

GOTAS DE VIDA

Celebrando la Semana Internacional del

AGUA

Un legado de Sostenibilidad
para las generaciones futuras

I Semana Internacional del Agua
UTEG- Red AMARU, marzo 2023

Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG)
Red Iberoamericana de Tratamientos de Aguas mediante Tecnologías Innovadoras (RED)
Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED)

GOTAS DE VIDA

Celebrando la Semana Internacional del

AGUA

Un legado de Sostenibilidad para las generaciones futuras
I Semana Internacional del Agua

UTEG – Red AMARU

20,21 y 22 de marzo de 2023

Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG)

Red Iberoamericana de Tratamientos de Aguas mediante Tecnologías Innovadoras – RED AMARU

Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED)

Ediciones UTEG

Título: Gotas de vida: celebrando la Semana Internacional del Agua

Sedolfo Carrasquero (Compilador)

Primera edición 2023

ISBN: 978-9942-614-27-8

Multidisciplinar Publicaciones

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EMPRESARIAL DE
GUAYAQUIL (UTEG). RED IBEROAMERICANA DE
TRATAMIENTOS DE AGUAS MEDIANTE TECNOLOGÍAS
INNOVADORAS – RED AMARU. PROGRAMA
IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA
EL DESARROLLO (CYTED)**

Mara Cabanilla Guerra, PhD.
Rectora

Econ. Galo Cabanilla Guerra, PhD.
Canciller

Econ. Mercedes Conforme Salazar, PhD.
Vicerrectora académica

Econ. Karina Alvarado Quito
*Vicerrectora de Innovación, Investigación
y Desarrollo*

Econ. Otto Suárez, PhD.
Decano de Posgrado

Ing. Diego Aguirre, MSc.
Decano de Grado

Arq. José Bohórquez, PhD.
Secretario General

RED AMARU

Dr. Gilberto Colina Andrade
Coordinador General

**PROGRAMA IBEROAMERICANO
DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
PARA EL DESARROLLO (CYTED)**

Dr. Luis Telo De Gama
Secretario General

© Editorial UTEG

© De los autores
ISBN 978-9942-614-27-8
Ecuador

Dirección y edición editorial:
Luis Carlos Mussó

Diseño y diagramación:
Ricardo Espinosa

Primera edición:
Diciembre de 2023 Libro revisado por pares

La edición del Libro de memorias del II Congreso Internacional de Desarrollo,
Ambiente Y Sociedad estuvo al cuidado de la Editorial UTEG. En su
composición tipográfica se utilizó la familia Raleway.

Libro de Conferencias. I Semana Internacional del Agua. UTEG – Red AMARU. 2023

Presentación

La gestión adecuada de los recursos hídricos no solo es esencial para la supervivencia humana, sino también para mantener la salud de los ecosistemas, impulsar el desarrollo económico y enfrentar los desafíos del cambio climático. Es por ello que la conciencia y la acción responsable en torno al manejo del agua son cruciales para un futuro sostenible.

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) «Agua Limpia y Saneamiento» (ODS 6) es esencial para abordar la crisis relacionada con el acceso a agua potable y saneamiento básico. Esta crisis, caracterizada por la escasez, contaminación y acceso desigual al agua, tiene repercusiones profundas en diversos aspectos de la sociedad y el medio ambiente.

Ese es el motivo de presentar este libro tributo a la Semana Internacional del Agua, un evento organizado por la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG) y la Red Iberoamericana de Tratamientos de Aguas mediante Tecnologías Innovadoras – RED AMARU del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED).

Estas memorias son un recorrido que invita a sumergirse en la importancia vital del agua como recurso esencial. A través de los aportes de siete conferencistas de diversos países de Latinoamérica como Ecuador, Chile, Paraguay y Venezuela, se explorarán tres ejes de acción en la lucha por la crisis hídrica, la gobernabilidad de los recursos hídricos, la calidad microbiológica de aguas de consumo, y el tratamiento biológico y fisicoquímico de aguas residuales.

Sirvan estas memorias para celebrar juntos la fuente de la vida y comprometernos a preservarla. ¡Sumérgete en estas páginas y descubre la belleza y fragilidad de nuestro tesoro líquido!

Dr. Sedolfo Carrasquero

Contenido

Eje I: Gobernabilidad y tratamiento fisicoquímico de aguas

Conferencia 1: La gobernabilidad de los servicios de agua potable y saneamiento en el Ecuador

María Luisa Coello

8

Conferencia 2: Tratamiento electroquímico de contaminantