribución de los puntos de monitoreo en el área de urgencias

Fuente: elaboración propia.

Identificación del equipo para monitoreo de variables ambientales

Las variables ambientales de humedad relativa y temperatura fueron medidas con un termohigrómetro, el cual posee dos sensores en forma de espiral: el primero permite medir la humedad relativa, usando un tejido de cloruro de litio que, al aplicar una tensión alterna, genera un equilibrio entre la evaporación por calentamiento del tejido y la absorción de agua de la humedad en el ambiente, gracias a que el cloruro de litio es también un material higroscópico (Musafia, 2011). Sumado a lo anterior, se registraron en un diario de campo las características del día de muestreo, tales como: flujo de personas (asignando un valor de 1 para alto flujo y 0 para bajo), condiciones del tiempo atmosférico, momentos de limpieza y desinfección, entrega de alimentos, entre otros, con el fin de tener una mejor interpretación y análisis de los datos obtenidos.

Procedimientos para la caracterización e identificación de bioaerosoles

Para el almacenamiento, la caracterización y la identificación de los bioaerosoles se utilizaron las instalaciones del laboratorio de proteómica y micosis humana de la Facultad de Ciencias de la Pontificia Universidad Javeriana. Las muestras obtenidas se almacenaron a temperatura y humedad relativa ambiente. Para la identificación se siguieron los siguientes procedimientos:

- Bacterias: se utilizó el equipo Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization-Time of Flight (MALDI-TOF), el cual es utilizado como un método rápido para la identificación de rutina de microorganismos patógenos mediante el perfil de proteínas. La espectrometría de masas permite la identificación de una molécula mediante la medición de su masa con relación a su carga (relación masa/carga), así como la de los fragmentos generados a partir de ella, en donde se obtiene el género y la especie del microorganismo (García et ál., 2012).

- Hongos: su identificación se realizó a partir de las características macroscópicas y microscópicas, siguiendo las clases de identificación.

Método para la cuantificación de colonias

Para las diferentes muestras obtenidas se realizó el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC), distinguiendo morfotipos. A partir de esto, se estableció la concentración de colonias en UFC/m³, aplicando para cada microorganismo la fórmula establecida por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en la Nota Técnica de Prevención (NTP) 299: *Método para el recuento de bacterias y hongos en aire* (Martí, 2004).

$$N^{\circ} \text{ (UFC/ m}^3\text{)} = \frac{Nc \times 1000}{V \times NU}$$

Dónde:

Nc: número de colonias por placa.

V: volumen de muestreo (litros).

NU: número de unidades de tiempo empleadas en el muestreo.

En el presente estudio no se tuvo en cuenta la corrección de Feller, establecida en el manual del equipo MAS-100 Eco, ya que en el recuento de microorganismos se hizo distinción entre bacterias y hongos, y la corrección de Feller aplica solo para el recuento de UFC totales (Organización Mundial de la Salud [OMS], 1988).

Metodología para la evaluación del riesgo

Para el cálculo del riesgo (R) por bioaerosoles se empleó la metodología de evaluación de riesgos para la salud humana (Peña et ál., 2001), la cual utiliza el riesgo, el peligro y la exposición. En el presente trabajo se modificó la estructura propuesta por el autor, teniendo en cuenta las siguientes características y variables:

$$R = IC + F + C + T + HR + V$$

Dónde:

R: riesgo.

IC: importancia clínica.

F: frecuencia de aparición.

C: concentración.

T: temperatura.

HR: humedad relativa.

V: ventilación.

Para la evaluación del riesgo se procedió a realizar la suma correspondiente por microorganismo para cada variable; los puntajes obtenidos se clasificaron teniendo en cuenta los rangos definidos por el documento guía: *Evaluación del riesgo por transmisión de infecciones respiratorias mediada por bioaerosoles presentes en el hospital de Suba (II nivel ESE)* (Guzmán y Pachón, 2016). Se estableció como riesgo alto aquel con un puntaje ≥ 16 , como riesgo medio un valor de $10 \leq X \leq 15$ y riesgo bajo un puntaje de ≤ 9 .

Las variables empleadas en la ecuación se describen a continuación:

- Importancia clínica: la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el *Manual de bioseguridad en el laboratorio*, hace referencia a cuatro grupos de riesgo para los microorganismos infecciosos: grupo de riesgo 1 (riesgo individual, poblacional escaso, o nulo), grupo de riesgo 2 (riesgo individual moderado, riesgo poblacional bajo), grupo de riesgo 3 (riesgo individual elevado, riesgo poblacional bajo) y grupo de riesgo 4 (riesgo individual y poblacional elevado) (OMS, 2005). A esta variable categórica se le otorgó un valor de acuerdo con el riesgo del microorganismo, de 1 a 3, desde el grupo de riesgo 1 hasta el grupo 3. Si el microorganismo está catalogado en el grupo de riesgo 4 se valora con 16 puntos por el simple hecho de ser un microorganismo patógeno que representa un riesgo para la población.
- Frecuencia de aparición: esta variable se define como la cantidad de veces que aparece cada microorganismo en los puntos y días de muestreo. La frecuencia de aparición se obtuvo a partir de las 224 muestras tomadas en el área de urgencias, estableciendo este como el valor más alto. Al evaluar este parámetro se dividió

en tres categorías, donde el 100 % son las 224 muestras. Dentro del cálculo del riesgo se les dio valores de 1 a 3, siendo baja, media o alta su frecuencia de aparición, respectivamente.

- Humedad relativa: haciendo referencia a lo estipulado en la NTP 859, sumado a lo establecido en la norma UNE-100713:2005, se señala que el porcentaje de humedad relativa mínima es de 45 % y el porcentaje máximo es de 55 % (Rosell y Muñoz, 2010). Dentro del cálculo del riesgo se le dio un puntaje de 1 si cumple y de 3 si no cumple.
- Temperatura: en la NTP 859 y de acuerdo con la norma UNE-100713:2005, se establece que la temperatura mínima es de 24 °C y la temperatura máxima de 26 °C (Rosell y Muñoz, 2010). Dentro del cálculo del riesgo se le asignó un puntaje de 1 si cumple y de 3 si no cumple.
- Ventilación: en el caso de la ventilación para la sala de urgencias, se tuvo en cuenta la NTP 859 y la norma UNE-100713:2005, que establece que el caudal mínimo de aire para la sala de urgencias es de 30 m³/(h.m²) (Rosell y Muñoz, 2010). Dentro del cálculo del riesgo se le asignó un puntaje de 1 si cumple y de 3 si no cumple.

Comparación con los valores establecidos por la OMS

La OMS sugiere un límite de 100 UFC/m³ para bacterias y 50 UFC/m³ para hongos (OMS, 1988). Dentro del cálculo del riesgo se le dará un puntaje de 1 si cumple y de 3 si no cumple los valores recomendados.

Implicación clínica de los bioaerosoles identificados

A partir de los microorganismos identificados se realizó una revisión bibliográfica con el fin de determinar si estos eran considerados como patógenos humanos o no y qué enfermedades podrían llegar a transmitir, esto con el fin de correlacionar esta información con la evaluación del riesgo calculada para cada microorganismo, señalando la probabilidad de transmisión de enfermedades.

Aplicación

Los beneficios a la comunidad derivados de los resultados de este estudio ahondan en la disminución del riesgo por la transmisión de enfermedades, debido a que los centros hospitalarios son escenarios donde se presenta la convergencia entre las fuentes de los bioaerosoles y la calidad del aire interior. En este sentido, el ingeniero ambiental aplica sus conocimientos con relación a microbiología, calidad del aire y epidemiología, esenciales dentro de escenarios de salud ambiental, identificando la problemática, para posteriormente brindar alternativas que disminuyan la transmisión de los bioaerosoles en áreas de importancia clínica. Además, teniendo en cuenta que existen otros escenarios de menor riesgo (oficinas, instituciones deportivas, gimnasios, etc), pero no de menor importancia, los procedimientos de identificación pueden ser homologados para estos recintos.

Discusión

Resultados

A partir de los 224 muestreos realizados en el área de urgencias, se obtuvieron quince especies de bacterias grampositivas y catorce gramnegativas, y de hongos, nueve especies filamentosas y cuatro para levaduras (figura 2).

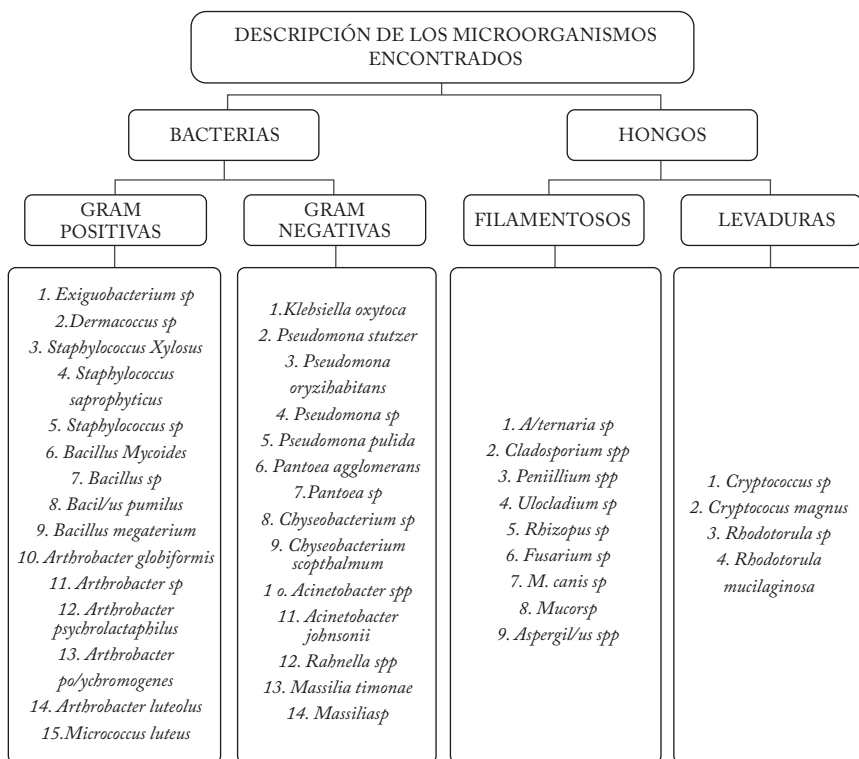


Figura 2. Identificación de los microorganismos localizados en 32 puntos de muestreo en el área de urgencias de un hospital privado de Bogotá

Fuente: elaboración propia.

- Distribución de los microorganismos en el área de urgencias

Para el muestreo en general la tendencia fue de 0 UFC/m³; sin embargo, para los hongos filamentosos se obtuvo el mayor promedio y concentraciones de UFC/m³, siendo estos los que presentaron una variabilidad superior en los datos. Además de esto, el uso de percentiles identificó que las concentraciones más altas se presentaron por encima del percentil 90, indicando asimetría en la distribución de los datos. Para las levaduras se observó que el 25 % de las UFC/m³ encontradas estuvo en el rango de 10 a 264, mientras que para las bacterias grampositivas y gramnegativas se

presentaron menores concentraciones, con rangos de 2 a 138 y de 0 a 208 UFC/m³, respectivamente (tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones de bacterias y hongos (UFC/m³) en el área de urgencias

Microorganismo	Media	Desviación estándar	Máximo	Percentil 75	Percentil 90
Hongos filamentosos	17.8	49.10	496	4	64
Levaduras	8.41	20.68	264	10	22
Bacterias grampositivas	3.85	11.48	138	2	10
Bacterias gramnegativas	1.12	4.96	208	0	4

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los hongos filamentosos, se estableció que las especies de mayor concentración durante los 7 días de monitoreo (en la sala de espera) fueron: *Cladosporium* spp. con 496 UFC/m³ y *Penicillium* spp., siendo este último el de mayor frecuencia. El género *Cladosporium* spp. registró concentraciones entre los 69 a 156 UFC/m³, mientras para el género *Penicillium* spp. el rango estuvo entre los 22 a 56 UFC/m³. Para los hongos *Rhizopus* sp. y *Mycellia sterillia* se evidenció que solo un 10 % de las concentraciones encontradas se localizó entre los 4 y 68 UFC/m³; en los géneros *Ulocladium* sp., *Fusarium* sp., *M. canis* sp., *Alternaria* sp. y *Mucor* sp. solo el 10 % de las concentraciones encontradas se ubicó entre 2 a 24 UFC/m³; finalmente, en menos del 10 % de las muestras se encontraron concentraciones superiores a 8 UFC/m³ para *Aspergillus* spp., siendo el hongo filamentosos con menores concentraciones y menor frecuencia de aparición.

En las levaduras, el género *Rhodotorula* sp. presentó las concentraciones más altas con un máximo de 264 UFC/m³ en el pasillo de las salas de observación, además de tener la media más alta; de igual manera, el 50 % de las concentraciones se ubicaron en el rango de 6 a 26 UFC/m³. Para el género *Cryptococcus* sp. y la especie *Cryptococcus magnus*, el 25 % de las concentraciones encontradas se ubicó entre los 4 a 88 y 8 a 242 UFC/m³, respectivamente, mientras para la especie *Rhodotorulla mucilaginosa* se

obtuvieron concentraciones en menos del 10 % de las muestras, siendo la levadura con menor frecuencia de aparición.

En cuanto al comportamiento de las bacterias grampositivas, la mayor concentración se presentó para *Bacillus pumilus* con un máximo de 138 UFC/m³, además de una mayor variabilidad en las concentraciones en todo el monitoreo, al igual que el mayor promedio con respecto a los otros 12 microorganismos grampositivos. El 50 % de las concentraciones se ubicaron en el rango de 14 a 46 UFC/m³, siendo la bacteria con mayor frecuencia de aparición durante el monitoreo. Los géneros *Dermacoccus*, *Staphylococcus*, *Arthrobacter* y *Arthrobacter psychrolactophilus* presentaron concentraciones superiores a 2 UFC/m³ en un 10 % de las muestras, lo que representó una baja frecuencia de aparición. Ya para los géneros *Exiguobacterium* sp., *Staphylococcus xylosum*, *Staphylococcus saprophyticus*, *Bacillus* sp. y *Arthrobacter luteolus* se encontraron concentraciones en menos del 10 % de las muestras, por lo tanto, fueron las bacterias grampositivas con menor presencia durante el monitoreo.

Para las bacterias gramnegativas se observó una mayor concentración; *Acinetobacter* sp. presentó un máximo de 208 UFC/m³ (entrada a urgencias), sin embargo, la bacteria se encontró en menos del 10 % de las muestras, indicando una baja frecuencia de aparición. Por otra parte, el 25 % de las muestras de *Klebsiella oxytoca*, y de los géneros *Pantoea* spp. y *Massilia* spp. se ubicaron en el rango de 2 a 30 UFC/m³, mostrando bajas concentraciones; mientras que para *Pseudomonas* sp. y *Chryseobacterium* sp. el 10 % de las muestras presentaron concentraciones de 2 hasta 24 UFC/m³. Por último, *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas oryzihabitans*, *Acinetobacter johnsonii*, *Rahnella* sp., *Masillia timonae* y *Chryseobacterium scophthalmum* registraron rangos de 0 hasta 28 UFC/m³, en menos del 10 % de las muestras, indicando una baja frecuencia de aparición.

- Promedios de UFC/m³ para los días de muestreo

Solo 6 especies y 2 géneros de bacterias del total fueron identificadas en los siete días de monitoreo (tabla 2). El día con mayor concentración de UFC/m³ correspondió al día 4 (miércoles), siendo *Bacillus pumillus* el microorganismo con mayor frecuencia de aparición y de mayor concentración.

Además, se evidencio que el género *Dermaococcus* spp. presentó las menores concentraciones en los siete días de muestreo.

Tabla 2. Promedios diarios (UFC/m³) de bacterias identificadas en el área de urgencias

Día de muestra	1	2	3	4	5	6	7
Promedio de bacterias por día de muestreo (UFC/m ³)	83.94	86.63	73.31	96.31	49.63	63.63	30.75
<i>Bacillus pumilus</i>	29.81	52.38	33.19	40.25	14.63	24.25	25.75
<i>Micrococcus luteus</i>	16.88	3.13	13.00	9.94	9.25	6.19	6.88
<i>Arthrobacter globiformis</i>	0.69	12.38	3.25	19.38	3.94	9.50	7.38
<i>Pseudomona putida</i>	0.13	2.69	1.63	6.31	1.38	4.13	2.88
<i>Arthrobacter polychromogenes</i>	2.50	1.50	1.06	0.81	0.50	1.31	0.38
<i>Bacillus megaterium</i>	7.00	2.88	6.50	3.56	2.88	1.81	1.69
<i>Massilia</i>	1.19	0.81	3.63	1.06	2.31	1.25	1.38
<i>Dermaococcus</i>	3.81	0.19	0.25	0.63	0.50	0.06	0.19

Fuente: elaboración propia.

Para hongos, de las trece especies identificadas solo tres no se encuentran en los siete días de muestreo (*Aspergillus* spp., *Alternaria* sp. y *Rhodotorulla mucilaginoso*), siendo además los hongos con concentraciones más bajas durante los 7 días de monitoreo; los microorganismos fúngicos que presentaron concentraciones más altas durante los 7 días de monitoreo fueron *Cladosporium* spp., seguido de *Penicillium* spp., *Rhodotorulla* sp. y *Cryptococcus magnus*. El día que presentó mayor concentración de hongos fue el día 5 (martes), siendo *Cladosporium* spp. el microorganismo con mayor frecuencia de aparición y mayor concentración (tabla 3).

Tabla 3. Promedios diarios (ufc/m³) de hongos identificados en el área de urgencias

Día de muestra	1	2	3	4	5	6	7
Promedio de hongos por día de muestreo (ufc/m ³)	264.63	165.88	198.63	177.25	267.81	206.06	201.75
<i>Cryptococcus</i>	4.44	2.56	0.25	4.75	7.19	7.50	3.13
<i>Cryptococcus magnus</i>	1.56	1.50	31.81	1.38	0.94	4.25	9.69
<i>Rhodotorula</i>	11.38	6.56	26.13	26.06	24.44	37.88	20.63
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	1.31	0.19	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
<i>Alternaria</i>	0.00	0.06	0.56	1.00	0.25	0.75	0.75
<i>Cladosporium</i> spp.	189.25	56.00	103.63	110.06	183.50	109.06	114.13
<i>Penicillium</i>	48.56	97.56	28.88	31.19	45.50	33.88	44.50
<i>Ulocladium</i>	0.06	0.25	0.13	0.38	2.44	1.81	1.06
<i>Rizopus</i>	2.63	0.19	1.56	0.44	1.38	1.50	2.38
<i>Fusarium</i>	0.63	0.31	0.38	0.44	0.69	3.94	0.81
<i>Microsporium canis</i>	2.19	0.13	0.13	0.06	0.19	0.38	0.00
<i>Mucor</i>	0.13	0.19	0.56	0.25	0.31	0.38	2.13
<i>Mycellia sterillia</i>	2.50	0.31	3.44	0.38	0.81	4.63	2.56
<i>Aspergillus</i> spp.	0.00	0.06	1.19	0.88	0.06	0.13	0.00

Fuente: elaboración propia.

- Temperatura y humedad relativa

Con respecto a la temperatura, los valores máximos se presentaron para los puntos de muestreo 31, 22 y 19, con una temperatura de 25 °C en cada uno, siendo estos los consultorios en donde se hallaba el mayor flujo de personas. Por otro lado, las menores temperaturas se presentaron para los puntos 1 y 8, los cuales corresponden a 8.9 °C y 20.9 °C, estos puntos son las entradas y salidas del área de urgencias.

En cuanto a la humedad relativa se establece que los promedios más altos se localizaron en los puntos 1, 15 y 23, con 54.6 %, 45.7 % y 53.9 %, respectivamente, siendo estos la entrada a urgencias, el pasillo de unidad

de cuidado coronario y la unidad de cuidado coronario, encontrándose los dos últimos muy cercanos a la salida y entrada de las ambulancias; por otro lado, las humedades relativas más bajas se presentan para los puntos 3, 5 y 19, con 45.70 %, 45.71 % y 45.76 %, respectivamente.

Al comparar los rangos estipulados por la NTP 859 para temperatura (24 a 26 °C) con los promedios de temperatura (°C) del muestreo, se evidenció que un 68.75 % (n = 22) de las áreas muestreadas no cumplen. Con respecto a la humedad relativa, al comparar los rangos (45 y 55 %) se observó el cumplimiento de la norma (Rosell y Muñoz, 2010).

- Concentración de bioaerosoles según límites de la oms

Para la carga microbiana fúngica, se evidenció que todos los puntos evaluados en el hospital sobrepasan el límite de 50 UFC/m³ sugerido por la oms. Las concentraciones para pasillos y salas de hidratación estuvieron en un rango de 196 a 252 UFC/m³, mientras que las zonas de triaje y sala de espera (áreas cercanas a la salida principal de la carrera 30) presentaron homogeneidad en la distribución de microorganismos fúngicos. Las áreas con concentraciones más altas fueron la sala de observación 4, la sala de cuidado intermedio, el pasillo que conduce a SALEM y el consultorio 10, registrando valores por encima de 252 UFC/m³.

En el caso de bacterias, se identificó que algunos puntos evaluados en el hospital exceden el límite de 100 UFC/m³, sugerido por la oms. Se encontró un valor promedio mínimo de 50 UFC/m³ y uno máximo de 120 UFC/m³. Los valores por encima de 93 UFC/m³ se localizan en el área de triaje y el punto 7 (pasillo de entrada a urgencias), ambos sectores con un alto flujo de personas y cercanos a corrientes aire externo. En general, se encontró que en comparación con los hongos, existe una menor variabilidad entre los rangos que se presentaron en las bacterias; el rango que predominó fue de 65 UFC/m³ a 82 UFC/m³.

- Cálculo del riesgo

Para los hongos, se estableció que las trece especies se clasificaron en el grupo 2 de importancia clínica, es decir, presentan un riesgo moderado, teniendo poca probabilidad de desarrollar una enfermedad en la población. Respecto a la frecuencia de aparición se obtuvo que *Rodothorula mucilaginosa*, *Alternaria* sp., *Ulocladium* sp., *Fusarium* sp., *Microsporium canis*, *Mucor* sp. y *Aspergillus* spp. presentaron frecuencias menores al 30 %, mientras que para *Cryptococcus* sp., *Cryptococcus magnus*, *Rhizopus* sp. y *Mycellia sterillia* se registraron frecuencias del 30 al 70 %. Los hongos que exhibieron una mayor frecuencia en el monitoreo fueron *Penicillium* spp., *Cladosporium* spp. y *Rhodotorula* sp., con más del 70 %. Por lo anterior y de acuerdo con el cálculo del riesgo, el microorganismo que presentó mayor riesgo por hongos fue el género *Cladosporium* spp., siendo este el microorganismo que tiene mayor frecuencia de aparición y las concentraciones más altas, atribuyéndole un riesgo medio, con 15 puntos. Por último, el cálculo de riesgo para hongos se estableció en un rango entre 11 y 15, es decir, las 13 especies presentan un riesgo medio de causar una enfermedad en la población (tabla 4).

El cálculo de riesgo por bacterias mostró que dichos microorganismos se clasificaron en el grupo 2 de importancia clínica, por lo que tienen poca probabilidad de desarrollar una enfermedad en la población. Para la frecuencia de aparición se obtuvo que *Klebsiella oxytoca*, *Pseudomonas putida*, *Pantoea agglomerans*, *Masillia* sp., *Bacillus megaterium*, *Arthrobacter globiformis* y *Micrococcus luteus* registraron frecuencias del 30 al 70 %. El microorganismo que presentó una mayor frecuencia de aparición fue *Bacillus pumilus*, con más de un 70 % para todo el monitoreo. Para el resto de los microorganismos se presentaron frecuencias menores al 30 %. Por último, se estableció que el riesgo por bacterias se ubicó en un rango de 10 a 13 puntos, es decir, las 29 especies presentan un riesgo medio de causar una enfermedad en la población (tabla 5).

Tabla 4. Cálculo del riesgo por la presencia de hongos

Microorganismo	Parámetro Clasificación Rangos de evaluación	Importancia clínica			Frecuencia de aparición			Concentración UFC/m ³		Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)		Ventilación (m ³ /h.m ²)		Riesgo	
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	<30%	30%<X >70%	>70%	<50	>50	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple		No cumple
		1	2	3	4	1	2	3	1	3	1	3	1	3	1		3
<i>Cryptococcus</i> sp.			2						1							3	12
<i>Cryptococcus magnus</i>		2							1							3	12
<i>Rhodotorula</i> sp.		2							1							3	13
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>		2				1			1							3	11
<i>Alternaria</i> sp.		2				1			1							3	11
<i>Cladosporium</i> spp.		2														3	15
<i>Penicillium</i> spp.		2							1							3	13
<i>Ulocladium</i> sp.		2				1			1							3	11
<i>Rhizopus</i> sp.		2							1							3	12
<i>Fusarium</i> sp.		2				1			1							3	11
<i>Microsporium</i> canis		2				1			1							3	11
<i>Mucor</i> sp.		2				1			1							3	11
Micelio estéril		2							1							3	12
<i>Aspergillus</i> spp.		2				1			1							3	11

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Cálculo del riesgo por la presencia de bacterias

Microorganismo	Parámetro Clasificación Rangos de evaluación	Importancia clínica				Frecuencia de aparición		Concentración UFC/m ³		Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)		Ventilación (m ³ /h.m ²)		Riesgo	
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	<30%	30%< X > 70%	> 70%	< 50	> 50	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple		No cumple
<i>Klebsiella oxytoca</i>		1	2	3	4	1	2	3	1	3	1	3	1	3	1	3	12
<i>Pseudomona stutzeri</i>			2				2		1			3	1			3	11
<i>Pseudomonas oryzihabitans</i>			2			1			1			3	1			3	11
<i>Pseudomona sp.</i>			2			1			1			3	1			3	11
<i>Pseudomona putida</i>			2			2			1			3	1			3	12
<i>Pantoea agglomerans</i>			2			2			1			3	1			3	12
<i>Pantoea sp.</i>			2			1			1			3	1			3	11
<i>Corynebacterium sp.</i>			2			1			1			3	1			3	11
<i>Corynebacterium sophthalimum</i>	1					1			1			3	1			3	10
<i>Acinetobacter sp.</i>		2				1			1			3	1			3	11
<i>Acinetobacter johnsonii</i>		2				1			1			3	1			3	11
<i>Rabnella sp.</i>		2				1			1			3	1			3	11
<i>Masilia timonae</i>		2				1			1			3	1			3	11
<i>Masilia sp.</i>		2				1	2		1			3	1			3	12
<i>Exiguobacterium sp</i>	1					1			1			3	1			3	10
<i>Dermacoccus sp.</i>		2				1			1			3	1			3	11
<i>Staphylococcus xylosus</i>		2				1			1			3	1			3	11
<i>Staphylococcus saprophyticus</i>		2				1			1			3	1			3	11

(Continúa en página siguiente)

Microorganismo	Parámetro Clasificación Rangos de evaluación	Importancia clínica				Frecuencia de aparición			Concentración UFC/m ³		Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)		Ventilación (m ³ /h.m ²)		Riesgo
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	<30%	30% < X < 70%	> 70%	< 50	> 50	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	
<i>Staphylococcus</i> sp.			2			1			1							3	11
<i>Bacillus mycoides</i>			2			1			1							3	11
<i>Bacillus</i> sp.			2			1			1							3	11
<i>Bacillus pumilus</i>			2					3	1							3	13
<i>Bacillus megaterium</i>			2				2		1							3	12
<i>Arthrobacter globiformis</i>		1					2		1							3	11
<i>Arthrobacter</i> sp.			2			1			1							3	11
<i>Arthrobacter psychrolactophilus</i>		1				1			1							3	10
<i>Arthrobacter polychromogenes</i>		1				1			1							3	10
<i>Arthrobacter luteolus</i>			2			1			1							3	11
<i>Micrococcus luteus</i>			2				2		1							3	12

Fuente: elaboración propia.

En el cálculo de riesgo para hongos y bacterias, las variables temperatura y velocidad del viento no cumplieron con los valores establecidos por la NTP 859 (30 m³/h.m² y 24 a 26 °C, respectivamente); mientras que la humedad relativa no excedió los valores establecidos en la norma (Rosell y Muñoz, 2010).

Discusión de resultados

El presente estudio identificó 42 especies de microorganismos entre hongos y bacterias, siendo los microorganismos fúngicos los que superaron las concentraciones sugeridas por la OMS. Partiendo de esto, se realizó un cálculo del riesgo por microorganismo, el cual arrojó un riesgo medio para el área de urgencias del hospital. A partir de esto se evidenció que géneros como *Penicillium* spp., *Rhodotorula*, *Cladosporium* spp. y la especie *Bacillus pumillus* tienen las mayores concentraciones y frecuencias del monitoreo, siendo estas dos últimas las que obtuvieron un puntaje más alto dentro del riesgo calculado.

De acuerdo con el cálculo del riesgo, Okten y Asan (2012) determinaron que el género *Cladosporium* tiene las concentraciones más altas, con 462 colonias; de la misma manera, Kim et ál. (2010) reportaron que el porcentaje más alto para las concentraciones de microorganismos fúngicos lo obtuvo *Cladosporium* sp., con un 30 %. En lo reportado en el hospital privado de Bogotá, este microorganismo tuvo también las concentraciones más altas. Partiendo de que es uno de los microorganismos más comunes en el ambiente, esto explica las altas concentraciones obtenidas; además, sus reservorios son el suelo y las zonas vegetativas, sumado a que su forma de resistencia son las esporas, lo que hace que este microorganismo sea resistente en el ambiente, facilitando su dispersión, razón por la cual las concentraciones más altas se presentaron en las únicas zonas donde hay presencia de corrientes de aire de hasta 0.5 m/s cercanas a un punto de entrada de aire externo (Kim et ál., 2010; Okten y Asan, 2012; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2022). De igual manera, Olonitola et ál. (1994) establecieron que algunas especies del género *Cladosporium* spp. actúan como microorganismos oportunistas, presentando manifestaciones clínicas como asma y procesos

micóticos pulmonares, así como infecciones en la piel (cromoblastomycosis). Del mismo modo, se menciona que las esporas de *Cladosporium* spp. y *Penicillium* spp. son inhaladas a través de las vías respiratorias, produciendo enfermedades alérgicas o colonizando superficies cutáneas en pacientes (Marcano, 2013).

Por otro lado, durante el recuento de UFC de *Bacillus pumilus* se observaron altas concentraciones en el área de urgencias; al comparar los resultados obtenidos con el estudio de Tena et ál. (2007), se evidencia que existe una baja frecuencia de aparición, por lo cual se infiere que *Bacillus pumilus* es un microorganismo poco común en áreas hospitalarias, lo cual podría indicar que dentro de este hospital privado de Bogotá existen factores que favorecen la presencia de este microorganismo, siendo uno de estos la inexistencia de un sistema de ventilación eficiente. Además de esto, *Bacillus pumilus* puede llegar a producir afecciones cutáneas, sin embargo, se ha comprobado que existe una baja probabilidad de afectación a la salud de las personas (Brophy y Knoop, 1982; Tena et ál., 2007).

Es importante resaltar que un estudio donde se evaluó la temperatura, la humedad relativa, el flujo de personas y la estacionalidad mostró que la única variable que presentó afectación en la densidad de microorganismos fue la estacionalidad, ya que se observaron cargas más altas para bacterias y hongos en verano, mientras la correlación con otras variables como el flujo de personas se presentó para bacterias (Li y Hou, 2003; Kim et ál., 2010). En cuanto a microorganismos fúngicos se encontró una relación directamente proporcional con la temperatura (Park et ál., 2013). Finalmente, otra investigación documentó que la densidad de microorganismos no se ve afectada por los factores de humedad relativa y temperatura, concluyendo que es necesario indagar otros factores que pueden afectar la cantidad de microorganismos como la estacionalidad o la presencia de personas (Obbard y Fang, 2003; Guzmán y Pachón, 2016).

Conclusiones

Los bioaerosoles identificados en el monitoreo representan un riesgo medio para la población del hospital, teniendo en cuenta que microorganismos como *Cladosporium* y *Bacillus pumillus* arrojaron los puntajes

más altos dentro de este tipo de riesgo para hongos y bacterias, respectivamente, debido a su frecuencia de aparición y a algunas concentraciones que superan los límites establecidos por la OMS.

El grado de riesgo para el área de urgencias fue medio, ya que los microorganismos identificados pueden transmitirse tanto a los pacientes como al personal, entrando por las vías respiratorias o gastrointestinales.

Referencias

- Bielawska-Drózd, A., Cieślík, P., Bohacz, J., Kornilłowicz-Kowalska, T., Żakowska, D., Bartoszcze, M., Wlizio-Skowronek, B., Winnicka, I., Brytan, M., Kubiak, L., Skopińska-Różewska, E. y Kocik, J. (2018). Microbiological analysis of bioaerosols collected from Hospital Emergency Departments and ambulances. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 25(2), 274-279. <https://doi.org/10.26444/aaem/80711>
- Brophy, P. F. y Knoop, F. C. (1982). *Bacillus pumilus* in the induction of clindamycin-associated enterocolitis in guinea pigs. *Infection and Immunity*, 35(1), 289-295. <https://doi.org/10.1128/iai.35.1.289-295.1982>
- Burge, H. (1990). Bioaerosols: Prevalence and health effects in the indoor environment. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 86, 687-701. [https://doi.org/10.1016/s0091-6749\(05\)80170-8](https://doi.org/10.1016/s0091-6749(05)80170-8)
- Fletcher, L., Noakes, C., Beggs, C. y Sleigh, P. (2004). The Importance of Bioaerosols in Hospital Infections and the Potential for Control using. *American Air & Water*. <https://www.americanairandwater.com/uv-hospitals/uv-airborne-hospital-infections.pdf>
- Francisco Soria Melguizo S.A. (2009). *Ficha técnica: Potato Dextrose Agar tubo*. Francisco Soria Melguizo S.A. http://f-soria.es/Inform_soria/Difco%20Fichas%20tecnicas/TUBOS%20DIFCO/FT%20POTATO%20DEXTROSE%20AGAR.pdf
- García, P., Allende, F., Legarraga, P., Huilcaman, M. y Solari, S. (2012). Identificación bacteriana basada en el espectro de masas de proteínas: Una nueva mirada a la microbiología del siglo XXI. *Revista Chilena de Infectología*, 29(3), 263-272. <https://doi.org/10.4067/S0716-10182012000300003>
- Guzmán, L. M. y Pachón, J. A. (2016). *Evaluación del riesgo por transmisión de infecciones respiratorias intrahospitalarias mediada por bioaerosoles presentes en el hospital de Suba (II nivel ESE)* [tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. <https://hdl.handle.net/11634/2439>

- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSST). (2022). Fichas de agentes biológicos: *Cladosporium* spp. INSST. <https://www.insst.es/agentes-biologicos-basebio/hongos/cladosporium-spp>
- International Organization for Standardization (ISO). (2015). *ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14644:-1:ed-2:v1:en>
- Kim, K. Y., Kim, Y. S. y Kim, D. (2010). Distribution Characteristics of Airborne Bacteria and Fungi in the General Hospitals of Korea. *Industrial Health*, 48(2), 236-243. <https://doi.org/10.2486/indhealth.48.236>
- Li, C. S. y Hou, P. A. (2003). Bioaerosol characteristics in hospital clean rooms. *Science of The Total Environment*, 305(1-3), 169-176. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00500-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00500-4)
- Marcano, J. (2013). *Aislamiento de hongos anemófilos en el ambiente del servicio de emergencia del Hospital "Luis Daniel Beaupertbuy" de Cumanacoa, municipio Montes, estado Sucre* [tesis de pregrado, Universidad de Oriente]. http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/3634/1/TESIS_JMB.pdf
- Martí, M. C. (2004). *NTP 299: Método para el recuento de bacterias y hongos en aire*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Merck. (2012). *MAS-100, Microbial Air Monitoring Systems*. Merck Millipore.
- Musafia. (2011). *Digital thermo-hygrometer. Instructions for use*. Musafia.
- Obbard, J. P. y Fang, L. S. (2003). Airborne Concentrations of Bacteria in a Hospital Environment in Singapore. *Water, Air, and Soil Pollution*, 144(1/4), 333-341. <https://doi.org/10.1023/a:1022973402453>
- Okten, S. y Asan, A. (2012). Airborne fungi and bacteria in indoor and outdoor environment of the Pediatric Unit of Edirne Government Hospital. *Environmental monitoring and assessment*, 184(3), 1739-1751. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2075-x>
- Olonitola, O. S., Dada, J. D., Galadima, M. y Odama, L. E. (1994). Fungal spores in the homes of asthmatic patients in Zaria, Nigeria. *Annals of allergy*, 73(3), 273-274.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1988). *Indoor air quality: biological contaminants*. OMS.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). *Manual de bioseguridad en el laboratorio*. OMS.

- Park, D. U., Yeom, J. K., Lee, W. J. y Lee, K. M. (2013). Assessment of the Levels of Airborne Bacteria, Gram-Negative Bacteria, and Fungi in Hospital Lobbies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(2), 541-555. <https://doi.org/10.3390/ijerph10020541>
- Peña, C. E., Carter, D. E. y Ayala-Fierro, F. (2001). *Toxicología ambiental. Evaluación de riesgos y restauración ambiental*. The University of Arizona. <http://www.ingenieroambiental.com/informes2/toxamb.pdf>
- Rosell, M. y Muñoz, A. (2010). *NTP 859: Ventilación general en hospitales*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Rui, Z., Guangbei, T. y Jihong, L. (2008). Study on biological contaminant control strategies under different ventilation models in hospital operating room. *Building and Environment*, 43(5), 793-803. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.018>
- Santanbromsio, E., Ortega, M. y Garibaldi, P. (2009). Preparación de medios de cultivo. Universidad Tecnológica Nacional. https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/biotecnologia/practicoI.pdf
- Stec, J. y Lenart-Boroń, A. (2019). Assessment of microbiological aerosol concentration in selected healthcare facilities in southern Poland. *Central European Journal of Public Health*, 27(3), 239-244. <https://doi.org/10.21101/cejph.a5681>
- Tena, D., Martínez-Torres, J. A., Pérez-Pomata, M. T., Sáez-Nieto, J. A., Rubio, V. y Bisquert, J. (2007). Cutaneous Infection Due to *Bacillus pumilus*: Report of 3 Cases. *Clinical Infectious Diseases*, 44(4), e40-e42. <https://doi.org/10.1086/511077>
- Wisudawan, O., Mallongi, A., Russeng, S. S., Hatta, M., Daud, A. y Subhan, M. (2020). Bioaerosol pollution in intensive-care unit of Dr. Wahidin Sudirohusodo Hospital Makassar: Morning and midday assessment. *Enfermería Clínica*, 30(Suppl. 4), 35-38. <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2020.02.009>

Caracterización de bioaerosoles en ambientes intramurales y extramurales ubicados en la calle 51 con carrera 13 de Bogotá

ERIKA ALEJANDRA NOGUERA LÓPEZ
DIANA JULIETH SALGUERO GUERRERO
ANA MARÍA MOSQUERA MONGUÍ
YURITZA ALEJANDRA GARAVITO GAMBOA
CLAUDIA MARCELA PARRA GIRALDO
CAROLINA GUZMÁN LUNA
LUIS CAMILO BLANCO BECERRA

Objetivo

Identificar los bioaerosoles fúngicos y bacterianos termotolerantes que se encuentran dentro de las instalaciones del gimnasio de la Universidad Santo Tomás, ubicado sobre la carrera 13 con calle 51, así como los bioaerosoles presentes en el exterior del gimnasio.

Metodología

A continuación, se describen las actividades realizadas en la presente investigación:

Ubicación del punto de monitoreo

La localidad de Chapinero, lugar donde se ubica la sede principal de la Universidad Santo Tomás dispone de la carrera 13 con calle 51, vía por donde circulan, en su mayoría, vehículos de transporte público, particulares y, en ocasiones, automotores de carga pesada, que utilizan diésel como combustible. El punto de monitoreo del estudio se localizó en la

Unidad de Planeación Zonal (UPZ) Chapinero Centro, barrio Marly, en la calle 51 con carrera 13 (figura 3), zona caracterizada por ser residencial, comercial y estudiantil, además de exhibir un alto flujo vehicular.

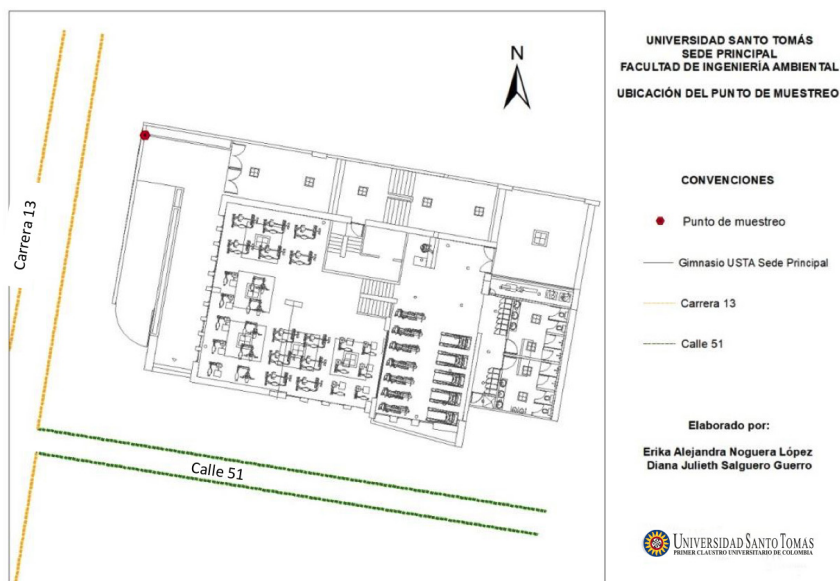


Figura 3. Ubicación del punto de muestreo externo

Fuente: elaboración propia.

Selección de las horas y tiempo de muestreo

Del 2 al 10 de julio de 2019, durante cinco días se llevó a cabo el monitoreo de bioaerosoles en las instalaciones del gimnasio y en el exterior de este, en el horario de 8:30 a.m. a 10:30 a.m. y de 4:30 p.m. a 6:30 p.m. La selección de los horarios de muestreo obedeció a los horarios de mayor concentración de PM_{10} durante el día en la ciudad de Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente, 2021), teniendo en cuenta que los bioaerosoles hacen parte del material particulado y, por lo tanto, existe mayor probabilidad de captación de estos en esos horarios (van Leuken et ál., 2016; Zoran et ál., 2020).

Selección de equipos y medios de cultivo

Se empleó el equipo MAS-100 Eco, el cual funciona mediante el método de impactación de Andersen, que se basa en aspirar el aire mediante una tapa perforada (Merck, 2012), a un caudal de 100 l/m. En la parte superior del equipo se ubicó una caja de Petri con el medio de cultivo correspondiente, en este caso: agar tripticasa de soya (TSA) para bacterias y Sabouraud con cloranfenicol para hongos y levaduras. Se tomaron dos muestras por medio de cultivo (incluyendo la réplica), ubicándolo a una altura de aproximadamente 2 metros para realizar el muestreo durante 3 minutos. El tiempo de monitoreo se seleccionó en función de evitar la ausencia o colmatación de los medios de cultivo con bioaerosoles, realizando para ello un monitoreo previo y consultando estudios desarrollados en ambientes interiores (Adams et ál., 2014; Cox et ál., 2019) y exteriores (Ruiz-Gil et ál., 2020).

Cuantificación de unidades formadoras de colonias

Después de la etapa de colección, la placa de Petri fue incubada a 37 °C, 24 horas para bacterias y 48 horas para hongos, para posteriormente establecer el número de unidades formadoras de colonias (UFC), teniendo en cuenta el tamaño, el color, la textura, el brillo, el olor y la forma (Alvarado y Rozo, 2019). Para establecer la concentración de colonias por metro cúbico de aire, se aplicó para cada microorganismo la fórmula establecida por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en la *NTP 299: Método para el recuento de bacterias y hongos en aire* (Martí, 2004).

$$N^{\circ} (UFC / m^3) = \frac{Nc \times 1000}{V \times NU}$$

Dónde:

Nc: número de colonias por placa.

V: volumen de muestreo (litros).

NU: número de unidades de tiempo empleadas en el muestreo.

No se tuvo en cuenta la corrección de Feller, establecida en el manual del equipo MAS-100 Eco, ya que en el recuento de microorganismos se hizo distinción entre bacterias y hongos, y la corrección de Feller aplica solo para el recuento de UFC totales (OMS, 1988).

Metodología para la identificación de bioaerosoles

Luego de la cuantificación de las UFC, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Micosis Humanas y Proteómico (MICOH-P) de la Pontificia Universidad Javeriana, en donde se realizó el método de tinción de Gram para identificar las bacterias grampositivas o gramnegativas, mientras para los hongos se utilizó la tinción de azul de lactofenol, que identifica la forma de sus micelios, hifas y esporas micro y macroscópicamente, observando el anverso y reverso de cada hongo. Finalmente, para la identificación del género y especie del bioaerosol se empleó el equipo MALDI-TOF, el cual, por medio de espectrometría de masas de tiempo de vuelo de ionización por desorción láser asistida por matriz, identifica los organismos a partir de los perfiles de proteínicos (Nagorny et ál., 2019).

Comparación con los valores establecidos por la OMS

Las concentraciones obtenidas en los muestreos se compararon con los valores sugeridos por la OMS, de 100 UFC/m³ para bacterias y 50 UFC/m³ para hongos (OMS, 1988).

Implicación clínica de los bioaerosoles identificados

Posterior a la identificación de los bioaerosoles, se llevó a cabo una revisión bibliográfica para determinar si estos eran patógenos o no y cuáles enfermedades podrían llegar a desarrollar en los humanos.

Aplicación

En las actuales condiciones sanitarias, la presencia de bioaerosoles ha tomado una gran relevancia, debido a que algunos de ellos pueden generar enfermedades de importancia clínica en la población. Además de las instituciones clínicas, existen otros escenarios como los gimnasios, en donde la actividad física suministra beneficios en la disminución de enfermedades crónicas y mentales, razón por la cual identificar posibles bioaerosoles patógenos es otra de las competencias del ingeniero ambiental dentro del área de salud ambiental. Mediante el uso de herramientas microbiológicas y de calidad del aire en interiores, se identifican y suministran recomendaciones para minimizar o eliminar los posibles problemas en salud derivados de la exposición a los bioaerosoles, mediante sistemas de control o ventilación.

Discusión

Resultados

- Concentración de bioaerosoles dentro del gimnasio

En general, se evidenció una mayor presencia de bioaerosoles bacterianos (UFC/m³) en horas de la tarde en comparación con horas de la mañana, lo cual se ratificó mediante el análisis de diferencia de medias, el cual fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$). En cuanto a los bioaerosoles fúngicos no se observaron diferencias significativas entre los horarios de muestreo ($p < 0.05$) (tabla 6).

Tabla 6. Concentración de bioaerosoles bacterianos y fúngicos en horas de la mañana y tarde, dentro del gimnasio

Día	Bacterias		Hongos	
	UFC/m ³		UFC/m ³	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
1	0.217	0.417	0.017	0.003
	0.260	0.443	0.007	0.007
2	0.297	0.330	0.007	0.007
	0.287	0.280	0.003	0.017
3	0.050	0.263	0.003	0.013
	0.077	0.197	0.003	0.013
4	0.067	0.313	0.007	0.003
	0.070	0.387	0.003	0.003
5	0.130	0.223	0.003	0.037
	0.107	0.263	0.003	0.040

Fuente: elaboración propia.

- Concentración de bioaerosoles fuera del gimnasio

La proporción de bioaerosoles bacterianos y fúngicos identificados fue muy baja, lo cual obedece a factores como la turbulencia y la buena ventilación, los cuales impiden que las partículas biológicas sean captadas por el equipo de monitoreo microbiológico con mayor eficiencia (tabla 7). No se identificó mayor o menor presencia de bioaerosoles bacterianos o fúngicos en alguno de los horarios de monitoreo, lo cual se ratificó por medio del análisis estadístico de las medias de concentración (UFC/m³), el cual mostró la no existencia de diferencias estadísticamente significativa entre los horarios de monitoreo ($p < 0.05$).

Tabla 7. Concentración de bioaerosoles bacterianos y fúngicos en horas de la mañana y tarde, fuera del gimnasio

Día	Bacterias		Hongos	
	UFC/m ³		UFC/m ³	
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde
1	0.007	0.043	0.000	0.000
	0.030	0.260	0.003	0.003
2	0.103	0.010	0.003	0.007
	0.097	0.013	0.000	0.000
3	0.027	0.000	0.030	0.000
	0.000	0.000	0.063	0.003
4	0.033	0.003	0.047	0.000
	0.033	0.007	0.000	0.000
5	0.023	0.017	0.003	0.000
	0.000	0.017	0.000	0.000

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la correlación entre las concentraciones de bioaerosoles en el gimnasio y la zona exterior, las bacterias mostraron una correlación de 0.66 en horas de la mañana y 0.62 en la tarde, para una correlación por día de 0.43, señalando una relación directamente proporcional para las concentraciones bacterianas tanto en interiores como en exteriores. Para los hongos se encontró una relación inversamente proporcional, con valores de correlación muy bajos; en horas de la mañana la correlación entre las concentraciones dentro y fuera del gimnasio fue de -0.19 y en horas de la tarde obtuvo un valor de -0.27, para una correlación por día de -0.23.

La mayor presencia de bioaerosoles bacterianos en las instalaciones del gimnasio obedece al número potencial de fuentes, representado por las personas que acuden y utilizan sus instalaciones, mientras que la zona exterior está afectada por un menor número de fuentes, que gracias a la dispersión producida por las corrientes de viento disminuye la probabilidad de captación de estos bioaerosoles. En cuanto a la presencia de hongos, la escasa identificación en los dos ambientes obedece a

la mínima disponibilidad de fuentes de emisión, ya que, en la zona de estudio, las zonas verdes o de parque son escasas, limitándose a esporas que son transportadas por las corrientes de aire desde otros lugares. Finalmente, es importante señalar que las concentraciones identificadas no excedieron los límites de 100 UFC/m³ para bacterias y 50 UFC/m³ para hongos sugeridos por la OMS (1988).

- Identificación de bioaerosoles dentro del gimnasio

Luego de realizar las tinciones para identificación de bacterias, se obtuvo que el 68 % correspondió a cocos grampositivos, un 14 % a bacilos grampositivos, un 11% a bacilos gramnegativos y, finalmente, un 7 % a levaduras. Dentro de las bacterias, las especies que exhibieron un mayor porcentaje de aparición fueron *Micrococcus luteus* con un 33.14 %, seguido de *Staphylococcus epidermidis* con un 18.16 % (figura 4).

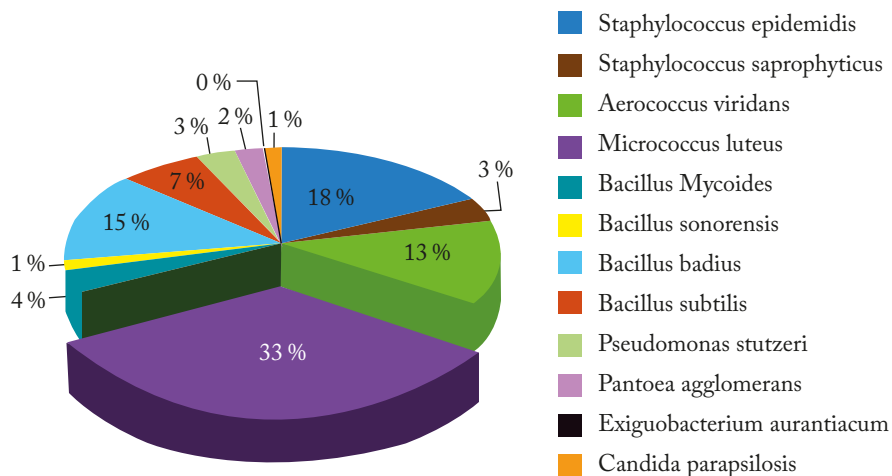


Figura 4. Frecuencia de bacterias y levaduras identificadas dentro del gimnasio

Fuente: los autores.

En general, las bacterias identificadas son causantes de infecciones oportunistas, principalmente en huéspedes inmunosuprimidos, las cuales se encuentran en el grupo de riesgo 1 de microorganismos infecciosos de la OMS, consideradas con poca probabilidad de causar afecciones en el ser humano (tabla 8).

Tabla 8. Bacterias y levaduras identificadas dentro del gimnasio y posibles afecciones en la salud

Tipo	Microorganismo	Generalidades/Afecciones a la salud
Bacteria	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	Patógeno oportunista que puede causar bacteriemia en pacientes inmunosuprimidos y endoftalmitis (García, 2013).
	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	Patógeno oportunista que puede causar infecciones en el tracto urinario y endocarditis (Orden-Martínez et ál., 2008).
	<i>Aerococcus viridans</i>	Patógeno oportunista que puede causar infecciones en el tracto urinario, endocarditis y osteomielitis (Pérez et ál., 2015).
	<i>Micrococcus luteus</i>	Patógeno oportunista que puede causar bacteriemia y endocarditis (Usó et ál., 2003).
	<i>Bacillus mycoides</i>	Puede causar infecciones en el torrente sanguíneo (Heidt et ál., 2019).
	<i>Bacillus sonorensis</i>	Producción de peptinasa (Palmisano et ál., 2001).
	<i>Bacillus badius</i>	Efectos en la salud desconocidos (Pichinoty, 1984).
	<i>Bacillus subtilis</i>	Microorganismo ambiental (Earl et ál., 2008).
	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Patógeno oportunista, interacción con metales pesados (Bush y Vazquez-Peretejo, 2022).
	<i>Pantoea agglomerans</i>	Patógeno oportunista que puede causar bacteriemia, peritonitis e infecciones en pacientes inmunocomprometidos (Cruz et ál., 2007).
	<i>Exiguobacterium aurantiacum</i>	Infecciones oportunistas, principalmente en pacientes con bacteriemia y mieloma (Pitt et ál., 2007).
Levadura	<i>Candida parapsilosis</i>	Patógeno oportunista, causante de infecciones como onicomycosis, endocarditis, pancreatitis, meningitis, endoftalmitis, candidemia, entre otras (Cabra-Rodríguez et ál., 2018).

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la tabla.

En cuanto a hongos, aquellos con mayor presencia fueron *Aspergillus fumigatus*, representando el 41.67 % y *Mucor spp.*, con 25 % de aparición (figura 5).

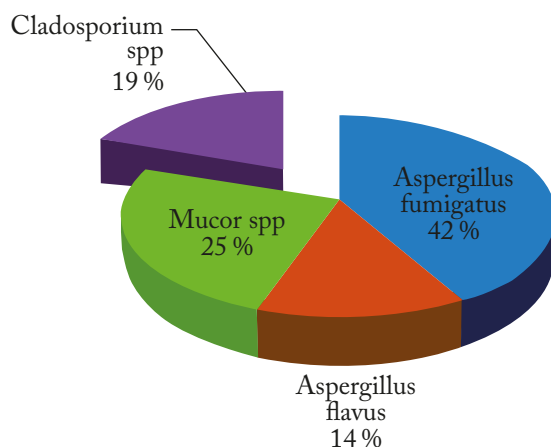


Figura 5. Frecuencia de hongos identificados dentro del gimnasio

Fuente: los autores.

Los hongos identificados en mayor proporción pertenecen al grupo de riesgo 2, los cuales pueden provocar enfermedades a los humanos, pero con poca probabilidad de causar un riesgo grave para las personas (tabla 9).

Tabla 9. Bacterias y levaduras identificadas dentro del gimnasio y posibles afecciones en la salud

Microorganismo	Generalidades/Afecciones a la salud
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Aspergilosis, sinusitis, micosis y alergias (Vircell, 2021).
<i>Aspergillus flavus</i>	Aspergilosis bronquial, sinusitis micótica y otitis (EcuRed, 2021a).
<i>Mucor spp.</i>	Patógeno oportunista que puede causar mucormicosis (EcuRed, 2021b).
<i>Cladosporium spp.</i>	Infecciones pulmonares e infecciones cutáneas, queratitis y onicomicosis (EcuRed, 2021c).

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la tabla.

• Bioaerosoles identificados fuera del gimnasio

En esta zona se identificaron 5 bacterias y 4 hongos, siendo *Aerococcus viridans* y *Aspergillus flavus* las especies con mayor presencia en los muestreos (figuras 6 y 7).

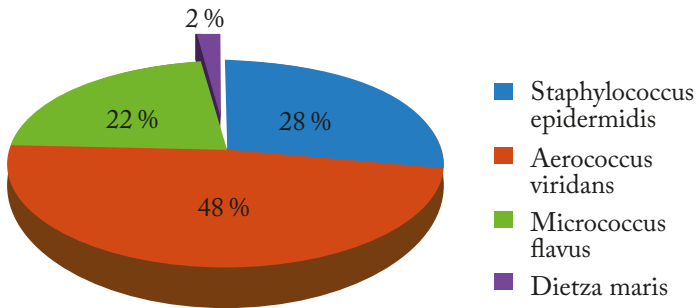


Figura 6. Frecuencia de bacterias identificadas fuera del gimnasio

Fuente: los autores.

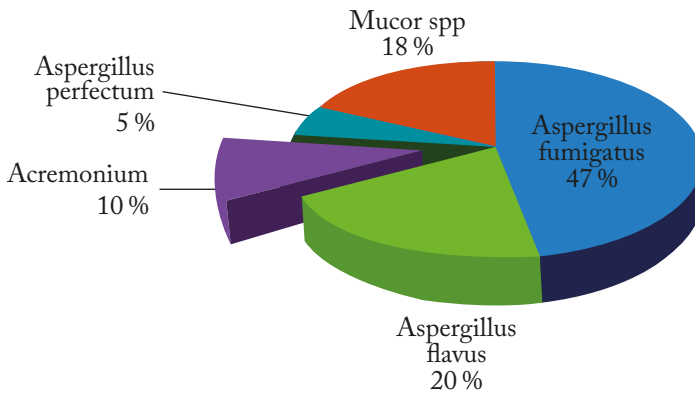


Figura 7. Frecuencia de hongos identificados fuera del gimnasio

Fuente: los autores.

Los bioaerosoles identificados pertenecen al grupo de riesgo 2, los cuales tienen poca probabilidad de causar problemas de salud en las personas (tabla 10).

Tabla 10. Bioaerosoles identificados fuera del gimnasio y posibles afecciones en la salud

Tipo	Microorganismo	Generalidades / Afecciones a la salud
Bacteria	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	Patógeno oportunista que puede causar bacteriemia en pacientes inmunosuprimidos, endoftalmítis (García, 2013)
	<i>Aerococcus viridans</i>	Patógeno oportunista que puede causar infecciones en el tracto urinario, endocarditis, osteomielitis (Pérez, 2015)
	<i>Micrococcus flavus</i>	Organismo fúngico ambiental que puede afectar como patógeno oportunista, productor de micotoxinas y como contaminante de cultivos y productos alimenticios (Liu, 2007)
	<i>Dietzia maris</i>	Actinomiceto ambiental, se ha relacionado con enfermedades humanas. (Koerner, 2009)
Hongo	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Aspergilosis, sinusitis, micosis, alergias (Vircell, 2021)
	<i>Aspergillus flavus</i>	Aspergilosis bronquial, sinusitis micótica, otitis (Avilés, 2017)
	<i>Acremonium</i>	Causa infecciones como queratitis, micetoma, etc. en huéspedes inmunocompetentes después de un traumatismo (Fariñas, 2012)
	<i>Aspergillus perfectum</i>	Patógeno oportunista en pacientes inmunodepresivos, causa infecciones en las vías respiratorias (Walsh, 2008)
	<i>Mucor</i> spp.	Patógeno oportunista, mucormicosis (EcuRed, 2021b)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la tabla.

Discusión de resultados

El presente trabajo identificó bacterias dentro y fuera del gimnasio que son consideradas patógenos oportunistas, los cuales no exhiben un riesgo para la salud de las personas y que conviven normalmente con los seres humanos. Un estudio llevado a cabo en la ciudad de Ardabil, Irán, muestreó 55 gimnasios donde se recolectaron 165 muestras en agar soja tripticasa; la concentración mínima y máxima de bacterias fue de 117

y 877 UFC/m³, respectivamente. Las especies identificadas en el estudio fueron *Pseudomonas*, *Staphylococcus* y *Escherichia coli*, ordenadas de mayor a menor frecuencia entre los microorganismos, respectivamente (Zavieh et ál., 2021). Por su parte, el presente trabajo identificó de manera similar las especies *Staphylococcus epidermidis* y *Staphylococcus saprophyticus*, la primera es considerada como parte de la microbiota normal de la piel y las mucosas humanas junto con otras especies de estafilococos coagulasa-negativos (García, 2013) y la segunda causa frecuentemente infecciones del tracto urinario en mujeres jóvenes (grupo etario: 17 a 27 años) y uretritis en varones (Orden-Martínez et ál., 2008). En cuanto a las concentraciones registradas, siempre fueron menores a la evidenciadas en los gimnasios de Ardavil, lo cual se debe al mayor tiempo de monitoreo (10 minutos por cada muestra) y la selección de horarios en los que se encontraban gran cantidad de personas desarrollando actividad física. Por otra parte, un estudio realizado en zonas residenciales encontró *Corynebacterium* (4 %) y *Staphylococcus* (4 %) en ambientes interiores, reiterando que estos colonizan la piel de humanos y otros organismos (Miletto y Lindow, 2015).

Una revisión en diferentes ambientes exteriores evidenció que en zonas urbanas los géneros bacterianos identificados fueron *Pseudomonas*, *Acetobacter*, *Salmonella*, *Legionella*, *Bacillus*, *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Corynebacterium* y *Fusobacterium* (Bowers et ál., 2013; Xu et ál., 2017; Liu et ál., 2018), no coincidiendo con los hallazgos de nuestro estudio. Sin embargo, las especies *Staphylococcus epidermidis* y *Aerococcus viridans* se encontraron tanto al interior como en el exterior del gimnasio de la universidad, lo que podría plantear que parte de la presencia de estos microorganismos en interiores podría derivarse de los exteriores del gimnasio. Estudios han identificado a *Aerococcus viridans* como una bacteria extendida en el medio ambiente, la cual se ha aislado cada vez más en seres humanos y animales (Liu et ál., 2019); sin embargo, rara vez se ha asociado con infecciones humanas como artritis, endocarditis y meningitis (Ezechukwu et ál., 2019). En cuanto a la especie *Staphylococcus epidermidis*, como se mencionó anteriormente, es considerada como microbiota normal de la piel y las mucosas humanas, siendo un patógeno oportunista, causante de bacteriemia en pacientes inmunosuprimidos (García, 2013).

En cuanto a la presencia de hongos, la presente investigación identificó en mayor porcentaje las especies *Aspergillus*, *Cladosporium* y *Mucor*,

siendo estos patógenos oportunistas que se encuentran normalmente en el ambiente. Establecimientos como bares, cibercafés, escuelas primarias y hogares han registrado la presencia de las especies *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus* y *Cladosporium* (Jo y Seo, 2005), coincidiendo estas dos últimas con los hallazgos de la presente investigación. *Aspergillus* es un hongo oportunista que afecta personas inmunocomprometidas; entre sus patologías relacionadas más frecuentes se encuentran la aspergilosis pulmonar invasiva, la onicomycosis, la otomicosis y la sinusitis alérgica (Vircell, 2021; EcuRed, 2021a). En cuanto a *Cladosporium*, estas se encuentran comúnmente en material vegetal vivo y muerto; sus esporas se dispersan por el viento, siendo abundantes en el aire exterior, mientras que en interiores crecen en las superficies cuando hay humedad. Son hongos oportunistas causantes de infecciones pulmonares e infecciones cutáneas, queratitis y onicomycosis (EcuRed, 2021c). En Teherán, Irán, un estudio realizado en un centro médico evidenció la presencia de *Penicillium* spp. (45.86 %), seguido por *Cladosporium* spp. (31.92 %), *Aspergillus nigri* (6.26 %), y *Aspergillus flavus* (2.83 %), con una concentración de aerosoles fúngicos total de 40.48 UFC/m³ y, específicamente para *Cladosporium* spp. y *Aspergillus flavus*, de 2.92 y 1.14 UFC/m³, respectivamente (Karimpour et ál., 2019), siendo mayores a las encontradas en nuestro estudio.

En zonas residenciales se ha encontrado que los géneros predominantes en interiores y exteriores de esporas de hongos fueron *Aspergillus/Penicillium* (interior = 98.9 % y exterior = 98.9 %), ascosporas (83.3 % y 87.8 %), *Cladosporium* (70.0 % y 82.2 %) y basidiosporas (48.9 % y 77.8 %) (Lee et ál., 2006). A las afueras de un centro hospitalario en Irán se registró un promedio de 26.50 UFC/m³, en donde *Cladosporium*, *Aspergillus flavus* y *Mucor* presentaron valores de 61.10 UFC/m³, 8.09 UFC/m³ y 2.20 UFC/m³, respectivamente, siendo los de mayor frecuencia en los muestreos (Karimpour et ál., 2019). Esto permite establecer que la fuente de bioaerosoles fúngicos en las instalaciones del gimnasio se deriva de las emisiones externas de origen ambiental, ya que este tipo de bioaerosoles no tienen como fuente los seres humanos. *Aspergillus flavus* es un organismo fúngico ambiental considerado un patógeno oportunista, productor de micotoxinas y contaminante de cultivos y productos alimenticios (Avilés et ál., 2017). Finalmente, *Mucor* causa una infección fúngica grave llamada mucormycosis, a través de la vía respiratoria o las esporas de hongos comestibles

que penetran en el cuerpo. La mucormicosis con desenlace fatal se ha observado en pacientes con daño prematuro severo (EcuRed, 2021b).

Conclusiones

Las bacterias identificadas mostraron una mayor proporción de microorganismos grampositivos, siendo estos inocuos de los ambientes interiores y exteriores gracias a que conviven con el hombre y no generan efectos en la salud de las personas a menos que las condiciones de salud de los huéspedes estén afectadas por enfermedades de base que los hagan vulnerables.

El género *Aspergillus* tuvo mayor porcentaje de aparición en los aislamientos internos y externos al gimnasio; este bioaerosol es natural en el ambiente y no tiene como fuente el hombre, pero en personas inmunosuprimidas puede afectar su salud, como se ha podido observar en estudios realizados en recintos clínicos.

Se evidenció una mayor presencia de microorganismos bacterianos dentro de las instalaciones del gimnasio comparado con el área exterior de este. Esto se ratifica en cuanto a la disponibilidad de fuentes, en este caso los humanos que asisten al gimnasio y son portadores de algunos de estos microorganismos, que viven en un balance natural con el hombre.

Los hongos identificados presentaron una mayor presencia fuera del gimnasio, lo cual obedece a que son microorganismos inherentes al ambiente y que, en este caso, pueden entrar en las instalaciones del gimnasio gracias a las ventanas que proporcionan ventilación a este lugar.

Referencias

- Adams, R. I., Miletto, M., Lindow, S. E., Taylor, J. W. y Bruns, T. D. (2014). Airborne Bacterial Communities in Residences: Similarities and Differences with Fungi. *PLoS ONE*, 9(3), e91283. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091283>
- Alvarado, P. A. y Rozo, L. N. I. (2019). *Determinación de la presencia de bioaerosoles y su riesgo asociado a la salud en el área de urgencias de un hospital de II nivel en la localidad de Engativá, Bogotá* [tesis de pregrado, Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1116

- Avilés, M. J., Mendoza, F. O., Romero, B. L., Serrano, C. A. y Ortega, F. (2017). Aspergilosis diseminada por *Aspergillus flavus* en un paciente pediátrico con leucemia linfoblástica aguda de reciente diagnóstico. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México*, 74(5), 370-381. <https://doi.org/10.1016/j.bmhix.2017.05.003>
- Bowers, R. M., Clements, N., Emerson, J. B., Wiedinmyer, C., Hannigan, M. P. y Fierer, N. (2013). Seasonal Variability in Bacterial and Fungal Diversity of the Near-Surface Atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12097-12106. <https://doi.org/10.1021/es402970s>
- Bush, L. M. y Vazquez-Pertejo, M. T. (2022). Infecciones por *Pseudomonas* y patógenos relacionados. En *Manual MSD. Versión para profesionales*. Merck Sharp and Dohme. <https://www.msdmanuals.com/es-co/professional/enfermedades-infecciosas/bacilos-gramnegativos/infecciones-por-pseudomonas-y-pat%C3%B3genos-relacionados>
- Cabra-Rodríguez, R., Tenorio-Abreu, A. y Zakariya-Yousef, I. (2018). Infección por *Candida parapsilosis* en paciente con trasplante corneal. *Revista Española de Quimioterapia*, 31(3), 285-287.
- Cox, J., Mbareche, H., Lindsley, W. G. y Duchaine, C. (2019). Field sampling of indoor bioaerosols. *Aerosol Science and Technology*, 54(5), 572-584. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1688759>
- Cruz, A. T., Cazacu, A. C. y Allen, C. H. (2007). *Pantoea agglomerans*, a Plant Pathogen Causing Human Disease. *Journal of Clinical Microbiology*, 45(6), 1989-1992. <https://doi.org/10.1128/jcm.00632-07>
- Earl, A. M., Losick, R. y Kolter, R. (2008). Ecology and genomics of *Bacillus subtilis*. *Trends in Microbiology*, 16(6), 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2008.03.004>
- EcuRed. (2021a). *Aspergillus flavus*. *EcuRed*. https://www.ecured.cu/Aspergillus_flavus
- EcuRed. (2021b). *Cladosporium*. *EcuRed*. <https://www.ecured.cu/Cladosporium>
- EcuRed. (2021c). Hongo *Mucor*. *EcuRed*. https://www.ecured.cu/Hongo_Mucor
- Ezechukwu, I., Singal, M. y Igbinosa, O. (2019). *Aerococcus viridans*: Case Report, Microbiology, and Literature Review. *American Journal of Case Reports*, 20, 697-700. <https://doi.org/10.12659/ajcr.914866>
- Fariñas, M. C., Fernández-Sampedro, M. y Armiñanzas, C. (2012). Formas clínicas y tratamiento de las infecciones causadas por otros hongos filamentosos. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 30(7), 414-419. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2012.02.001>

- García, C. (2013). Bacteremia por *Staphylococcus epidermidis* y absceso de partes blandas en un paciente postoperado: Reporte de un caso. *Revista Medica Herediana*, 14(4), 221. <https://doi.org/10.20453/rmh.v14i4.710>
- Heidt, J., Papaloukas, N. y Timmerman, C. P. (2019). A rare bloodstream infection: *Bacillus mycoides*. *The Netherlands Journal of Medicine*, 77(6), 227-230.
- Jo, W. K. y Seo, Y. J. (2005). Indoor and outdoor bioaerosol levels at recreation facilities, elementary schools, and homes. *Chemosphere*, 61(11), 1570-1579. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.103>
- Karimpour, S., Godini, H., Nikmanesh, B., Bakhshi, H., & Charsizadeh, A. (2019). Study on the relationship between the concentration and type of fungal bio-aerosols at indoor and outdoor air in the Children's Medical Center, Tehran, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), 48. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7183-4>
- Koerner, R. J., Goodfellow, M. y Jones, A. L. (2009). The genus *Dietzia*: a new home for some known and emerging opportunist pathogens. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, 55(3), 296-305. <https://doi.org/10.1111/j.1574-695x.2008.00513.x>
- Lee, T., Grinshpun, S. A., Martuzevicius, D., Adhikari, A., Crawford, C. M., Luo, J. y Reponen, T. (2006). Relationship between indoor and outdoor bioaerosols collected with a button inhalable aerosol sampler in urban homes. *Indoor Air*, 16(1), 37-47. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00396.x>
- Liu, G., Yin, J., Han, B., Barkema, H. W., Shahid, M., De Buck, J., Cobo, E. R., Kastelic, J. P. y Gao, J. (2019). Adherent/invasive capacities of bovine-associated *Aerococcus viridans* contribute to pathogenesis of acute mastitis in a murine model. *Veterinary Microbiology*, 230, 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2019.02.016>
- Liu, H., Zhang, X., Zhang, H., Yao, X., Zhou, M., Wang, J., He, Z., Zhang, H., Lou, L., Mao, W., Zheng, P. y Hu, B. (2018). Effect of air pollution on the total bacteria and pathogenic bacteria in different sizes of particulate matter. *Environmental Pollution*, 233, 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.070>
- Liu, X. Y., Wang, B. J., Jiang, C. Y., & Liu, S. J. (2007). *Micrococcus flavus* sp. nov., isolated from activated sludge in a bioreactor. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 57(1), 66-69. <https://doi.org/10.1099/ij.s.0.64489-0>
- Martí, M. C. (2004). *NTP 299: Método para el recuento de bacterias y hongos en aire*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Merck. (2012). *MAS-100, Microbial Air Monitoring Systems*. Merck Millipore.

- Miletto, M. y Lindow, S. E. (2015). Relative and contextual contribution of different sources to the composition and abundance of indoor air bacteria in residences. *Microbiome*, 3(1), 61. <https://doi.org/10.1186/s40168-015-0128-z>
- Nagorny, S. A., Aleshukina, A. V., Aleshukina, I. S., Ermakova, L. A. y Pshenichnaya, N. Y. (2019). The application of proteomic methods (MALDI-TOF MS) for studying protein profiles of some nematodes (dirofilaria and ascaris) for differentiating species. *International Journal of Infectious Diseases*, 82, 61-65. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2019.02.047>
- Orden-Martínez, B., Martínez-Ruiz, R. y Millán-Pérez, R. (2008). ¿Qué estamos aprendiendo de *Staphylococcus saprophyticus*? *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 26(8), 495-499. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00396.x>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1988). *Indoor air quality: biological contaminants*. OMS.
- Palmisano, M. M., Nakamura, L. K., Duncan, K. E., Istock, C. A. y Cohan, F. M. (2001). *Bacillus sonorensis* sp. nov., a close relative of *Bacillus licheniformis*, isolated from soil in the Sonoran Desert, Arizona. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 51(5), 1671-1679. <https://doi.org/10.1099/00207713-51-5-1671>
- Pérez, S., Recio, J., Peña, A., Cabrera, J., Chueca, N. y García, F. (2015). *Aerococcus urinae*: a rare pathogen in urinary tract infections, associated with patients with underlying urinary pathology. *Actualidad médica*, 100(796), 124-127. <https://doi.org/10.15568/am.2015.796.or03>
- Pichinoty, F. (1984). Description de la souche type de *Bacillus badius*. *Annales de l'Institut Pasteur / Microbiologie*, 135(1), 21-27. [https://doi.org/10.1016/s0769-2609\(84\)80039-3](https://doi.org/10.1016/s0769-2609(84)80039-3)
- Pitt, T., Malnick, H., Shah, J., Chattaway, M., Keys, C., Cooke, F. y Shah, H. (2007). Characterisation of *Exiguobacterium aurantiacum* isolates from blood cultures of six patients. *Clinical Microbiology and Infection*, 13(9), 946-948. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2007.01779.x>
- Ruiz-Gil, T., Acuña, J. J., Fujiyoshi, S., Tanaka, D., Noda, J., Maruyama, F. y Jorquera, M. A. (2020). Airborne bacterial communities of outdoor environments and their associated influencing factors. *Environment International*, 145, 106156. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106156>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2021). *Informe anual de calidad del aire de Bogotá 2020*. Secretaría Distrital de Ambiente. <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/120721%20Informe%20Anual%20de%20Calidad%20del%20Aire%20A%20C3%B1o%202020%20v2.pdf>

- Usó, J., Gil, M., Gomila, B. y Tirado, M. D. (2003). Endocarditis por *Micrococcus luteus*. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 21(2), 117. [https://doi.org/10.1016/S0213-005X\(03\)72895-X](https://doi.org/10.1016/S0213-005X(03)72895-X)
- van Leuken, J., Swart, A., Havelaar, A., van Pul, A., van der Hoek, W. y Heederik, D. (2016). Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock – A review to inform risk assessment studies. *Microbial Risk Analysis*, 1, 19-39. <https://doi.org/10.1016/j.mran.2015.07.002>
- Vircell. (2021). *Aspergillus fumigatus*. *Vircell*. <https://www.vircell.com/enfermedad/34-aspergillus-fumigatus/>
- Walsh, T. J., Anaissie, E. J., Denning, D. W., Herbrecht, R., Kontoyiannis, D. P., Marr, K. A., Morrison, V. A., Segal, B. H., Steinbach, W. J., Stevens, D. A., van Burik, J. A., Wingard, J. R. y Patterson, T. F. (2008). Treatment of Aspergillosis: Clinical Practice Guidelines of the Infectious Diseases Society of America. *Clinical Infectious Diseases*, 46(3), 327-360. <https://doi.org/10.1086/525258>
- Xu, C., Wei, M., Chen, J., Wang, X., Zhu, C., Li, J., Zheng, L., Sui, G., Li, W., Wang, W., Zhang, Q. y Mellouki, A. (2017). Bacterial characterization in ambient sub-micron particles during severe haze episodes at Ji'nan, China. *Science of The Total Environment*, 580, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.145>
- Zavieh, F. S., Mohammadi, M. J., Vosoughi, M., Abazari, M., Raesee, E., Fazlzadeh, M., Geravandi, S. y Behzad, A. (2021). Assessment of types of bacterial bio-aerosols and concentrations in the indoor air of gyms. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(5), 2165-2173. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00774-1>
- Zoran, M. A., Savastru, R. S., Savastru, D. M. y Tautan, M. N. (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Science of The Total Environment*, 738, 139825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>

Investigación en contaminantes químicos

Medición del riesgo a la salud por cadmio y plomo en material particulado en un municipio industrial de Boyacá, Colombia

MARÍA FERNANDA TORRES HERRERA
ANDREA ESTEFANÍA SILVA ATUESTA
NIDIA ISABEL MOLINA GÓMEZ
MIGUEL ÁNGEL DÍAZ SALAS
JOHAN ALEXANDER ÁLVAREZ BERRIO
LUIS CAMILO BLANCO BECERRA

Objetivo

Determinar las concentraciones de cadmio y plomo en material particulado en el municipio de Nobsa, Boyacá y sus posibles implicaciones para la salud.

Metodología

Características del lugar de estudio

El municipio de Nobsa es uno de los municipios del departamento de Boyacá, tiene una superficie de 53 km² y alberga una población de 14 969 habitantes; se encuentra a una altura de 2500 m s. n. m., con coordenadas geográficas de latitud 5.77177, longitud -72.9405, latitud 5° 46' 18" norte y longitud 72° 56' 26" oeste. La temperatura media anual es de 13.2 °C, con una precipitación de 1168 mm (Municipios de Colombia, 2021). El municipio es de interés para la economía del departamento de Boyacá, debido a que allí se concentra la industria de extracción y transformación de materias primas, industrias metalúrgicas, de construcción y de

fabricación de productos cerámicos, la minería de extracción y transformación de la roca caliza, además de contar con empresas dedicadas a la fundición de metales ferrosos y el procesamiento de minerales para la producción de cemento, las cuales en sus actividades económicas incluyen operaciones que generan y emiten contaminantes del aire, dado el proceso productivo que allí se practica (Alcaldía Municipal de Nobsa, 2012). Nobsa presenta un conflicto socioambiental, en el cual la producción artesanal de cal, una de las mayores fuentes de empleo, ha generado altos impactos en el ambiente; los pobladores establecidos cerca del complejo industrial Paz del Río señalan que se exponen a elevadas concentraciones de contaminantes del aire; a su vez, en el municipio se han identificado afectaciones en la salud de la población relacionados con enfermedades respiratorias, del sistema nervioso y afectaciones en la piel (Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental [ICTA], 2015).

Sitios de monitoreo en el municipio

Se realizó una campaña de muestreo de exposición personal a material particulado en campo entre el 4 y el 7 de septiembre de 2018. Durante los días de monitoreo se contó con dos puntos de monitoreo por día (figura 8), el primero fue un punto fijo (norte) todos los días, mientras el segundo fue un punto móvil, el cual cambió de ubicación cada día de monitoreo en la zona de estudio (este, oeste, noreste y sur). Los sitios de monitoreo presentaban las siguientes características:

- Norte: zona residencial, bajo flujo vehicular.
- Este: zona residencial, bajo flujo vehicular, presencia de zonas verdes.
- Oeste: zona residencial, alto flujo vehicular, sin zonas verdes.
- Noreste: alto flujo vehicular, con zonas verdes.
- Sur: alto flujo vehicular, zona de actividad industrial.

Los lugares se seleccionaron a partir de los resultados previos del estudio desarrollado por Mateus-Deaza (2018) en este municipio. Los contaminantes monitoreados en cada punto fueron partículas suspendidas

totales (PST) de los metales plomo y cadmio, en intervalos de 8 horas, considerando las franjas horarias de 00:00-08:00; 08:00-16:00 y 16:00-00:00, mientras para material particulado menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) se contó con un registro de concentración continuo durante las 24 horas.

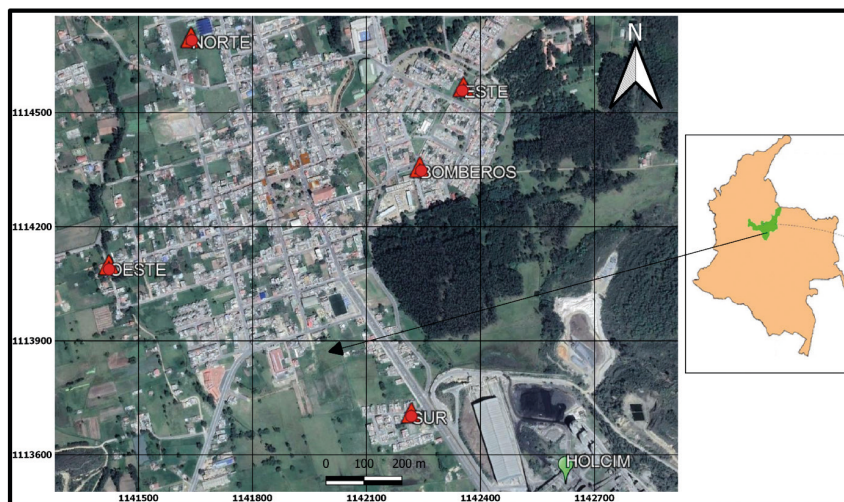


Figura 8. Localización de la zona de estudio, con los puntos de muestreo

Fuente: google earth, 18 de enero de 2022, <https://earth.google.com/web/search/Nobsa,+Boyac%C3%A1/@5.77034159,-72.93886252,2497.24136766a,1334.21841443d,35y,0.00000001h,44.97222238t,0r/>

Equipos empleados para la medición de contaminantes

La medición de la exposición personal a $PM_{2.5}$ se realizó mediante el equipo portátil de monitoreo de bajo costo Airbeam, el cual utiliza el método de dispersión de luz para medir partículas finas por segundo, manejando un flujo de aire de $0.012 \text{ m}^3/\text{min}$ (Habitat Map, 2019). Para la toma de muestras de las concentraciones de PST y las trazas de plomo y cadmio contenidas en el aire, se emplearon bombas de muestreo personal de referencia Gil Air 3 Básica, las cuales disponían de un filtro de fibra de cuarzo para determinar metales, operando a un flujo de $0.0015 \text{ m}^3/\text{min}$ (Ministerio de Trabajo y Economía Social de España, 2006). El muestreo

se realizó en una jornada continua de 24 horas por los cuatro días de monitoreo, realizando cambio de filtro cada 8 horas por punto para las bombas personales. Para la determinación de las concentraciones de plomo y cadmio, se utilizaron las metodologías IO3.1 (U.S. Environmental Protection Agency [US EPA], 1999a) y IO3.5 (US EPA, 1999b) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Análisis estadístico de los datos obtenidos en campo

Los resultados del monitoreo registrados por el equipo AirBeam segundo a segundo se agregaron en unidades de $\mu\text{g}/\text{min}$. A partir de esta información se realizó un análisis descriptivo seguido de un análisis del comportamiento horario de los datos, comparando los datos entre los puntos de monitoreo, además de la tendencia en la concentración del $\text{PM}_{2.5}$. Para los filtros de PST obtenidos de las bombas de exposición personal, se realizó un análisis utilizando el método de determinación de material particulado en aire-método gravimétrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008). Con los resultados de concentración en peso ($\mu\text{g}/\text{kg}$) de plomo y cadmio, obtenidos de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, se calcularon las concentraciones en 8 horas y 24 horas para cada uno de estos metales, además de aquellas de PST.

Medición del riesgo a la salud

Con el fin de estimar el riesgo cancerígeno y no cancerígeno por la exposición a plomo y cadmio en la población del municipio de Nobsa, se estimó la exposición por inhalación en el material particulado de acuerdo con el método establecido por la US EPA (2011). La concentración de exposición (ExpC , $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y la caracterización del riesgo (RNC, adimensional) no cancerígeno y cancerígeno (RC, adimensional) de los metales fue calculado con las ecuaciones 1, 2 y 3, respectivamente (US EPA, 2011).

$$ExpC = (C \times ET \times EFR \times ED) / (AT) \quad (1)$$

$$RNC = ExpC / Rfcinh \quad (2)$$

$$RC = ExpC \times IUR \quad (3)$$

Donde: C es la concentración del metal en el material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ET es el tiempo de exposición (horas/día), EFR es la frecuencia de exposición (días/año), ED es la duración de la exposición (años) y AT es el promedio de vida (horas = años \times 365 días/año \times 24 horas/día); IUR es la unidad de riesgo de inhalación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)⁻¹ obtenido del sistema de riesgo integrado (IRIS) (US EPA, 2021).

Modelos de dispersión y geoespacial de los contaminantes

Para el modelo de dispersión de los contaminantes $\text{PM}_{2.5}$, cadmio y plomo, se utilizaron los softwares Screen View 4.0 y WRPLOT View, pertenecientes al paquete de Lakes Environmental Software (2021). Para la generación de la rosa de vientos durante los cuatro días de monitoreo y sobre la totalidad del área de estudio, se utilizaron los datos de las variables meteorológicas velocidad y dirección del viento, de la estación meteorológica de Sogamoso, la cual se encuentra a 3.2 km de distancia del municipio de Nobsa, siendo esta la única estación disponible para establecer el comportamiento de los vientos en la zona de estudio. Mediante el software WRPLOT View se obtuvo la representación de la dirección de los vientos y su origen.

La representación del modelo geoespacial se realizó por medio del programa de generación de superficies tridimensionales Surfer (Golden Software, 2021); este programa ha sido utilizado para la generación de mapas de concentración de contaminantes criterio, empleando el uso de una escala normalizada de colores, que permite la representación comparativa y la distribución de los contaminantes, utilizando el método de cuadrícula en este caso, con el algoritmo de inverso de la distancia desde el origen, lo que generó un mapa de dispersión geoespacial para cada contaminante, que al superponerlo con un mapa de cuadrícula vectorial

permitió observar las zonas más afectadas y analizar la dirección de movilidad de los contaminantes en estudio.

Una vez terminado el proceso de georreferenciación, se generaron los modelos geoespaciales para cada uno de los contaminantes, mediante los programas Surfer y ArcGIS (Esri, s. f.); en Surfer se realizaron los modelos de concentración y de dispersión de contaminantes, los cuales se exportaron al programa ArcGIS 10.5 para generar los mapas de dispersión de cada uno de los contaminantes en estudio.

Aplicación

El medio ambiente está en la base del bienestar del hombre. Un diagnóstico apropiado de las condiciones ambientales en las que el hombre vive, trabaja y desarrolla diversas actividades, permite comprender oportunidades de mejora, así como establecer acciones para proveer una mejor calidad de vida, desde la implementación de medidas tanto en las fuentes generadoras de emisiones y contaminantes al aire, hasta medidas asociadas al tratamiento de la enfermedad en caso de que sea necesario. Es así como, desde la ingeniería ambiental y por medio de la integración de diversas herramientas de recolección de información con equipos de monitoreo personal, de monitoreo ambiental y del reconocimiento de la zona de estudio en el análisis espacial del territorio, es posible establecer una evaluación de posibles riesgos a la salud por exposición a contaminantes como los metales pesados y el material particulado. El ingeniero ambiental debe identificar las causas de los problemas en el bienestar de la población, al ser el hombre el eje central de las actuaciones en el ámbito de la sostenibilidad. Tanto el procedimiento, la aplicación numérica y el análisis de la información, como los resultados generados en esta sección, pueden ser aplicados a otros territorios, y suponen un aporte en la planificación territorial, clave en el quehacer del ingeniero ambiental.

Discusión

Resultados

- Concentraciones de $PM_{2.5}$ de plomo y cadmio

Las concentraciones 24 horas de $PM_{2.5}$ registradas en los cinco puntos de monitoreo no excedieron el valor diario establecido en la guía de calidad del aire de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sugerido por la OMS, mientras que el 100 % ($n = 8$) sobrepasaron el valor anual de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendado por esta organización. El promedio de 24 horas de $PM_{2.5}$ para el municipio fue de $8.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (tabla 11). Al realizar el análisis por franjas horarias se encontró que el valor promedio para el municipio por franjas de 8 horas fue de $14.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desviación estándar [DE] = ± 4.83), $6.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DE = ± 2.87) y $4.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DE = ± 1.73) entre las 00:00-08:00, 08:00-16:00 y 16:00-00:00, respectivamente. La prueba de correlación de Pearson entre los diferentes puntos de muestreo encontró una correlación entre los puntos, siendo todos estadísticamente significativos ($p < 0.05$).

Las concentraciones de plomo y cadmio en 24 horas en los diferentes puntos de monitoreo no superaron los valores anuales de calidad del aire de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5 \text{ng}/\text{m}^3$ de la OMS; el promedio de los metales para el municipio en 24 horas fue de $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.11 \text{ng}/\text{m}^3$, respectivamente. El valor promedio de plomo en el municipio en todas las franjas de 8 horas fue de $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras para cadmio fue de $0.074 \text{ng}/\text{m}^3$ (DE = ± 0.056), $0.096 \text{ng}/\text{m}^3$ (DE = ± 0.069) y $0.133 \text{ng}/\text{m}^3$ (DE = ± 0.198) para las franjas horarias de 00:00-08:00, 08:00-16:00 y 16:00-00:00, respectivamente.

Tabla 11. Concentraciones cada 8 horas y 24 horas de $PM_{2,5}$ de plomo y cadmio en los diferentes puntos de muestreo en el municipio de Nobsa, Boyacá (2018)

Contaminante	Día	Punto	n	Franja horaria (8 horas)			24 horas	DE
				00:00-08:00	08:00-16:00	16:00-00:00		
$PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1	Fijo	24	8.40	3.11	3.09	5.42	3.71
	2	Fijo	24	8.23	4.21	3.63	6.49	5.44
	3	Fijo	24	21.40	10.33	6.51	13.23	7.36
	4	Fijo	24	15.98	5.14	3.62	9.25	7.45
	1	Este	24	10.09	4.91	2.56	6.13	3.82
	2	Oeste	24	13.73	5.48	3.77	8.59	5.94
	3	Noreste	24	16.77	11.11	7.52	12.25	4.99
	4	Sur	24	18.19	6.29	4.77	10.77	7.86
Plomo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1	Fijo	1	0.005	SD	SD	0.005	SD
	2	Fijo	1	SD	SD	0.006	0.006	SD
	3	Fijo	1	0.003	SD	SD	0.003	SD
	4	Fijo	0	SD	SD	SD	SD	SD
	1	Este	0	SD	SD	SD	SD	SD
	2	Oeste	2	0.003	0.007	SD	0.005	0.003
	3	Noreste	3	0.004	0.001	0.002	0.002	0.002
	4	Sur	0	SD	SD	SD	SD	SD
Cadmio (ng/m^3)	1	Fijo	2	0.120	0.064	SD	0.092	0.040
	2	Fijo	2	SD	0.116	0.537	0.327	0.298
	3	Fijo	3	0.021	0.036	0.047	0.035	0.013
	4	Fijo	2	0.027	SD	0.076	0.052	0.034
	1	Este	2	SD	0.110	0.051	0.080	0.042
	2	Oeste	2	0.145	0.082	SD	0.113	0.044
	3	Noreste	3	0.060	0.031	0.038	0.043	0.015
	4	Sur	2	SD	0.232	0.051	0.142	0.129

Nota: n: número de observaciones; DE: desviación estándar; SD: sin dato.

Fuente: elaboración propia.

• Medición del riesgo a la salud

El riesgo a la salud se estimó para los ciclos de vida establecidos para Colombia por el Ministerio de Salud y Protección Social: infancia (primera infancia: 0-5 años, infancia: 6-11 años), juventud (adolescencia: 12-18 años, juventud: 14-26 años) y adultos (adulthood: 27-59 años y envejecimiento y vejez: 60 años o más). Se observó un riesgo cancerígeno por la exposición al plomo en los mayores de 27 años, utilizando un periodo de exposición de 4 días al año, tiempo en el cual se llevó a cabo el monitoreo en el municipio de Nobsa (tabla 12). Al emplear un periodo de exposición de 365 días, el riesgo cancerígeno para este metal se encontró en todos los ciclos de vida evaluados, siendo de 2.8 para infancia, 7 en juventud y 1.12×10^2 en adultez. Para el cadmio no se evidenció riesgo cancerígeno o no cancerígeno por exposición.

Tabla 12. Riesgo cancerígeno y no cancerígeno por exposición a plomo y cadmio en Nobsa, Boyacá (2018)

Contaminante	Parámetro	Unidades	Valores			
			Infancia	Juventud	Adultos	
Cadmio	ExpC	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	9.80×10^{-08}	2.45×10^{-07}	3.92×10^{-07}	
	RNC		9.80×10^{-06}	2.45×10^{-05}	3.92×10^{-05}	
	RC		5.45×10^{-05}	1.36×10^{-04}	2.18×10^{-04}	
Plomo	ExpC	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	3.68×10^{-06}	9.20×10^{-06}	1.47×10^{-05}	
	RNC		1.84×10^{-06}	4.60×10^{-06}	7.36×10^{-06}	
	RC		3.07×10^{-01}	7.67×10^{-01}	1.23	
PM _{2.5}	ExpC	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	7.36×10^{-03}	1.84×10^{-02}	2.94×10^{-02}	
Parámetros utilizados		Sigla	Unidades	Infancia	Juventud	Adultos
Tiempo de exposición	ET	horas/día			24	
Frecuencia de exposición	EFR	días/año			4 ^a	
Duración de la exposición	ED	años	6	15		24
Tiempo promedio de exposición	AT	horas			$74^b \times 365 \times 24$	

Contaminante	Parámetro	Unidades	Valores		
			Infancia	Juventud	Adultos
Unidad de riesgo por inhalación (IUR)	Cadmio	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		1.80×10^{-3}	
	Plomo	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		1.2×10^{-5}	
Concentración referencia por inhalación (Rfc _{inh})	Cadmio	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		1×10^{-2}	
	Plomo	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		2	

Nota: a: este estudio (días de monitoreo); b: tiempo de expectativa de vida en Colombia.

Fuente: elaboración propia.

- Modelo geoespacial de los contaminantes.

El proceso de generación del modelo geoespacial inicia con la etapa de georreferenciación de los puntos de muestreo (figura 8) mediante el rastreo satelital en campo en cada uno de los puntos los días de toma de muestras, los datos se procesaron y se transformaron para determinar las coordenadas planas en el actual datum de referencia para Colombia (Magna Sirgas). Una vez calculadas las coordenadas de cada uno de los puntos, estos sirvieron como puntos de control con el fin de permitir la georreferenciación de la cartografía base y de las imágenes aéreas.

Posteriormente, los datos georreferenciados fueron incorporados a la base numérica junto al valor de las concentraciones de los contaminantes cada ocho (8) horas, teniendo en cuenta la totalidad del área de influencia monitoreada, con el fin de modelar las concentraciones de los metales monitoreados junto con el flujo de dispersión de estos (figura 9).

Como resultado del proceso de modelación y su relación con el flujo de los vientos para el municipio de Nobsa, se observa que los vientos tienen su origen al sur del casco urbano, manteniendo un comportamiento de movilidad de sur a noreste, impactando directamente el arrastre y dispersión de los contaminantes en la zona de monitoreo, afectando de forma directa el flujo de los contaminantes hacia los puntos ubicados en el este y en el punto bomberos, que son los que representan las mayores concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$.

En cuanto al PST , se encontró que existe una mayor concentración alrededor del punto de monitoreo norte, con dirección de flujo oeste-este afectando a los puntos este y bomberos; para el plomo se encontró que el punto de mayor concentración se encuentra cercano al punto oeste, con una dirección de flujo suroeste noreste, incrementando el registro alrededor del punto bomberos, mientras el cadmio registró el punto sur como el de mayor concentración, con dirección de flujo sur noroeste, afectando a la totalidad del casco urbano del municipio.

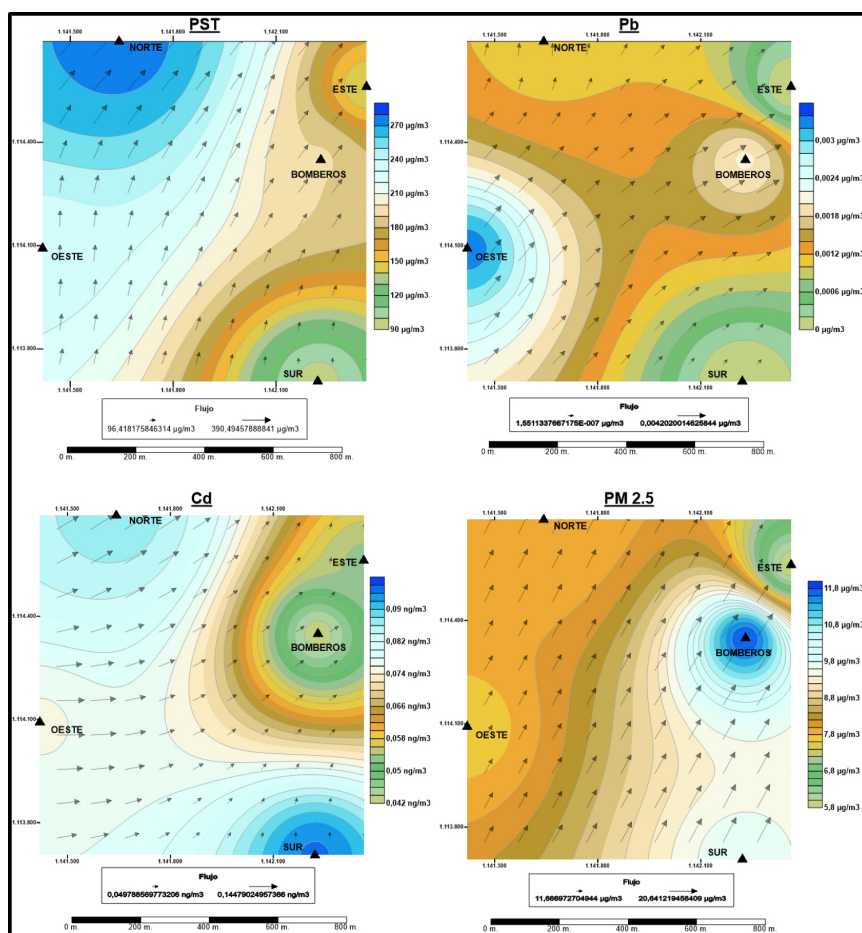


Figura 9. Modelo geoespacial de distribución de PST , Cd , Pb y $\text{PM}_{2.5}$

Fuente: elaboración propia.

Discusión de resultados

El presente estudio estableció las concentraciones personales de $PM_{2.5}$, plomo y cadmio en el municipio de Nobsa, Boyacá, el cual se caracteriza por su actividad industrial, minera y artesanal. Se evidenció que los niveles de inmisión de los contaminantes no superan los valores guía recomendados por la OMS para los metales, pero si exceden la concentración anual de $PM_{2.5}$ sugerida por esta misma entidad (OMS, 2021). Estudios llevados a cabo en otros países, que utilizaron equipos de exposición personal a tiempo real para la medición de $PM_{2.5}$ han encontrado resultados similares a los del presente estudio. En Vietnam el promedio en 24 horas de $PM_{2.5}$ registrado en turistas fue de $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Pant et ál., 2018); mientras que en Gotemburgo, Suecia, la concentración registrada en población general fue de $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Johannesson et ál., 2007); finalmente, en Canadá se obtuvieron concentraciones en 24 horas de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en verano y $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en invierno (Wheeler et ál., 2011). Estos valores se encuentran en el rango o cerca a los valores obtenidos en esta investigación, los cuales se localizaron entre 5.42 y $13.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$; la similitud en los niveles se puede justificar en cuanto a que las concentraciones obtenidas en el presente estudio se llevaron a cabo en sitios sin fuentes de $PM_{2.5}$ de gran importancia, siendo más relevante la presencia de partículas de mayor tamaño dentro de las PST.

En relación con las concentraciones de plomo y cadmio medidas en las PST, estudios han evidenciado valores superiores a los registrados en el presente trabajo. En Ciudad de México se encontró un valor promedio de plomo en 24 horas de $0.435 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Riveros-Rosas et ál., 1997); mientras en Estocolmo, Suecia, las concentraciones de plomo y cadmio fueron de $0.064 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.80 \text{ ng}/\text{m}^3$, respectivamente (Vahter et ál., 1991); en el presente estudio se obtuvieron valores de 24 horas de $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para plomo y de $0.11 \text{ ng}/\text{m}^3$ para cadmio, lo cual evidencia que aún dadas las características industriales del municipio de Nobsa, este no dispone de fuentes que emitan en gran proporción este tipo de metales al aire. En cuanto al riesgo cancerígeno de los metales estudiados, para el cadmio no se evidenció ningún riesgo a la salud, mientras para el plomo, que es considerado como posiblemente carcinógeno para el ser humano (grupo 2B de la clasificación de la Agencia Internacional para la

Investigación del Cáncer), se encontró un riesgo a la salud en el ciclo de vida de los adultos, cuyos valores estuvieron cercanos y algunos mayores a 1. Estudios llevados a cabo en otros países han evaluado el riesgo a varios metales, dentro de los cuales se encuentran los analizados en este trabajo. En Kazajistán se evidenció riesgo cancerígeno para cadmio en la ciudad de Baljash, con un valor de 1.73×10^1 , mientras para plomo el máximo valor se registró en la ciudad de Taraz, con un valor de 1.09×10^{-1} (Kenessary et ál., 2019).

Dentro de las fortalezas del presente trabajo se señala el uso de equipos de medición a tiempo real de exposición personal, los cuales se aproximan de mejor forma a lo que verdaderamente está expuesta la población, además de mostrar los cambios por minuto en las concentraciones del $PM_{2.5}$. Los equipos que son utilizados en la mayoría de los estudios suministran niveles de exposición a alturas en las cuales la población no realiza sus actividades diarias, subestimando o sobreestimando los niveles de inmisión (Chen et ál., 2019); esta misma fortaleza se identifica para la medición de plomo y cadmio, la cual se realizó cada 8 horas, permitiendo evaluar franjas horarias y promedios las 24 horas. Este trabajo es innovador en la medida en que considera la distancia de deposición del material particulado, para ubicar puntos de monitoreo que son contrastados en las diferentes direcciones del viento en donde el material particulado y trazas de metales pesados pueden afectar a la población. Se trata de un estudio que describe un comportamiento de contaminantes en zonas residenciales, industriales y de diferentes categorías de uso en un municipio de vocación industrial, que pueden inducir un peligro para la salud de la población infantil y adulta expuesta, lo cual se evidenció por los valores obtenidos en el cálculo del riesgo.

Dentro de las limitaciones se señalan los pocos días de medición, lo que estaba condicionado al cuidado de los equipos por parte de los investigadores, quienes permanecían durante periodos de 8 horas en cada punto, para posteriormente ser relevados por otro grupo, teniendo jornadas de 16 horas por día. El disponer de un mayor número de mediciones permitiría evidenciar episodios puntuales que exhibieran valores de los contaminantes que puedan presentar un efecto en la salud de los habitantes del municipio, lo cual permitiría una mayor muestra de datos que sería estadísticamente representativa. Otra de las falencias fue

no disponer de datos meteorológicos en la zona de estudio para tener un acercamiento a las condiciones de microclima que afectan al municipio y que son importantes a la hora de establecer la exposición de la población a los contaminantes objeto de esta investigación.

Conclusiones

- Los niveles de $PM_{2.5}$ diarios no exceden el valor guía recomendado por la oms. Sin embargo, al comparar con el promedio anual, todos los puntos de monitoreo sobrepasan el valor recomendado, lo que refleja que la exposición crónica al contaminante es la que tiene mayor trascendencia en la población de Nobsa.
- Aunque las concentraciones de metales halladas en el presente estudio cumplen ampliamente la normatividad ambiental nacional e internacional, su vigilancia y monitoreo cobra importancia si se tiene en cuenta una exposición crónica, teniendo en cuenta el principio toxicológico que señala un efecto tóxico aun cuando se está expuesto a bajas concentraciones pero durante largos periodos de exposición, en particular cuando la población expuesta en el municipio cuenta con un gran número de personas en los grupos etarios sensibles.
- Las concentraciones de metales halladas en el presente estudio además de ser bajas podrían presentar un alcance reducido, a diferencia de estudios similares. Esto se justifica posiblemente porque no precipitan muy cerca de las fuentes de emisión, en gran medida por la posible dependencia lineal que tienen con el material particulado (MP), y por la incidencia estacional de las condiciones meteorológicas sobre este, lo que genera que las concentraciones sean más altas en invierno que en verano, en especial para los metales solubles en agua.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Nobsa. (2012). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial. 2001-2011*. Alcaldía de Nobsa.
- Chen, X. C., Chow, J. C., Ward, T. J., Cao, J. J., Lee, S. C., Watson, J. G., Lau, N. C., Yim, S. H. y Ho, K. F. (2019). Estimation of personal exposure to fine particles (PM_{2.5}) of ambient origin for healthy adults in Hong Kong. *Science of The Total Environment*, 654, 514-524. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.088>
- Esri. (s. f.). GIS Mapping Software, Location Intelligence & Spatial Analytics. <https://www.esri.com/en-us/home>
- Golden Software. (2021). Surfer® | 2D & 3D mapping, modeling & analysis software for scientists and engineers. <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>
- Google Earth. (2021). *Nobsa, Boyacá*. Google. <https://earth.google.com/web/search/Nobsa,+Boyac%C3%A1/@5.77034159,-72.93886252,2497.24136766a,1334.21841443d,35y,0.00000001h,0t,0r/data=CigiJgokCTJ9hRg1AzVAES59hR-g1AzXAGUKZxzvpekIAIRCqjvah-EnA>
- Habitat Map. (2019). AirBeam3 User's Guide: Technical Specifications, Operation & Performance. <https://www.habitatmap.org/airbeam/users-guide>
- Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental (ICTA). (2015). Contaminación por producción de cal en Nobsa, Colombia. En *Environmental Justice Atlas*. Universidad Autónoma de Barcelona. <https://ejatlas.org/conflict/contaminacion-en-nobsa-colombia>
- Johannesson, S., Gustafson, P., Molnár, P., Barregard, L. y Sällsten, G. (2007). Exposure to fine particles (PM_{2.5} and PM₁) and black smoke in the general population: personal, indoor, and outdoor levels. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 17(7), 613-624. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500562>
- Kenessary, D., Kenessary, A., Adilgireiuly, Z., Akzholova, N., Erzhanova, A., Dosmukhametov, A., Syzdykov, D., Masoud, A.-R. y Saliev, T. (2019). Air Pollution in Kazakhstan and Its Health Risk Assessment. *Annals of Global Health*, 85(1), 133. <https://doi.org/10.5334/aogh.2535>
- Lakes Environmental Software. (2021). Freeware. Products. <https://www.weblakes.com/download/freeware>
- Mateus-Deaza, J. S. (2018). *Determinación de la concentración de cadmio contenido en material particulado menor a 10 micras y su asociación con enfermedades respiratorias en el municipio de Nobsa - Boyacá* [tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás].

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527540/Manual+para+la+Elaboraci%C3%B3n+de+Planes+de+Gesti%C3%B3n+de+la+Calidad+del+Aire.pdf/27cbbaaf-0ecf-4d86-b0dc-18a2402d694e>
- Ministerio de Trabajo y Economía Social de España. (2006). *Bombas para el muestreo personal de agentes químicos*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. https://www.insst.es/documents/94886/359418/CR_001_A06.pdf/172434fa-bd4e-4500-950c-26fb365a2ea4
- Municipios de Colombia. (2021). Nobsa. <https://www.municipio.com.co/municipio-nobsa.html>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. OMS. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Pant, P., Huynh, W. y Peltier, R. E. (2018). Exposure to air pollutants in Vietnam: Assessing potential risk for tourists. *Journal of Environmental Sciences*, 73, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.01.023>
- Riveros-Rosas, H., Pfeifer, G. D., Lynam, D. R., Pedroza, J. L., Julián-Sánchez, A., Canales, O. y Garfias, J. (1997). Personal exposure to elements in Mexico City air. *Science of The Total Environment*, 198(1), 79-96. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)05446-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)05446-6)
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (1999a). *Compendium Method IO-3.1. Selection, preparation and extraction of filter material*. Center for Environmental Research Information. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/epa-io-3.1.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (1999b). *Compendium Method IO-3.5 Determination of Metals in Ambient Particulate Matter Using Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS)*. Center for Environmental Research Information. <https://www.epa.gov/esam/epa-io-inorganic-compendium-method-io-35-determination-metals-ambient-particulate-matter-using>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (2011). *Exposure Factors Handbook: 2011 Edition*. US EPA.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (2021). Integrated Risk Information System. <https://www.epa.gov/iris>
- Vahter, M., Berglund, M., Lind, B., Jorhem, L., Slorach, S. y Friberg, L. (1991). Personal monitoring of lead and cadmium exposure - a Swedish study with special

reference to methodological aspects. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 17(1), 65-74. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1732>

Wheeler, A. J., Wallace, L. A., Kearney, J., Van Ryswyk, K., You, H., Kulka, R., Brook, J. R. y Xu, X. (2011). Personal, Indoor, and Outdoor Concentrations of Fine and Ultrafine Particles Using Continuous Monitors in Multiple Residences. *Aerosol Science and Technology*, 45(9), 1078-1089. <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.580798>

Parte II. El agua que vivifica y restaura

Como se sabe, el agua es fuente de vida, esta es un factor importante e indispensable para el desarrollo y sustento del hombre y la naturaleza. Por este motivo resulta necesaria para cualquier actividad, desde el soporte biológico del cuerpo humano, las interacciones ecosistémicas, o cualquier actividad económica y social de las poblaciones. “El acceso al agua potable y segura es un derecho humano básico, fundamental y universal, porque determina la sobrevivencia de las personas, y por lo tanto es condición para el ejercicio de los demás derechos humanos” (Francisco, 2015), por lo cual los esfuerzos científicos, académicos y de inversión pública y privada deben garantizar condiciones de calidad que respondan efectivamente a las necesidades de las comunidades en un mundo que amenaza con una oferta reducida del recurso, generada por los efectos del cambio climático y la contaminación excesiva a los cuerpos de agua.

En la actualidad, a pesar de los avances tecnológicos asociados al tratamiento y la distribución de agua, un número importante de personas en el país no cuentan con acceso a agua potable, situación que resulta en múltiples problemas de subsistencia, progreso y desarrollo de las poblaciones y que se contrapone a los fines anhelados de desarrollo. Es por esto por lo que se debe entender que el agua es uno de los elementos fundamentales de la salud pública y que su inadecuada gestión representa

una de las causas asociadas al costo de la salud en Colombia, aproximadamente 1.1 % del producto interno bruto (PIB). Estos costos se relacionan fundamentalmente con las altas tasas de mortalidad y morbilidad atribuibles al consumo de agua en condiciones inadecuadas de calidad y, en menor medida, con los costos de prevención (DNP, 2008).

Otro elemento de análisis corresponde con la heterogeneidad que representa el país en cuanto a la oferta hídrica. El reciente *Estudio Nacional del Agua* muestra una distribución no homogénea en las cinco cuencas hidrográficas, que acogen diferencias significativas y que terminan por definir la vulnerabilidad tanto del sistema natural como de la estructura socioeconómica (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2015). Considerando esto, los nuevos estudios e investigaciones orientados a la seguridad hídrica, al suministro de agua para consumo humano, al saneamiento básico y, en general, a la gestión del recurso hídrico, deben focalizar esfuerzos en brindar soluciones oportunas y precisas para el acceso al agua en contextos geográficos específicos, bajo principios de calidad, cantidad, cobertura y continuidad y, además, con objetivos claros en salud pública.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el capítulo de investigación en calidad de agua y gestión del riesgo se presentan experiencias en la determinación de resistencia microbiana a antibióticos y la aplicación de estudios básicos de valoración de riesgos para la elaboración de planes de seguridad del agua. Estos últimos constituyen una herramienta valiosa en la evaluación y mejora permanente de los sistemas de acueducto, con el objetivo fundamental de garantizar la integridad física de los elementos que los componen y brindar condiciones óptimas de calidad de agua para consumo humano. De este modo, se mitigan los efectos que, en salud pública, genera la inadecuada prestación de los servicios de suministro de agua o la ausencia de mecanismos de contingencia y gestión del riesgo.

Referencias

- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2008, 24 de noviembre). *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* (Documento Conpes 3550). DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3550.pdf>
- Francisco. (2015, 24 de mayo). *Carta encíclica Laudato si' del Santo Padre Francisco sobre el cuidado de la casa común*. Tipografía Vaticana. http://www.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Ideam. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

Investigación en calidad de agua y gestión del riesgo

Escherichia coli resistente a ampicilina y meropenem en un vertimiento hospitalario público de Bogotá, Colombia

EDWIN LEONARDO GUTIÉRREZ ALFONSO
LUIS CAMILO BLANCO-BECERRA

Objetivo

Evaluar la resistencia de *Escherichia coli* a ampicilina y meropenem en el agua residual sin tratamiento y con tratamiento de un hospital público de Bogotá, Colombia.

Metodología

Estudio observacional que seleccionó un hospital público de Bogotá ubicado en la localidad de Suba, el cual posee una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), que dispone de los procesos unitarios de trampa de grasas, homogenización, floculación, sedimentación y filtración, para finalmente depositar el vertimiento al sistema de alcantarillado, sin ningún tipo de tratamiento de desinfección (figura 10).

Se realizó un muestreo del agua residual producida en el hospital durante cinco días diferentes, uno por semana (un día específico cada semana), durante los meses de marzo y abril de 2017, tomando cuatro muestras a la entrada (agua residual no tratada) y cuatro a la salida (agua residual tratada) de la PTAR, obteniendo un total de 40 muestras; en la semana tres, previo al muestreo, se realizó mantenimiento de la PTAR. Para la recolección de las muestras se utilizaron recipientes estériles de

aproximadamente 30 mililitros (ml), los cuales fueron llenados en intervalos de 10 a 15 minutos, siendo transportados en una nevera a una temperatura de 4 °C hasta el respectivo lugar de estudio. No se realizaron análisis fisicoquímicos complementarios con las muestras obtenidas en los monitoreos.

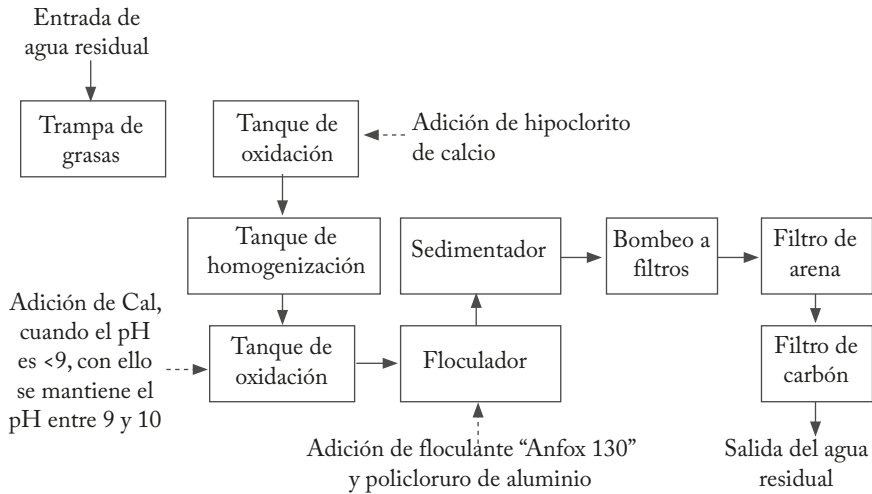


Figura 10. Diagrama de bloques de la planta de tratamiento de agua residual de un hospital público de Bogotá, Colombia

Fuente: elaboración propia.

Medición directa del crecimiento celular

Se utilizó la técnica de recuento de placas y diluciones seriadas (Tortora et ál., 2021). Las muestras obtenidas en los muestreos fueron llevadas a diluciones de 10^{-1} hasta 10^{-10} ml, colocando en un tubo de ensayo de 1 ml del agua residual junto a 9 ml de solución salina. Teniendo en cuenta que en las diluciones mayores o iguales a 10^{-4} ml no se observó desarrollo de unidades formadoras de colonias (UFC), se trabajó únicamente con diluciones menores o iguales de 10^{-3} ml. Posteriormente, en medios de cultivo agar EMB (*Eosin Methalyne Blue Agar*) se sembraron muestras de 0.1 ml de las diferentes diluciones, llevándolas a temperatura constante de 37 °C por 24 horas, para luego realizar el conteo e identificación de UFC de

Escherichia coli, que en este medio presentan una coloración verde metálica. Terminado el proceso de conteo de las placas, para aquellas que registraron entre 30 a 300 colonias se determinó el número de unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/ml) mediante la siguiente fórmula (Tortora et ál., 2021):

$$\text{UFC/ml} = (\text{número de colonias por placa} \times \text{factor de dilución}) / \text{ml de muestra sembrada}$$

Para el aislamiento de cepas, se seleccionó la caja Petri utilizada para el cálculo de las UFC/ml por muestra, sembrándolas posteriormente en medio *Plate Count Agar* (PCA), siendo incubadas durante 24 horas, al cabo de las cuales se realizó tinción de Gram, sembrando finalmente en agar Chromocult.

Pruebas de susceptibilidad a antibióticos

De las cajas de Petri que obtuvieron entre 30 a 300 colonias, se aisló una cepa de *Escherichia coli* a la cual se le realizaron las pruebas de sensibilidad a los antibióticos ampicilina y meropenem, basándose en el procedimiento de difusión en placa descrito por Kirby y Bauer (Hudzicki, 2009), utilizando el medio Muller Hinton. La cepa fue diluida con solución salina estéril o caldo estéril hasta obtener una turbidez equivalente al tubo 0.5 de la escala de McFarland. En las placas de medio Muller Hinton se depositó, en la superficie del agar, 0.1 ml de inóculo con *Escherichia coli*, extendiéndola sobre toda la superficie de las placas, esperando de 5 a 20 minutos con el fin de que el inóculo estuviera seco. Seguidamente, en cada caja de Petri se dispusieron 5 discos del mismo antibiótico (ampicilina o meropenem) marca Liofilchem® en la periferia, y cada disco estaba separado uno del otro con una distancia mínima de 24 milímetros (mm) con el fin de evitar que las zonas de inhibición quedaran superpuestas; finalmente, se procedió a incubar a 35 °C, para leer los hallazgos luego de pasadas 24 horas. La interpretación de los resultados se realizó acorde a lo estipulado en el M100 *Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing* (Clinical and Laboratory Standards Institute [CLSI],

2019). *Escherichia coli* fue clasificada como resistente (R), intermedio (I) o sensible (S) a cada antibiótico de acuerdo con el diámetro de la zona de inhibición alrededor del disco y los estándares de interpretación suministrados por la casa productora de discos. Se midió el diámetro de la zona de inhibición incluyendo los 6 mm del disco, donde una lectura de 6 mm indicaba ausencia de zona de inhibición. Para la interpretación de los resultados de los halos de inhibición por antibiótico se utilizaron los siguientes valores: para ampicilina 10 µg, *Escherichia coli* era resistente si obtenía un valor ≤ 13 mm, intermedio entre 14-16 mm y sensible si era ≥ 17 mm; mientras para meropenem 10 µg, los valores fueron resistente si obtenía un valor ≤ 19 mm, intermedio entre 20-22 mm y sensible si era ≥ 23 mm (CLSI, 2019).

Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis de la varianza (ANOVA), con un nivel de significancia del 0.05, con el fin de establecer si existía diferencia entre las UFC de *Escherichia coli*/ml a la entrada y la salida de la PTAR, además de una desigualdad entre los días de muestreo; así mismo, se estimó la presencia de una diferencia en la resistencia del microorganismo para los dos antibióticos, en función de la localización del punto de muestreo e, igualmente, para el antes y después del mantenimiento en la planta. El análisis estadístico de los datos se realizó en el programa Stata 14.

Aplicación

La presencia de antibióticos en las aguas residuales de centros médicos es una constante dentro de este tipo de vertimientos. El contacto de los microorganismos que conviven naturalmente con el hombre o que son patógenos para el mismo con este tipo de vertimientos ofrece condiciones que permiten que los agentes biológicos adquieran características de resistencia, que los hace menos vulnerables a los antibióticos que normalmente son utilizados para los tratamientos médicos. Es aquí donde el papel del ingeniero ambiental toma relevancia, identificando en primera

instancia si los microorganismos del vertimiento adquieren resistencia a los antibióticos, para diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales en los hospitales que aseguren una desactivación o eliminación del antibiótico en el vertimiento. Esto evita que posibles usos que se le den a estos cuerpos de agua interactúen con los microorganismos presentes en el medio acuático o que, eventualmente, tengan usos agrícolas y de cría de ganado, quienes consumirán el recurso, convirtiéndose en posibles portadores de microorganismos que sean resistentes a los antibióticos que normalmente son utilizados para los tratamientos médicos actuales.

Discusión

Resultados

- Resultados de las UFC de *Escherichia coli*/ml por dilución en el agua residual no tratada y tratada

Para las diluciones del agua residual se encontraron concentraciones mayores de *Escherichia coli* en el agua residual no tratada en comparación con el agua residual tratada. La media de UFC de *Escherichia coli*/ml en el agua residual no tratada para las 17 muestras que contenían entre 30 a 300 colonias (tabla 13) fue de 5.27×10^5 UFC/ml (DE = $\pm 2.36 \times 10^5$), mientras para el agua residual tratada la media de UFC de *Escherichia coli*/ml en las 20 muestras que contenían entre 30 a 300 colonias (tabla 14) fue de 1.72×10^5 UFC/ml (DE = $\pm 2.01 \times 10^5$).

Tabla 13. UFC de *Escherichia coli*/ml en el agua residual no tratada a la entrada de la PTAR de un hospital público de Bogotá, Colombia (2017)

Día	Muestra	Colonias <i>Escherichia coli</i>			UFC <i>Escherichia coli</i> /ml		
		Dilución			Dilución		
		10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³
Día 1	Muestra 1	3000	480	66	300 000	480 000	660 000
Día 1	Muestra 2	3000	654	42	300 000	654 000	420 000
Día 1	Muestra 3	2320	568	51	232 000	568 000	510 000
Día 1	Muestra 4	3000	382	67	300 000	382 000	670 000
Día 2	Muestra 1	3000	654	67	300 000	654 000	670 000
Día 2	Muestra 2	3000	480	67	300 000	480 000	670 000
Día 2	Muestra 3	3000	850	89	300 000	850 000	890 000
Día 2	Muestra 4	3000	753	95	300 000	753 000	950 000
Día 3	Muestra 1	2420	375	58	242 000	375 000	580 000
Día 3	Muestra 2	2347	428	67	234 700	428 000	670 000
Día 3	Muestra 3	2507	574	31	250 700	574 000	310 000
Día 3	Muestra 4	2490	365	62	249 000	365 000	620 000
Día 4	Muestra1	1936	115	26	193 600	115 000	260 000
Día 4	Muestra 2	1193	458	35	119 300	458 000	350 000
Día 4	Muestra 3	2302	185	17	230 200	185 000	170 000
Día 4	Muestra 4	3000	345	25	300 000	354 000	250 000
Día 5	Muestra 1	2636	527	46	263 600	527 000	460 000
Día 5	Muestra 2	2660	320	28	266 000	320 000	280 000
Día 5	Muestra 3	1056	234	25	105 600	234 000	250 000
Día 5	Muestra 4	2324	325	21	232 400	325 000	210 000

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de identificar las diferencias entre el número de UFC/ml y la ubicación del muestreo se realizó un análisis ANOVA de un factor definiendo las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H₀): ¿El número de UFC/ml es igual en los muestreos tomados del agua residual tratada y en los muestreos de agua residual no tratada en la PTAR del hospital público?

Hipótesis alternativa (H₁): ¿El número de UFC/ml es diferente en los muestreos tomados del agua residual tratada y en los muestreos de agua residual no tratada en la PTAR del hospital público?

El análisis ANOVA identificó que existen diferencias estadísticamente significativas entre la ubicación del muestreo y el número de UFC de *Escherichia coli*, con un nivel de significancia menor que 0.05 (tabla 14), rechazando la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alternativa.

Tabla 14. Análisis ANOVA de un factor con variable dependiente las UFC/ml y el factor de la fase del muestreo

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	2 971 676 986 050.125	1	2 971 676 986 050.125	147.329	.000
Dentro de grupos	3 993 739 369 043.750	198	20 170 400 853.756		
Total	6 965 416 355 093.875	199			

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se identificó la existencia o no de diferencias entre el número de UFC/ml y el día de muestreo, mediante un análisis ANOVA de un factor, definiendo las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): ¿El número de UFC/ml es igual entre días?

Hipótesis alternativa (H_1): ¿El número de UFC/ml es diferente entre días?

El análisis identificó que existen diferencias significativas entre el día del muestreo y el número de UFC de *Escherichia coli*, es decir, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa, la cual fue estadísticamente significativa (tabla 15).

Tabla 15. Análisis ANOVA de un factor con variable dependiente las UFC y el factor el día del muestreo

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3 187 372 933 233.250	4	796 843 233 308.313	41.128	.000
Dentro de grupos	3 778 043 421 860.625	195	19 374 581 650.567		
Total	6 965 416 355 093.875	199			

Fuente: elaboración propia.

Las UFC de *Escherichia coli*/ml en las muestras del agua residual tratada tomadas a partir del tercer día (días posteriores al mantenimiento de la PTAR) mostraron una reducción respecto a las concentraciones registradas en los días anteriores al mantenimiento en el efluente de la PTAR (tabla 16).

Tabla 16. UFC de *Escherichia coli*/ml en el agua residual tratada a la salida de la PTAR de un hospital público de Bogotá, Colombia (2017)

Día	Muestra	Colonias UFC <i>Escherichia coli</i>			UFC <i>Escherichia coli</i> /ml		
		Dilución 10 ⁻¹	Dilución 10 ⁻²	Dilución 10 ⁻³	Dilución 10 ⁻¹	Dilución 10 ⁻²	Dilución 10 ⁻³
Día 1	Muestra 1	1740	289	24	174 000	289 000	240 000
Día 1	Muestra 2	1284	132	32	128 400	132 000	320 000
Día 1	Muestra 3	1850	235	18	185 000	235 000	180 000
Día 1	Muestra 4	3000	249	32	300 000	249 000	320 000
Día 2	Muestra 1	1848	371	54	184 800	371 000	540 000
Día 2	Muestra 2	3000	428	36	300 000	428 000	360 000
Día 2	Muestra 3	1826	277	30	182 600	277 000	300 000
Día 2	Muestra 4	3000	630	77	300 000	630 000	770 000
Día 3	Muestra 1	395	116	12	39 500	116 000	120 000
Día 3	Muestra 2	258	24	4	25 800	24 000	40 000
Día 3	Muestra 3	685	42	10	68 500	42 000	100 000
Día 3	Muestra 4	376	92	8	37 600	92 000	80 000
Día 4	Muestra 1	336	47	14	33 600	47 000	140 000
Día 4	Muestra 2	582	36	4	58 200	36 000	40 000
Día 4	Muestra 3	123	45	6	12 300	45 000	60 000
Día 4	Muestra 4	467	124	10	46 700	124 000	100 000
Día 5	Muestra 1	76	12	2	7600	12 000	20 000
Día 5	Muestra 2	320	52	4	32 000	52 000	40 000
Día 5	Muestra 3	145	28	3	14 500	28 000	30 000
Día 5	Muestra 4	186	45	9	18 600	45 000	90 000

Fuente: elaboración propia.

• Resultados de las pruebas de susceptibilidad de *Escherichia coli* a ampicilina y meropenem

Para las pruebas de susceptibilidad de *Escherichia coli* a ampicilina y meropenem, se obtuvieron 17 datos para cada antibiótico en el agua residual no tratada y 20 datos en el agua residual tratada. En el agua residual no tratada se encontró que para ampicilina *Escherichia coli* fue resistente en el 94.1 % y sensible en el 5.9 % de las muestras, mientras en el agua residual tratada el microorganismo fue resistente en el 85 % y sensible en el 15 %. Para meropenem se evidenció que *Escherichia coli* fue resistente en 29.4 % y sensible en 70.6 % en el agua residual no tratada, entretanto en el agua residual tratada fue 35 % resistente, 5 % intermedio y 60 % sensible (tabla 17).

Tabla 17. Resultados de las pruebas de susceptibilidad de *Escherichia coli* a ampicilina y meropenem, en agua residual no tratada y agua tratada de un hospital público de Bogotá, Colombia (2017)

Antibiótico	Agua residual sin tratamiento				Agua residual con tratamiento			
	(n)	R (n)	I (n)	S (n)	(n)	R (n)	I (n)	S (n)
Ampicilina 10 µg ^a								
Día 1	4	4	0	0	4	3	0	1
Día 2	4	4	0	0	4	4	0	0
Día 3	4	4	0	0	4	0	0	4
Día 4	3	4	0	0	4	4	0	0
Día 5	2	0	0	1	4	3	0	1
Total	17	16	0	1	20	14	0	6
Meropenem 10 µg ^b								
Día 1	4	4	0	0	4	2	0	2
Día 2	4	1	0	3	4	2	0	2
Día 3	4	0	0	4	4	2	1	1
Día 4	3	0	0	3	4	1	0	3
Día 5	2	0	0	2	4	0	0	4
Total	17	5	0	12	20	7	1	12

Nota: n: número de muestras.

a. R: Resistente (≤ 13 mm); I: Intermedio (14-16 mm); S: Sensible (≥ 17 mm).

b. R: Resistente (≤ 19 mm); I: Intermedio (20-22 mm); S: Sensible (≥ 23 mm).

Fuente: elaboración propia.

Antes del mantenimiento de la PTAR (día 1 y 2) se encontró que *Escherichia coli* fue resistente en un 75 % y sensible en un 25 % para ampicilina, mientras para los días posteriores al mantenimiento fue resistente en 91.7 % y sensible en 8.3 %. Para meropenem, antes del mantenimiento el microorganismo fue resistente en 50 % y sensible en 50 %, mientras que luego del mantenimiento la resistencia fue de 25 %, fue intermedio en 8.3 % y sensible en 66.7 %. El análisis ANOVA evidenció una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de resistencia entre el agua residual no tratada y el agua residual tratada, además de una diferencia antes y después del manteniendo de la PTAR para los dos antibióticos ($p < 0.05$).

Discusión de resultados

El presente trabajo evaluó la resistencia de *Escherichia coli* a 2 antibióticos usados comúnmente en un hospital público de Bogotá, Colombia, para el manejo de infecciones; este microorganismo fue seleccionado por ser representativo de la flora microbiana del tracto gastrointestinal de animales y humanos, siendo un indicador clásico para la evaluación de la calidad del agua (Jang et ál., 2017). La aparición y continuidad de bacterias resistentes a antibióticos ha sido referenciada en estudios llevados a cabo en aguas residuales de origen hospitalario, que representan un creciente problema de salud pública. El presente trabajo evidenció que ampicilina fue el antibiótico al cual *Escherichia coli* mostró mayor resistencia, con un 94.1 % en el agua residual no tratada y 85 % en el agua residual tratada, mientras que para meropenem la resistencia fue de 29.4 % en agua residual no tratada y 35 % en agua residual tratada, hallazgos equivalentes a los de otras investigaciones en este campo. En Costa Rica, un hospital clase A que vierte sus aguas residuales a una quebrada aledaña mostró resistencia de *Escherichia coli* a ampicilina en un 58 %, concluyendo que en un medio donde existe tendencia hacia la transferencia de genes de resistencia, como es el efluente hospitalario, el uso de estas aguas en actividades agrícolas o de pesca permite la llegada de cepas multirresistentes al ser humano (Tzoc et ál., 2004). Por otro lado, en una institución hospitalaria localizada en León, Nicaragua, se encontró 100 % de resistencia de *Escherichia coli* a ampicilina en un total de 32 muestras, estableciendo que 100 % de los aislamientos del

microorganismos fueron mediados por el mecanismo de betalactamasas de espectro extendido (ESBL), codificando para los genes bla_{CTX-M}, mientras que los genes que codifican para bla_{TEM} y bla_{SHV} solo estuvieron presentes en 44 % y 53 % de las muestras hospitalarias, respectivamente, siendo estos genes posiblemente los mecanismos que conllevan a la resistencia (Amaya et ál., 2012). En Sudáfrica, en un hospital ubicado en el área de Pretoria-Gezina, se aislaron 10 cepas de *Escherichia coli* O157:H7, de las cuales el 60 % fue resistente a ampicilina y 20 % a meropenem (Bolukaoto et ál., 2019). Por su parte, Alam et ál. (2013) aislaron 69 bacterias entéricas en 50 muestras de aguas residuales hospitalarias en las cercanías de la ciudad de Aligarh, India, encontrando que 36.4 % de los coliformes fueron resistentes a ampicilina, siendo *Escherichia coli* resistente en un 83.3 % a este antibiótico; los aislamientos realizados en busca de β-lactamasas encontraron un amplio espectro de estas, las cuales son modificaciones de las enzimas Clase A: TEM y SHV, que han sufrido una serie de mutaciones en distintos sitios, aumentando el tamaño del sitio activo o alterando las características de enlace, lo que permite que las cefalosporinas más grandes ingresen. También, en la ciudad de Dhaka, Bangladesh, se recolectaron muestras de aguas residuales de dos hospitales, evaluando la resistencia de *Escherichia coli* a 10 antibióticos de uso frecuente, encontrando una resistencia para ampicilina de 71 %; por lo que se concluyó que estas cepas podrían ser un depósito potencial para la transferencia de genes resistentes a otros patógenos altamente infecciosos presentes en las aguas residuales (Rabbani et ál., 2017). Los estudios anteriores concuerdan con los resultados obtenidos en la presente investigación con relación a la resistencia de *Escherichia coli*, además de resaltar la importancia de los efluentes hospitalarios como fuentes para la consecución de resistencia bacteriana a antibióticos.

Este trabajo evaluó la resistencia de *Escherichia coli* luego del tratamiento del agua residual, encontrando que el mantenimiento realizado a la PTAR influye en la resistencia del microorganismo; esto se evidenció inicialmente en la reducción de las UFC de *Escherichia coli*/ml presentes en el afluente de la PTAR (tabla 14); sumado a lo anterior, se observó una disminución de la resistencia de *Escherichia coli* antes del mantenimiento (muestreo días 1 y 2), pasando de una resistencia de 100 % y 62.5 % en el agua sin tratamiento a 75 % y 50 % para ampicilina y meropenem, respectivamente, en el agua tratada; al evaluar la resistencia posterior al

mantenimiento de la PTAR (muestreo días 3 al 5), se encontró un comportamiento diferente para los dos antibióticos, evidenciando un aumento en la resistencia de 88.9 % y 0 % antes de la PTAR, a 91.7 % y 25 % en el agua tratada, respectivamente. Lo anterior podría indicar que la falta de mantenimiento en la PTAR puede influir en la reducción o el aumento de la resistencia del microorganismo, ya que la interacción de los antibióticos con otras sustancias químicas que se utilizan en el hospital, sumado a los sedimentos y lodos que se acumulan en algunas de las operaciones unitarias presentes en la PTAR afectan el proceso de resistencia; esta aseveración debe ser investigada puesto que los estudios realizados no han analizado esta variable o evaluado los mecanismos que favorezcan o disminuyan la resistencia en los procesos unitarios. Sin embargo, algunas investigaciones soportan los hallazgos de la presente investigación: Korzeniewska et ál. (2013) estudiaron la resistencia a antibióticos en aguas de origen hospitalario y aguas residuales domésticas luego de pasar por procesos de tratamiento, encontrando que aunque los procesos de tratamiento de aguas residuales reducen el número de bacterias en los vertimientos residuales, algunos microorganismos resistentes a los antibióticos pueden permanecer en el efluente de salida.

En Adís Abeba, Etiopia, se identificaron bacterias gramnegativas de importancia medica en 94 muestras de agua de rio, algunas de instituciones hospitalarias sin sistemas de tratamiento, concluyendo que *Escherichia coli* fue la bacteria predominante en un 26 %, sumado a que mostró una resistencia a la ampicilina de 91.3 % (Belachew et ál., 2018); este valor es mayor a lo reportado en países desarrollados como Rumania con un 34 % (Marinescu et ál., 2015) y Holanda con un 11 % de resistencia (Blaak et ál., 2015), naciones que disponen de una infraestructura robusta para el tratamiento de aguas residuales, así como políticas públicas tendientes al uso racional de antimicrobianos.

La resistencia de *Escherichia coli* a los dos antibióticos estudiados en el agua residual tratada puede tener origen en los genes asociados con la resistencia a los antibióticos transmitidos horizontalmente entre bacterias (Ishii, 2019). Los microorganismos en el agua residual de un hospital pueden adquirir resistencia durante el proceso de tratamiento, gracias a que las cepas con genes de resistencia entran en contacto con cepas sin genes de resistencia y por medio de conjugación, transformación y

traducción, alteraciones genéticas y demás, se favorece la supervivencia de la especie, creando y aumentando la resistencia al antibiótico (von Wintersdorff et ál., 2016).

El diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales hospitalarias, ajustado a las características de las sustancias utilizadas en los centros de salud, puede disminuir parte de los impactos generados al ambiente. Por ejemplo, la desinfección preliminar con cloro de las aguas residuales hospitalarias antes de ser vertida en los sistemas de alcantarillado podría minimizar la propagación de bacterias resistentes a antibióticos (Korzeniewska et ál., 2013). A su vez, la inactivación fotodinámica antimicrobiana (PDI, por sus siglas en inglés) representa una alternativa a métodos tradicionales de desinfección de alto costo, inseguros y poco efectivos; este proceso tiene potencial para ser una alternativa efectiva para la inactivación de las bacterias resistentes a antibióticos en aguas residuales hospitalarias, además que la presencia de antibióticos puede mejorar su efectividad (Almeida et ál., 2014).

Dentro de las limitaciones del presente estudio se señala el no empleo de la técnica de número más probable (NMP) para determinar la contaminación fecal del agua, esto obedeció a que los insumos para el desarrollo de estas técnicas no estaban disponibles en laboratorio, sumado a los costos de estos, que no pudieron ser sufragados por los investigadores. Otra de las limitaciones fue no realizar un análisis fisicoquímico de las sustancias del vertimiento hospitalario, las cuales pueden incidir en la disminución o el aumento de la resistencia de *Escherichia coli* a los antibióticos estudiados, aunque en los estudios consultados tampoco se evaluaron estas características en las aguas residuales. Finalmente, el disponer únicamente de 5 días de muestreo se considera otra de las limitaciones en comparación con otros estudios que han utilizado un mayor número de muestras.

Conclusiones

Los resultados del presente trabajo están en línea con lo evidenciado en otras investigaciones, en las cuales se ha establecido la resistencia a ampicilina por parte de *Escherichia coli*.

Los hallazgos de la presente investigación son los primeros que evidencian la problemática existente en Colombia en el manejo de las aguas residuales de hospitales. Es por este motivo que las entidades competentes en el tema deben trabajar de manera articulada en la consolidación y actualización de las normativas ambientales y de salud que actualmente rigen en el país, brindando beneficios en el campo de la salud pública y ambiental de la nación.

Referencias

- Alam, M. Z., Aqil, F., Ahmad, I. y Ahmad, S. (2013). Incidence and transferability of antibiotic resistance in the enteric bacteria isolated from hospital wastewater. *Brazilian Journal of Microbiology*, 44(3), 799-806. <https://doi.org/10.1590/s1517-83822013000300021>
- Almeida, J., Tomé, J. P. C., Neves, M. G. P. M. S., Tomé, A. C., Cavaleiro, J. A. S., Cunha, N., Costa, L., Faustino, M. A. F. y Almeida, A. (2014). Photodynamic inactivation of multidrug-resistant bacteria in hospital wastewaters: influence of residual antibiotics. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 13(4), 626-633. <https://doi.org/10.1039/c3pp50195g>
- Amaya, E., Reyes, D., Paniagua, M., Calderón, S., Rashid, M. U., Colque, P., Kühn, I., Möllby, R., Weintraub, A. y Nord, C. (2012). Antibiotic resistance patterns of *Escherichia coli* isolates from different aquatic environmental sources in Leon, Nicaragua. *Clinical Microbiology and Infection*, 18(9), E347-E354. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2012.03930.x>
- Hudzicki, J. (2009). *Kirby-Bauer Disk Diffusion Susceptibility Test Protocol*. American Society for Microbiology (ASM). <https://asm.org/getattachment/2594ce26-bd44-47f6-8287-0657aa9185ad/Kirby-Bauer-Disk-Diffusion-Susceptibility-Test-Protocol-pdf.pdf>
- Belachew, T., Mihret, A., Legesse, T., Million, Y. y Desta, K. (2018). High level of drug resistance by gram-negative bacteria from selected sewage polluted urban rivers in Addis Ababa, Ethiopia. *BMC Research Notes*, 11(1), 524. <https://doi.org/10.1186/s13104-018-3622-0>
- Blaak, H., Lynch, G., Italiaander, R., Hamidjaja, R. A., Schets, F. M. y de Roda Husman, A. M. (2015). Multidrug-Resistant and Extended Spectrum Beta-Lactamase-Producing *Escherichia coli* in Dutch Surface Water and Wastewater. *PLoS ONE*, 10(6), e0127752. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127752>

- Bolukaoto, J. Y., Kock, M. M., Strydom, K. A., Mbelle, N. M. y Ehlers, M. M. (2019). Molecular characteristics and genotypic diversity of enterohaemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 isolates in Gauteng region, South Africa. *Science of The Total Environment*, 692, 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.119>
- Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). (2019). *Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing* (29th ed.). https://clsi.org/media/2663/m100ed29_sample.pdf
- Ishii, S. (2019). Ecology of Pathogens and Antibiotic-resistant Bacteria in Environments: Challenges and Opportunities. *Microbes and Environments*, 34(1), 1-4. <https://doi.org/10.1264/jsme2.me3401rh>
- Jang, J., Hur, H. G., Sadowsky, M., Byappanahalli, M., Yan, T. y Ishii, S. (2017). Environmental *Escherichia coli*: ecology and public health implications-a review. *Journal of Applied Microbiology*, 123(3), 570-581. <https://doi.org/10.1111/jam.13468>
- Korzeniewska, E., Korzeniewska, A. y Harnisz, M. (2013). Antibiotic resistant *Escherichia coli* in hospital and municipal sewage and their emission to the environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 91, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.01.014>
- Marinescu, F., Măruțescu, L.G., Savin, I. y Lazăr, V. (2015). Antibiotic resistance markers among Gram-negative isolates from wastewater and receiving rivers in South Romania. *Romanian Biotechnological Letters*, 20(1), 10055-10069
- Rabbani, M., Howlader, M. Z. H. y Kabir, Y. (2017). Detection of multidrug resistant (MDR) bacteria in untreated waste water disposals of hospitals in Dhaka City, Bangladesh. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 10, 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2017.04.009>
- Tortora, G. J., Funke, B. R. y Case, C. L. (2021). *Introducción a la microbiología*. Editorial Médica Panamericana.
- Tzoc, E., Arias, M. L. y Valiente, C. (2004). Efecto de las aguas residuales hospitalarias sobre los patrones de resistencia a antibióticos de *Escherichia coli* y *Aeromonas* sp. *Revista Biomédica*, 15(3), 165-172. <https://doi.org/10.32776/revbiomed.v15i3.387>
- von Wintersdorff, C. J. H., Penders, J., van Niekerk, J. M., Mills, N. D., Majumder, S., van Alphen, L. B., Savelkoul, P. H. M. y Wolffs, P. F. G. (2016). Dissemination of Antimicrobial Resistance in Microbial Ecosystems through Horizontal Gene Transfer. *Frontiers in Microbiology*, 7, 173. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00173>

Estudios preliminares del riesgo en la elaboración de planes de seguridad del agua: experiencias de aplicación en el sector rural

ANDRÉS FELIPE MARTÍNEZ URREGO
ÁNGELA MARÍA JARAMILLO LONDOÑO
ANDRÉS FELIPE BALLESTEROS RODRÍGUEZ
ANGIE LORENA BERNAL BERNAL
MARÍA PAULA DÍAZ ZÚÑIGA
JUAN SEBASTIÁN HERNÁNDEZ GAMBOA

Objetivo

Realizar una evaluación de riesgos sobre la calidad del agua en fuentes de abastecimiento como insumo para la elaboración de planes de seguridad del agua (PSA) en zonas rurales.

Metodología

Para realizar la evaluación de riesgos se tomó como referencia lo definido en el *Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua*, que considera 11 módulos que permiten, de forma organizada, establecer los elementos que componen el PSA (Bartram et ál., 2009). En el contexto colombiano, una metodología que aporta parcialmente al cumplimiento de los objetivos de un PSA se encuentra definida en la Resolución 4716 de 2010, la cual establece los elementos para la elaboración del mapa de riesgos de la calidad del agua; sin embargo, en la actualidad muchos sistemas de abastecimiento en el país, principalmente en zonas rurales, carecen del mapa de riesgos y, por lo tanto, no hay una evaluación de los riesgos potenciales a los que se exponen los sistemas de captación de agua. La metodología que se presenta para la evaluación de riesgos sobre la calidad del agua pretende dar aplicación a la guía de planes de seguridad del agua en zonas rurales, donde se requiere mayor difusión, debido al

desconocimiento y a la falta de planificación y evaluación, que potencializa los riesgos y supone una mayor afectación a la calidad del agua y a la salud pública.

Por lo anterior, se abordaron estudios en dos fuentes de abastecimiento rurales del departamento de Cundinamarca, la primera, la quebrada Salitre, ubicada en el municipio de Subachoque, que abastece el acueducto El Tobar; y la segunda, la quebrada Grande, ubicada en el municipio de San Antonio del Tequendama, que abastece el acueducto Aguasanta E.S.P. Los estudios realizados incluyen un análisis detallado de la evaluación de riesgos en la cuenca de abastecimiento.

Determinación de los peligros y eventos peligrosos y evaluación de los riesgos

Con el fin de realizar la identificación de los eventos peligrosos y sus peligros asociados a las fuentes de abastecimiento de los acueductos El Tobar y Aguasanta que pueden poner en riesgo la integridad del sistema, se aplicaron los lineamientos establecidos en el módulo 3 del Manual para el desarrollo de PSA de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que considera los siguientes elementos (Bartram et ál., 2009):

- Determinación de los posibles peligros de origen biológico, físico y químico asociados con la fuente de abastecimiento de agua.
- Determinación de los peligros y eventos peligrosos que afecten el agua y, por tanto, el sistema de abastecimiento.
- Evaluación de los riesgos.

A partir de ello se siguió la metodología en los estudios realizados (Ballesteros y Hernández, 2016; Bernal, 2018) consistente en seis etapas que se describen a continuación:

- Etapa I. Reconocimiento del área de estudio a través de visitas de campo.
- Etapa II. Procesamiento de información cartográfica.

- Etapa III. Caracterización de actividades en la zona de estudio.
- Etapa IV. Identificación de peligros y eventos peligrosos.
- Etapa V. Toma de muestras y análisis fisicoquímico.
- Etapa VI. Evaluación y análisis de riesgos.

Reconocimiento del área de estudio a través de visitas de campo

Con el fin de dar inicio a los estudios se realizaron dos visitas a las zonas de interés, predios aguas arriba de los puntos de captación, bocatomas, desarenadores, líneas de aducción y conducción, tanques de almacenamiento y predios cercanos a cada punto, que permitieron identificar aspectos generales como la facilidad de acceso a los predios, distancias, puntos de interés por actividades productivas, vertimientos u otra característica propia del entorno, puntos de captación, infraestructura existente, entre otros. Esta visita también permitió realizar un primer censo para estimar la cantidad de predios a evaluar, además de generar un acercamiento a los usuarios del sistema y habitantes de los predios aguas arriba de la captación.

Procesamiento de información cartográfica

Para realizar el procesamiento de la información cartográfica se recopiló información de los municipios y las fuentes de abastecimiento; esto permitió identificar las zonas de estudio. Posteriormente, se elaboraron los mapas, en donde se representaron los distintos predios a partir de los planos cartográficos suministrados por las instituciones consultadas. La información utilizada para la construcción de mapas y su análisis correspondió a planos hidrográficos, mapas de uso del suelo rural, mapas prediales y de uso potencial del suelo.

Caracterización de actividades en la zona de estudio

A través de la aplicación de instrumentos tipo encuesta semiestructurada en la población situada en el área de influencia del proyecto y del reconocimiento y procesamiento de información cartográfica, se realizó una caracterización de las actividades económicas desarrolladas alrededor de las fuentes de abastecimiento y afluentes de interés, para la posterior identificación y evaluación de los riesgos que se presentan sobre la calidad del agua captada en los sistemas de acueducto evaluados.

Identificación de peligros y eventos peligrosos

Con el fin de identificar los aspectos más significativos que constituyen los principales factores de amenaza a la calidad del agua, se realizaron estudios previos que incluyeron el análisis fisicoquímico y microbiológico, tomando como referencia las características definidas en la Resolución 2115 de 2007 (tabla 19). El detalle de las muestras y las técnicas de análisis utilizadas se presentan más adelante. Los análisis técnicos detallados permiten obtener información de las características de la fuente de abastecimiento, la identificación de posibles fuentes de contaminación que representan peligros y la amenaza a las medidas de protección del recurso hídrico (Taborda y Venegas, 2016).

Para la identificación de los riesgos de contaminación del agua cruda que abastece los acueductos de El Tobal y Aguasanta, se consideraron actividades antrópicas como descargas puntuales de aguas residuales domésticas o no domésticas o corrientes de agua de escorrentía afectadas por las actividades productivas (agua de escorrentía agrícola, ganado o uso recreativo); además de esto, se identificaron procesos naturales que pueden alterar la calidad del agua de los cuerpos de agua objetos de estudio.

Para identificar los peligros potenciales se tuvieron en cuenta los elementos dados en el Manual de planes de seguridad del agua de la OMS (Bartram et ál., 2009) en el cual se definen las fuentes de peligro y sus efectos sobre la calidad de la fuente, tal como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. Eventos que están afectando la calidad del agua

Fuente de peligro	Peligro potencial o suceso peligroso
Ganadería y otras especies (caballos, asnos, ovejas)	Contaminación microbiológica por la materia fecal producida por los animales y compactación del suelo por el pastoreo.
Agricultura: cultivos de papa y arveja	Contaminación por el uso de plaguicidas, fertilizantes y fungicidas, actividades que se realizan cerca fuente de abastecimiento.
Deforestación: tala de árboles sobre la parte media de la quebrada Salitre	Contaminación por material suspendido y aumento de procesos erosivos del suelo.
Transporte: carretera veredal (tráfico de automotores y tracción animal)	Derrame de productos (aceites, grasas) que modifiquen las características físicas y químicas del agua, contaminación microbiológica por la materia fecal y orina de los animales que transitan.
Disposición final inadecuada de los envases y empaques de los productos químicos.	Aumento de la posibilidad de que sean arrojados al cauce de las quebradas, aumentando la contaminación química y física.
Remoción de cobertura vegetal (arado para el desarrollo de cultivos)	Puede generar un aumento de sólidos suspendidos en las fuentes hídricas y aumento de los procesos erosivos del suelo.
Afluente de agua de escorrentía	Aumento de las concentraciones de sólidos suspendidos y de metales provenientes del suelo.
Acceso no protegido	Contaminación inesperada por actividades no estipuladas dentro del desarrollo agrícola, como lo son actividades paisajísticas, deportivas y ecoturísticas.

Fuente: adaptado de Bartram et ál. (2009).

Toma de muestras y análisis fisicoquímico

Para realizar una comparación entre los resultados de las visitas de inspección, encuestas y fichas prediales con los riesgos potenciales a la calidad del agua, se realizó una caracterización en las fuentes de abastecimiento. En el caso de la quebrada Salitre se realizó un muestreo simple en tres (3) puntos identificados previamente como puntos de interés (bocatoma, unión Bobal con Salitre y Puente), siguiendo el protocolo publicado por

el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) para la toma de muestras de agua superficial (Ideam, 2002). Para el análisis de la quebrada Grande se adoptaron datos brindados por el prestador del servicio de acueducto, realizados en 2017 por parte de la Corporación Autónoma Regional. Los parámetros evaluados fueron seleccionados bajo el criterio de efecto adverso sobre la salud humana, además de otros parámetros de interés dados por la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Vivienda, por medio de la cual se señalan las características de la calidad del agua para consumo humano. En la tabla 19 se presentan los parámetros evaluados y los métodos de determinación utilizados.

Tabla 19. Parámetros y métodos de medición seleccionados

Parámetro	Método
Acidez total	S.M. 2310 B
Alcalinidad	S.M. 2320 B
Aluminio	S.M. 3111-D
Calcio	S.M. 3111-B
Color aparente	S.M. 2120 B
Carbono orgánico total	S.M. 5220 C- Calcu
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	S.M. 5210B Mod-SM
Nitritos	S.M. 4500-NO2 B
Pesticidas organoclorados	S.M. 6630 B/ 6630
Sulfatos	S.M. 4500-SO4 E
Temperatura	In situ
Turbiedad	In situ
Porcentaje de saturación de oxígeno	In situ
Demanda química de oxígeno (DQO)	S.M. 5220 C
Dureza total	S.M. 2340 C
<i>E. coli</i> y coliformes totales	S.M. 9222 B y D
Hierro	S.M. 311 -B
Fosfatos	S.M. 4500-P E
Magnesio	S.M. 3111 B
Molibdeno	S.M. 3111 D
Nitratos	S.M. 4500 NO3- B
Pesticidas organofosforados	S.M. 6630

Parámetro	Método
Zinc	S.M. 311 B
pH	In situ
Oxígeno disuelto	In situ

Nota: S.M.: Standard Method.

Fuente: adaptado de American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF), (2017).

Evaluación de riesgos

Una vez identificados los eventos peligrosos y peligros en las zonas de estudio, realizando una segregación por predios evaluados, se analizaron los factores de peligro con los riesgos asociados; esto permitió evaluar en escala semicuantitativa su probabilidad de ocurrencia, su gravedad, las consecuencias asociadas a la calidad del agua y su peligrosidad. Con el objetivo de diferenciar, de manera objetiva, entre los riesgos más significativos y los de menor significancia, se utilizó una matriz de riesgo por medio de puntajes. En el proceso de evaluación se aplicó un método semicuantitativo (tabla 20), que comprende la estimación de la probabilidad o frecuencia y la gravedad de la consecuencia.

Tabla 20. Matriz para la evaluación de riesgos

		Gravedad de la consecuencia				
		Insignificante Clasificación: 1	Leve Clasificación: 2	Moderado Clasificación: 3	Grave Clasificación: 4	Catastrófico Clasificación: 5
Probabilidad	Casi siempre Clasificación: 5	5	10	15	20	25
	Probable Clasificación: 4	4	8	12	16	20
	Moderada Clasificación: 3	3	6	9	12	15
	Improbable Clasificación: 2	2	4	6	8	10
	Excepcional Clasificación: 1	1	2	3	4	5

Fuente: adaptado de Bartram et ál. (2009).

Cada fuente de peligro tiene un nivel de riesgo asociado que conlleva a una probabilidad de ocurrencia y la afectación de la calidad del agua en la zona de la bocatoma; según el nivel de riesgo de cada peligro se deben formular medidas de control ambiental y sanitario. La puntuación del riesgo se refiere al resultado del producto entre el valor de la probabilidad y el valor de la gravedad, como se establece en Bartram et ál. (2009); una vez obtenida esta puntuación se decide elegir el tipo de riesgo, como se indica en la tabla 21.

Tabla 21. Caracterización o valoración del riesgo en la quebrada Salitre

Caracterización o valoración del riesgo	Puntaje
Riesgo muy alto	> 20
Riesgo alto	15-19
Riesgo medio	10-14
Riesgo bajo	5-9
Sin riesgo	0-4

Fuente: adaptado de Bartram et ál. (2009).

Por otra parte, para el estudio en la quebrada Grande, se reorganizaron algunos elementos de valoración y se evaluó el riesgo asociado a cada peligro por predio, para un total de 15 predios. Para llevar a cabo esta evaluación, se valoró inicialmente la proximidad de cada predio a la bocatoma, puesto que entre más cercano esté el punto de captación al predio representa un mayor riesgo a la calidad del agua, como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Tabla de ponderación por proximidad a la bocatoma

Riesgo a la bocatoma	Proximidad a la bocatoma	Valor
Predio en el cual se encuentra ubicada la bocatoma.	0 m	25
Predios más cercanos a la bocatoma y que tienen contacto directo con la quebrada.	600 m-800 m	20
Predios que tiene contacto directo con la quebrada, pero están más lejos de la bocatoma.	800 m-1000 m	12
Predios que cuentan con un riachuelo que desemboca en la quebrada estudiada.	1000 m-1200 m	7
Predios que no tienen contacto directo con la quebrada, pero están cerca de la zona de estudio.	> 1200 m	4

Fuente: elaboración propia.

Al incluir esta proximidad a la bocatoma como criterio en el cálculo del riesgo general por predio se obtiene una mayor representatividad del efecto de las actividades sobre la calidad del agua captada. Posteriormente, a partir de una hoja de cálculo y la definición de condicionales de valor se realizó el cálculo del riesgo asociado a cada actividad por cada predio, para, de este modo, evitar sesgos en la información, obteniendo resultados objetivos en la clasificación del riesgo.

La gravedad del evento se evalúa en una escala numérica, donde cero (0) no representa riesgo y cinco (5) representa el riesgo más alto, tomando como referencia la escala definida en la guía de la oms (Bartram et ál., 2009) para elaboración de PSA. Posterior a esto, se calculó el riesgo mediante la siguiente ecuación:

$$Riesgo = Gravedad \times Probabilidad$$

La adecuación de los intervalos de valoración se da con el fin de brindar menor margen de error en la cuantificación del riesgo y establecer un estándar de riesgo más exigente, que brinde mayores garantías en la aplicación de medidas de control y, por lo tanto, en la calidad del agua captada. Los resultados de la escala de valoración y el código de colores correspondiente se observan en la tabla 23.

Tabla 23. Escala de valoración del riesgo y código de colores en la quebrada Grande

Valoración del riesgo	Escala de colores	Valor
Riesgo muy alto		> 15
Riesgo alto		Entre >10 y ≤ 15
Riesgo medio		Entre ≥ 6 y ≤ 10
Riesgo bajo		< 6

Fuente: adaptado de Bartram et ál. (2009).

Finalmente, se construyeron los mapas de riesgo para cada uno de los peligros evaluados y un mapa de riesgo general para cada predio en las dos zonas de estudio evaluadas.

Aplicación

La gestión del riesgo implica un ejercicio sistemático de identificación de peligros, la implementación de medidas de control y la reevaluación de dichos eventos, de manera tal que se garanticen condiciones adecuadas en los sistemas de suministro de agua en cuanto a calidad, cantidad y continuidad del servicio. Este tipo de estudios, en colaboración con las comunidades rurales que autogestionan sus sistemas de abastecimiento de agua, permite implementar un servicio enfocado en la calidad y el beneficio en la salud pública. De esta manera, cada prestador de servicios de acueducto, tanto en zonas rurales como urbanas, podría desarrollar un análisis complementario al mapa de riesgos, que en caso de tenerlo, sería apenas un primer insumo para la evaluación sistemática y permanente de la exposición a riesgos naturales y antrópicos, todo esto con el objeto principal de reducir los riesgos asociados a estos eventos peligrosos y, por lo tanto, los probables efectos negativos a la salud en cada uno de los usuarios del sistema.

Discusión de resultados

La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) define la gestión del riesgo como:

[...] el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible. (UNGRD, 2017, pp. 19-20)

Considerando la definición anterior y con el propósito de garantizar la adecuada gestión del riesgo en los sistemas de captación de agua, se

elaboró un análisis detallado de los peligros a los que se expone la fuente de abastecimiento como consecuencia de las actividades desarrolladas en el área de influencia. Para esto, se fundamentaron los análisis con el correspondiente monitoreo fisicoquímico y microbiológico del agua para encontrar relaciones entre los peligros identificados y los eventos peligrosos presentados en la calidad del agua que se está captando.

En el estudio de la quebrada Grande se realizó el análisis de la caracterización efectuada por el laboratorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), comparando sus resultados con lo establecido en la Resolución 2115 de 2007 (tabla 24).

Tabla 24. Resultados de análisis fisicoquímicos en la quebrada Grande

Parámetro	Valor máximo aceptable (Res. 2115/07)	Punto de muestreo
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	200	48
Aluminio (mg/L)	0.2	0.05
Calcio (mg/L)	60	13.6
Carbono orgánico total (mg/L)	5	5.25
Cloruros (mg/L)	250	4.76
Coliformes totales (ufc/100 ml)	0	13 000
Color (uPC)	15	16
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	300	18
<i>Escherichia coli</i> (ufc/100 ml)	0	230
Fluoruros (mg/L)	1.0	0.2
Fosfatos (mg/L)	0.5	0.4
Hierro total (mg/L)	0.3	0.42
Conductividad (µS/cm)	1000	107.6
pH	6.5-9.0	6.5
Temperatura (°C)	-	14.2
Magnesio (mg/L)	36	0.96
Manganeso (mg/L)	0.1	0.12
Molibdeno (mg/L)	0.07	0.06
Olor	Aceptable	Aceptable

Parámetro	Valor máximo aceptable (Res. 2115/07)	Punto de muestreo
Sabor	Aceptable	Aceptable
Nitratos (mg/L)	10	0.44
Nitritos (mg/L)	0.1	0.05
Sulfatos (mg/L)	250	5
Turbiedad (UNT)	2	2.4
Zinc (mg/L)	3	1.41

Fuente: elaboración propia.

Al realizar una lectura de los resultados, se encuentra que los parámetros carbono orgánico total, coliformes totales, color aparente, *Escherichia coli*, hierro, manganeso y turbiedad se encuentran por encima del valor máximo establecido en la regulación nacional. Es importante considerar que el no cumplimiento en los parámetros máximos aceptables para estas características de calidad expone directamente a la población a escenarios de alta morbilidad por consumo de agua, principalmente por la presencia de coliformes, específicamente de *Escherichia coli*, que se ven incrementados por la turbiedad y color presentes en el agua. En el caso del hierro y el manganeso los efectos son indirectos a la salud, por lo que teniendo en cuenta ambos aspectos se debe considerar una correcta planificación que permita la adecuada gestión del recurso, incluyendo el sistema de tratamiento que asegure las condiciones de calidad del agua para consumo humano, acompañado de un plan de seguridad que minimice los riesgos a los que se expone el recurso por contaminación originada en las actividades de la zona.

Para la quebrada Salitre, el estudio consideró la aplicación de un protocolo de muestreo en los puntos seleccionados con el fin de identificar eventos de contaminación que puedan tener origen en las actividades realizadas en la zona de influencia. Los resultados se muestran en la tabla 25.

De manera similar, los estudios realizados muestran que los parámetros que se encuentran por fuera del cumplimiento de la Resolución 2115 son turbiedad, pH, hierro, coliformes totales y *Escherichia coli*, mostrando características similares en calidad entre las dos fuentes evaluadas en los estudios, lo que permite considerar una tendencia en la calidad del

agua, posiblemente originada por las actividades propias del sector rural colombiano, lo que conlleva de igual manera a problemas asociados al consumo de agua contaminada con coliformes totales, específicamente con *Escherichia coli*.

Tabla 25. Resultados de análisis fisicoquímicos en la quebrada Salitre

Parámetro	Res. 2115/07	Punto de muestreo 1 (unión)	Punto de muestreo 2 (puente)	Punto de muestreo 3 (bocatoma)
Color (UPC)	15	< 5	< 5	< 5
Temperatura (°C)	-	10.37	9.14	10.17
Turbiedad (UNT)	2	2.8	10.3	3.1
pH	6.5-9	6.18	6.47	6.4
Oxígeno disuelto (mg/L)	-	7.24	6.39	6.76
Porcentaje de saturación (%)	-	95.20	81.90	88.2
Acidez total (mg/L)	-	14.7	12	7.6
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	200	10.25	10.76	12.81
Aluminio (mg/L)	0.2	< 0.20	< 0.20	< 0.20
Calcio total (mg/L)	60	1.2	7.83	< 0.20
Carbono orgánico total (mg/L)	5.0	< 5	< 0.5	< 5
Nitritos (mg/L)	0.1	< 0.007	< 0.07	< 0.007
Pesticidas organoclorados (mg/L)	-	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Sulfatos (mg/L)	250	< 10	< 10	< 10
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	300	7.8	6.3	11.5
Hierro (mg/L)	0.3	0.35	0.23	0.27
Fosfatos (mg/L)	0.5	< 0.12	< 0.12	< 0.12
Magnesio (mg/L)	36	0.54	1.01	0.43
Molibdeno (mg/L)	0.07	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Nitratos (mg/L)	10	< 1.5	< 1.5	< 1.5
Pesticidas organofosforados (mg/L)	-	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Zinc (mg/L)	3	< 0.05	0.42	< 0.05
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	-	< 3	< 3	< 3
Demanda química de oxígeno (mg/L)	-	< 10	< 10	< 10
Coliformes totales (UFC/100 cm ³)	0	740	210	930
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 cm ³)	0	30	10	80

Fuente: elaboración propia.

Es importante considerar que la presencia de ciertos elementos en el agua puede tener un origen natural dadas las dinámicas del cauce de las quebradas, de manera que se pueda generar arrastre de material que ocasione turbiedad o incremento en el contenido de hierro o manganeso por la disolución de minerales del material presente aguas arriba de los puntos de muestreo. Sin embargo, el objeto de estos estudios responde a la identificación de actividades que representen peligro al sistema de abastecimiento y que explican, en alguna medida, la presencia de elementos que alteran la calidad del agua captada en los sistemas de abastecimiento rurales.

Para contrastar los resultados obtenidos en los diferentes puntos se debe considerar que el primer punto de muestreo (puente) está ubicado tres kilómetros aguas abajo del punto de nacimiento de la quebrada Salitre, y que debido a las características de conservación del terreno por la reserva forestal privada que se encuentra en la parte alta, se considera que es el tramo de mejor calidad, por lo que su valor de turbiedad, aun siendo bajo, simplemente responde a arrastre de material en la parte alta de la microcuenca. Por el contrario, los valores de turbiedad dados en el punto 2 (unión) pueden responder a la afectación del suelo por actividades agrícolas y ganaderas, que aumentan los procesos erosivos e incrementan la cantidad de material arrastrado por la corriente. De igual manera, en estos puntos la concentración de coliformes aumenta debido a las aguas de escorrentía provenientes de predios de actividad pecuaria y el tránsito de animales por la zona (caballos, reses y otros). En la zona evaluada no se observaron puntos de descarga provenientes de viviendas, tanques sépticos o sistemas similares, lo que lleva a considerar que la concentración de coliformes es respuesta a la actividad productiva y de transporte desarrollada en esta.

Estas características se reducen en el punto 3 (bocatoma), donde si bien se da continuidad a la actividad pecuaria, existen procesos de sedimentación natural que permiten encontrar valores de turbiedad más bajos en el punto evaluado. A pesar de esto, la concentración de coliformes si se ve incrementada por la descarga de efluentes de aguas residuales y aguas de escorrentía aguas arriba del punto de captación. Estos son los parámetros principales que serán considerados en la operación del sistema de tratamiento que opera en forma convencional con un desarenador como sistema de pretratamiento.

Posterior a la caracterización fisicoquímica se procesó la información cartográfica con la ayuda de la herramienta ArcMap, para ubicar las áreas de mayor influencia que ponen en riesgo la calidad del agua; se elaboraron los mapas de valoración del riesgo general y por evento peligroso para determinar de forma gráfica las zonas de atención prioritaria en la reducción de los riesgos sobre la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento (figura 11).

Estos mapas se elaboraron considerando el promedio ponderado de la valoración de los riesgos evaluados en cada uno de los predios, de acuerdo con el análisis de las fichas prediales y las encuestas aplicadas en las visitas de inspección. En cada caso se observan resultados que difieren en función de las características ambientales de la zona, mientras en el primero se cuenta con una zona de reserva forestal y se minimiza el riesgo general; en el segundo, la presencia de actividades antrópicas acentúa el riesgo en gran parte del área evaluada, principalmente en cercanías del punto de captación. Se destaca que tanto la agricultura como la ganadería fueron los eventos que mayor aporte a la valoración de riesgo generaron en las dos zonas de estudio.

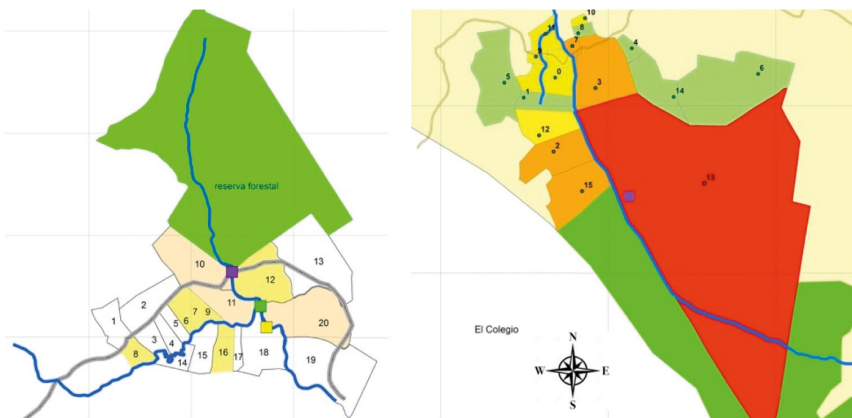


Figura 11. Valoración del riesgo general por predios en las zonas evaluadas

Fuente: elaboración propia.

En la figura 12 se ilustran los niveles de riesgo generados por la ganadería en cada uno de los predios evaluados en las zonas de estudio, además de su correspondiente clasificación por colores de acuerdo con la codificación presentada anteriormente.

En el análisis de la quebrada Salitre se encuentran predios que generan alto riesgo a la calidad del agua por la actividad ganadera, debido a que se cuenta con ganado bovino de engorde. Por otra parte, en los puntos de paso interveredal se presenta paso permanente de animales que incrementa la presión de la actividad sobre el sistema. En los puntos más cercanos a la captación se encuentra que el riesgo es muy alto (rojo) debido a la cantidad de cabezas de ganado registradas en las rondas de las quebradas y, específicamente, en el punto de captación.

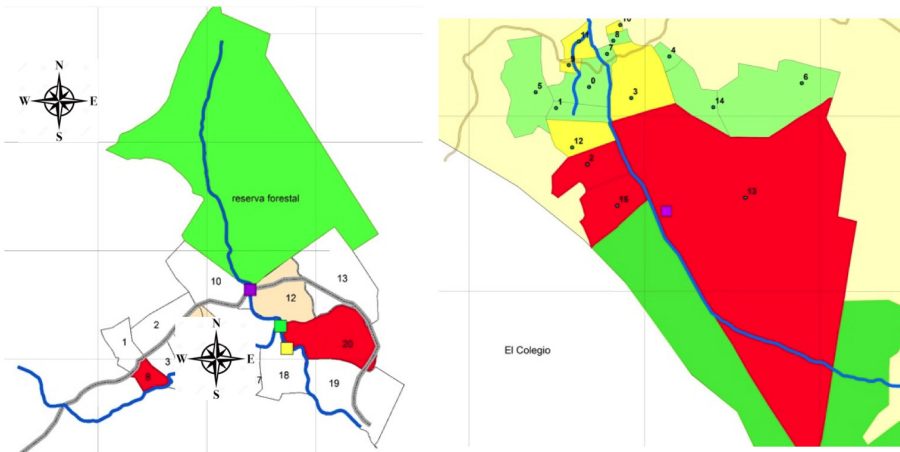


Figura 12. Valoración del riesgo por ganadería en las zonas evaluadas

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la quebrada Grande del acueducto Aguasanta, se encontró que en algunos predios el nivel de riesgo es muy alto, dado que es allí donde se intensifica la actividad de ganadería extensiva; uno de estos predios cuenta, por ejemplo, con 163 vacas lecheras, lo que la hace la zona con mayor número de reses por unidad de área; además, estos animales se ubican en zonas del predio donde las aguas de escorrentía pueden contaminar el agua de la quebrada. Por otro lado, en otros predios se encontró

un riesgo medio debido al menor número de animales registrados. A diferencia de lo anterior, en dos predios evaluados el número de bovinos es reducido a un máximo de 4 cabezas, pero cuentan con un mayor número de cerdos y aves, motivo por el cual se les da mayor valoración al riesgo. En cuanto a los predios restantes, estos son evaluados en riesgo bajo ya que no cuentan con actividades ganaderas, sin embargo, algunos cuentan con algunos animales como gallinas, cerdos o caballos. Por todo esto, se puede considerar el riesgo permanente a la presencia de nitritos, nitratos y contaminantes de origen fecal en la quebrada.

En la figura 13 se ilustran los niveles de riesgo generados por la agricultura en cada uno de los predios evaluados en las zonas de estudio.

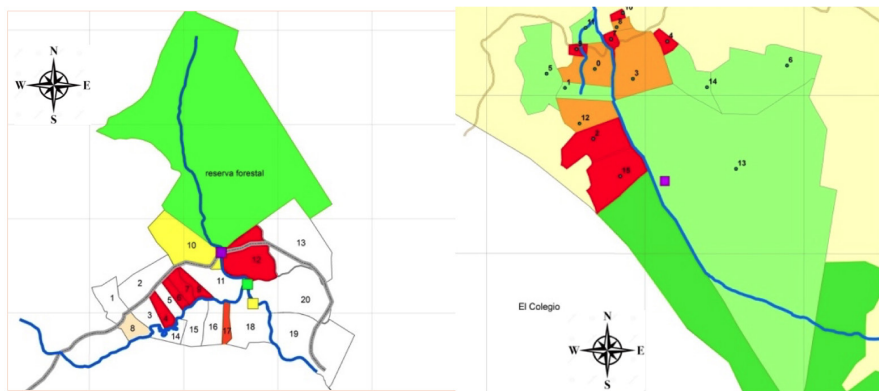


Figura 13. Valoración del riesgo por agricultura en las zonas evaluadas

Fuente: elaboración propia.

En este análisis se encontró que los predios con mayor riesgo (color rojo) están relacionados con el desarrollo de actividades agrícolas relacionadas con cultivo de cítricos, que intensifican su efecto sobre la calidad del agua en la medida en que se acercan al punto de captación. Para el desarrollo de estas actividades se genera un suministro importante de elementos al suelo por el uso de agroquímicos; sin embargo, el efecto sobre la concentración de compuestos organoclorados y organofosforados es muy reducido. Se debe considerar también que los cultivos en su mayoría son permanentes, con producción durante diferentes condiciones

estacionales, aumentando la presión de la actividad sobre el uso del suelo y la calidad del agua. La preparación del terreno, que implica una remoción de la cobertura vegetal del suelo, los movimientos de tierra, la fumigación, el abono, etc., genera cambios significativos en las características no solo fisicoquímicas del suelo sino en la estabilidad de los terrenos, que en algunas zonas puede incrementar los riesgos de deslizamiento directamente en las quebradas. Los predios evaluados en riesgo bajo no desarrollan actividades agrícolas, solo algunos de ellos siembran plantas cítricas para el consumo interno en los predios. La afectación dada por la actividad agrícola no radica solamente en la actividad *per se*, sino también en las acciones complementarias a la actividad, que implican tránsito de vehículos de carga y descarga de productos e insumos y el riesgo por la inadecuada disposición de envases y material de embalaje de elementos utilizados en la producción agrícola.

Como se observa en la figura 14, el riesgo por la disposición final de los envases y empaques de productos químicos es reducido en contraste con los riesgos evaluados en agricultura y ganadería. Con el fin de dar valoración al riesgo se consideraron los métodos de manejo de los residuos derivados de las diferentes actividades (quema controlada, enterramiento o recolección y posterior disposición). De acuerdo con el método utilizado se define la gravedad del evento, teniendo en cuenta que si son enterrados la filtración de elementos contaminantes en el suelo puede llegar a contaminar los cuerpos de agua cercanos, seguido por la quema controlada, cuyas cenizas pueden terminar en los cuerpos de agua por escorrentía o por transporte a través del aire. Teniendo esto en cuenta, se considera que el método de manejo de menor impacto es la recolección por parte del municipio, siempre y cuando se realice en frecuencias adecuadas que no impliquen una acumulación excesiva e incontrolada del material que pueda aumentar los riesgos.

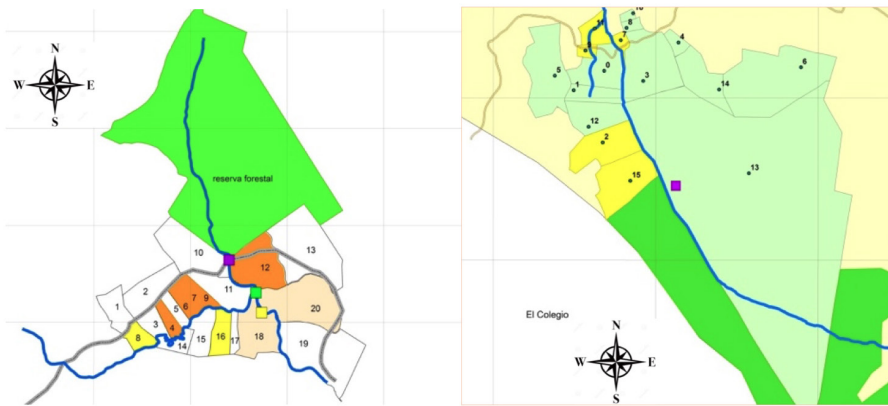


Figura 14. Valoración del riesgo por disposición final de envases en las zonas evaluadas

Fuente: elaboración propia.

En los predios con actividad agrícola moderada se asocia un riesgo proporcional al manejo y disposición de envases y productos químicos, de manera que no se encuentran valores significativos de riesgo asociados al evento peligroso. Los demás predios presentan riesgo bajo puesto que en su mayoría los residuos son llevados a disposición en sitios destinados para ello, o solo se desarrollan actividades ganaderas que generan únicamente empaques de alimentos preparados o melazas. Considerando esto, se puede establecer que el riesgo por mala disposición de envases y empaques de productos químicos no es significativo, puesto que en su mayoría son llevados a tratamiento por quema controlada o son recolectados para dar disposición final en zonas por fuera del área de influencia de las fuentes evaluadas.

De manera complementaria y siguiendo la misma metodología de valoración se presentan a continuación otros mapas (figuras 15 a 17) contruidos en el marco de estos estudios, que sirven a la construcción de los planes de seguridad del agua, correspondientes a riesgos por transporte, remoción de cobertura vegetal, acceso no protegido, remoción en masa y sismos en alguna de las fuentes objeto de estudio.



Figura 15. a) Riesgo por transporte en la quebrada Salitre. b) Riesgo por remoción de cobertura vegetal en la quebrada Salitre

Fuente: elaboración propia.

En estos mapas, se observa de manera general que la quebrada Salitre se encuentra en condición de riesgo por el acceso no protegido a los predios y la presencia de sistemas de transporte y zonas de tránsito en el área de influencia, mientras que el riesgo por escorrentía y por remoción de cobertura son reducidos. Por otro lado, la quebrada Grande fue evaluada en cuanto a amenaza por eventos de sismo y remoción en masa que demostró tener condiciones similares, destacando el alto nivel de riesgo en la zona cercana a la captación de agua. Estos elementos sirven como criterio para la priorización de acciones a efectuar en los predios evaluados, a través de un trabajo colaborativo con la comunidad, que sirve, además, como insumo en la construcción permanente del plan de seguridad del agua.

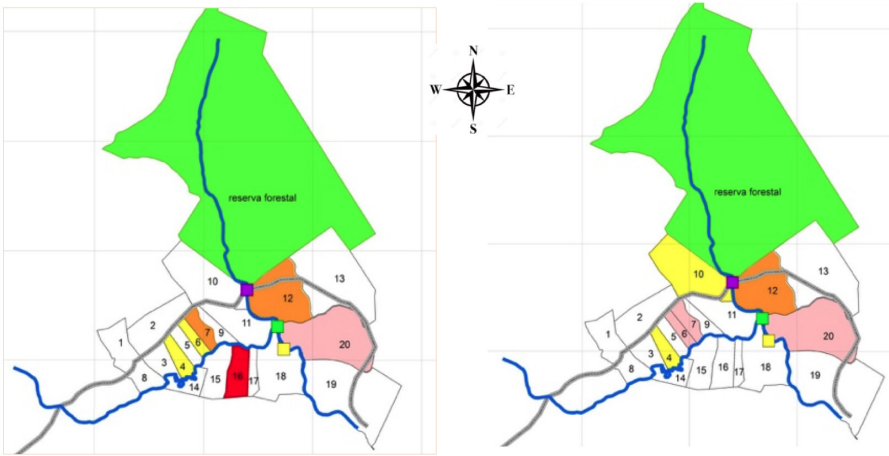


Figura 16. a) Riesgo por escorrentía en la quebrada Salitre. b) Riesgo por acceso no protegido en la quebrada Salitre

Fuente: elaboración propia.

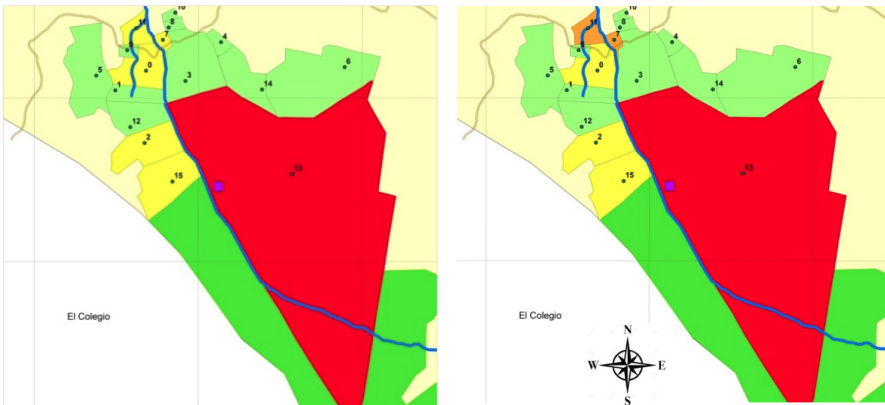


Figura 17. a) Riesgo por remoción en masa en la quebrada Grande. b) Riesgo por sismos en la quebrada Grande

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

- El estudio realizado permitió identificar eventos peligrosos de distinta naturaleza que afectan la calidad del agua de las quebradas evaluadas, entre los cuales la agricultura y la ganadería son los que mayor aporte contaminante generan y representan, por tanto, el mayor riesgo tanto en frecuencia como en gravedad del evento.
- Los eventos de contaminación están asociados también con el tránsito de animales y personas de las veredas evaluadas dada la ausencia de barreras perimetrales que establezcan límites y zonas de protección para las fuentes de abastecimiento. El libre acceso a zonas de influencia de la quebrada genera focos de contaminación y arrastre de material que alteran la calidad del agua.
- La actividad agrícola genera cambios en las características del suelo que se dan por la remoción de cobertura vegetal. Esto trae como consecuencia el aumento de la inestabilidad del suelo que, sumado a los riesgos por sismos o remoción en masa representan un riesgo importante no solo a la calidad del agua sino a la integridad física del sistema de captación y/o transporte debido a ruptura de tuberías y entrada de contaminantes al sistema de abastecimiento, sumado al incremento en pérdidas técnicas.
- A pesar de que el riesgo por sismos en el departamento es bajo, se presentan zonas a nivel municipal en San Antonio del Tequendama con mayor probabilidad de sismo, por lo cual es necesario aplicar medidas y controles preventivos para la atención a estos eventos.
- Las características encontradas en los dos sistemas presentan características comunes como los resultados de caracterización o la significancia en la valoración del riesgo por actividades agrícolas y ganaderas, que permite realizar una primera identificación de aspectos prioritarios a controlar en los sistemas de abastecimiento rurales.

Referencias

- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). APHA.
- Ballesteros, A. F. y Hernández, J. S. (2016). *Evaluación de riesgos sobre la calidad del agua en el Acueducto Rural El Tobal, Subachoque, Cundinamarca; en el marco del Plan de Seguridad del Agua* [tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2519>
- Bartram, J., Corrales, L., Davison, A., Deere, D., Drury, D., Gordon, B., Howard, G., Rinehold, A. y Stevens, M. (2009). *Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo*. OMS.
- Bernal, A. L., Díaz, M. P., Martínez, A. F. y Jaramillo, A. M. (2018). *Evaluación de riesgos ambientales para el acueducto rural Aguasanta E.S.P. ubicado en la vereda Santivar alto del municipio de San Antonio del Tequendama* [tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás].
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2002). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. Ideam. https://corponor.gov.co/corponor/sigescor2010/TRAMITESYSERVICIOS/Guia_monitoreo_IDEAM.pdf
- Taborda, D. y Venegas, W. (2016). *Elaboración del mapa de riesgos de calidad del agua para consumo humano de la quebrada La Hoya en el municipio de Zipaquirá Cundinamarca* [tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2897>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2017). *Terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes*. UNGRD. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20761>

Conclusiones

Las investigaciones expuestas en los capítulos anteriores evidencian cómo el trabajo articulado entre docente e investigador lleva a la formación de jóvenes investigadores responsables y creativos, cumpliendo de esta forma el modelo de formación propuesto por la universidad.

Las problemáticas ambientales actuales han abordado con el paso del tiempo escenarios que anteriormente no eran objeto de estudio. Un ejemplo de ello subyace en la identificación de bioaerosoles en sitios tales como gimnasios y hospitales, lugares que reúnen una gran cantidad de personas y que actualmente han tomado una gran importancia debido a la presencia de la pandemia del covid-19. Por otra parte, la evaluación de la resistencia microbiana en vertimientos hospitalarios abre las puertas a otro tema emergente de investigación en salud ambiental, ya que los cambios en los microorganismos conllevan a problemas en los cultivos y animales que son objeto de consumo por el hombre.

El desarrollo industrial y sus efectos ambientales y en las personas son una constante en el territorio nacional. Un escenario como Nobsa, en el que confluyen personas que deben su sustento diario a las actividades productivas realizadas en el municipio, vislumbra un evento en el marco de la injusticia ambiental, donde la población de menos recursos puede estar expuesta a un riesgo, el cual no evidencian debido a la necesidad de obtener su sustento.

Los estudios para la evaluación del riesgo son una etapa preliminar dentro de la formulación de un plan de seguridad del agua efectivo y eficiente. Por tanto, para garantizar un servicio con calidad, cantidad y continuidad es necesario dar continuidad a la formulación de las medidas de control y la reevaluación de los riesgos en la construcción permanente del PSA, en función de los resultados de la valoración inicial de riesgos.

Sobre los autores

Fray Eduardo González Gil O. P.

Ingeniero Industrial. Licenciado en Teología. Licenciado en Filosofía. Especialización en Docencia Universitaria. Especialización en Evaluación-Planeación Universitaria. Especialización en Gerencia de Instituciones de Educación Superior. Maestría en Educación.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7692-1020>

Correo electrónico: viceacadgeneral@usta.edu.co

Luis Camilo Blanco Becerra

Ingeniero Ambiental y Sanitario. Maestro en Ciencias en Salud Ambiental. Docente medio tiempo de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás Sede Bogotá.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1974-0255>

Correo electrónico: luis.blanco@usta.edu.co

Edwin Leonardo Gutiérrez Alfonso

Ingeniero Ambiental.

Correo electrónico: edwin.gutierrez@usta.edu.co

Karen Johana Rivera Sánchez

Ingeniera Ambiental.

Correo electrónico: karen.riveras@usta.edu.co

Katherine Natalia Aguirre Guataqui

Bacterióloga Pontificia Universidad Javeriana

Correo electrónico: aguirrek@javeriana.edu.co

Paola Andrea Suárez Ramírez

Ingeniera Ambiental. Especialista en Gerencia de la Seguridad y Salud en el Trabajo.

Correo electrónico: paolaandreasuarezramirez@gmail.com

Rafael Gabriel Barragán González

Biólogo marino. Maestro en Microbiología.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-0221>

Correo electrónico: rafaelbarragan@usta.edu.co

Andrea Estefanía Silva Atuesta

Ingeniera Ambiental.

Correo electrónico: andrea.silva@usta.edu.co

Giovanni Antonio Rodríguez Leguizamón

Doctor en Biología.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5683-8414>

Correo electrónico: giovanni.rodriguez@mederi.com.co

Claudia Marcela Parra Giraldo

Bacterióloga. Maestra en Microbiología. Doctora en Microbiología y Parasitología.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1302-5429>

Correo electrónico: claudia.parra@javeriana.edu.co

Erika Alejandra Noguera López

Ingeniera Ambiental.

Correo electrónico: erikanoguera@usta.edu.co

Diana Julieth Salguero Guerrero

Ingeniera Ambiental.

Correo electrónico: dianasalguero@usta.edu.co

Ana María Mosquera Monguí

Ingeniera Ambiental.

Correo electrónico: ana.mosquera@usta.edu.co

Yuritza Alejandra Garavito Gamboa

Ingeniera Ambiental.

Correo electrónico: yuritzagaravito@usta.edu.co

Carolina Guzmán Luna

Bacterióloga y Laboratorista Clínica. Maestra en Microbiología. Doctora en Microbiología Ambiental y Biotecnología. Profesora en la Facultad de Ciencias de la Salud (Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6912-1340>

Correo electrónico: cguzmanl@unicolmayor.edu.co

María Fernanda Torres Herrera

Ingeniera Ambiental.

Correo electrónico: maria.torresh@usta.edu.co

Nidia Isabel Molina Gómez

Doctora en Ingeniería del Agua y Medio Ambiental por la Universidad Politécnica de Valencia; Magíster en Administración de Negocios con Énfasis en Gestión de la Sustentabilidad por la Universidad de Leuphana en Lüneburg, Alemania; Especialista en Higiene y Salud Ocupacional por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia; Ingeniera Ambiental y Sanitaria por la Universidad de la Salle Bogotá, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4485-262X>

Correo electrónico: nidiamolina@usta.edu.co

Miguel Ángel Díaz Salas

Ingeniero Topográfico. Maestro en Gestión Urbana.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0090-3587>

Correo electrónico: migueldiazs@usta.edu.co

Andrés Felipe Martínez Urrego

Ingeniero Químico. Especialista en Saneamiento Ambiental.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6397-924X>

Correo electrónico: andresmartinezu@usta.edu.co

Ángela María Jaramillo Londoño

Doctora en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9465-8513>

Correo electrónico: angelajaramillo@usta.edu.co

Johan Alexander Álvarez Berrio

Ingeniero Ambiental y sanitario. Magister en Toxicología.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7805-7128>

Correo electrónico: johanalvarezb@usta.edu.co

Angie Lorena Bernal Bernal

Ingeniera ambiental.

Correo electrónico: angiebernal@usta.edu.co

María Paula Díaz Zúñiga

Ingeniera Ambiental. Especialista en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas.

Correo electrónico: mariadiazz@usta.edu.co

Juan Sebastián Hernández Gamboa

Ingeniero Ambiental. Especialista en Recursos Hídricos.

Correo electrónico: juanhernandezg@usta.edu.co

Andrés Felipe Ballesteros Rodríguez

Ingeniero Ambiental.

Correo electrónico: andresballesteros@usta.edu.co

Índice temático

A

ampicilina 86, 88-89, 94-98

análisis

físicoquímico 87, 98, 103-105, 111, 113

microbiológico 24, 30, 50-51, 104, 111

B

bioaerosoles 15, 20, 22, 26-28, 30, 36, 42,
46-53, 56-57, 59-60, 125

bacterianos 46, 50-52

fúngicos 46, 50-52, 59

C

cadmio 65, 67-69, 71-77

calidad

del aire 19-20, 30, 50, 71

del agua 15, 95, 101-102, 104-109, 111-
112, 114-118, 122

caracterización

de fuentes de abastecimiento 101-105,
108, 111, 115, 122

contaminación

del aire en interiores 22, 30, 48, 50, 52,
68-60

cuantificación

de colonias 22, 24, 27, 41, 48, 87-88, 90

I

identificación

de bioaerosoles 14-15, 26-27, 30, 49,
52-53

M

material particulado 19, 47, 65-70, 77-78

meropenem 86, 88-89, 94-96

modelo geoespacial 69-70, 74-75

muestreo

de bioaerosoles 23-24, 26-28, 30-31, 33-
36, 47, 48, 50, 56-57, 58

de calidad del aire 66-67, 71-72, 74

de agua residual 86-87, 89, 91-92, 96-
98, 105, 112, 114

P

planes

de seguridad del agua 84, 101, 104, 119-120, 126

plomo 65, 67-69, 71-77

R

resistencia microbiana 15, 84, 86, 89-90, 95-98, 125

riesgo

microbiológico 15, 22-23, 27-30, 37, 40, 43, 54, 84

en salud 20, 27-30, 37, 42-43, 54-55, 57, 68-70, 73, 76-77, 84, 101, 108

T

termotolerantes

bacterianos 46

fúngicos 46



Esta obra se editó en Ediciones USTA
Se usó tipografía de la familia Adobe Caslon Pro
2023

PARA LA SALUD AMBIENTAL ES INDISPENSABLE EL CUIDADO DEL AMBIENTE, DEL CUAL LOS SERES HUMANOS HACEN PARTE Y DEBEN PROTEGER, TAL Y COMO LO ESTABLECE EL PAPA FRANCISCO EN SU ENCÍCLICA *LAUDATO SÍ: SOBRE EL CUIDADO DE LA CASA COMÚN*. POR TODO LO ANTERIOR, LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DESARROLLA INVESTIGACIONES ENMARCADAS EN LA SALUD AMBIENTAL, SUSTENTADAS EN EL TRABAJO ARTICULADO DE DOCENTES Y ESTUDIANTES. LAS PESQUISAS SE ENFOCAN EN TEMAS RELACIONADOS CON EL AIRE, CUYA CALIDAD SE VE AFECTADA POR LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES COMO: EL MATERIAL PARTICULADO, LOS METALES PESADOS Y LOS BIOAEROSOLIOS, Y ANALIZAN EL ESCENARIO ACTUAL DE SINDEMIA GENERADO POR LA PRESENCIA DEL COVID-19. ADEMÁS, EN LA PRESENTE OBRA TAMBIÉN SE ESTUDIAN LOS PLANES DE SEGURIDAD DEL AGUA, INSTRUMENTOS RELEVANTES PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO EN COLOMBIA, PAÍS CUYA RIQUEZA HÍDRICA BRINDA UN SERVICIO ECOSISTÉMICO A MILLONES DE PERSONAS. ESTAS EXPERIENCIAS SON EL FRUTO DEL TRABAJO EN SALUD AMBIENTAL, Y ESPERAN SER UN INSUMO PARA SENSIBILIZAR E INVITAR A LA ACCIÓN EN PRO DEL CUIDADO DE LA CASA COMÚN, AHORA Y SIEMPRE.

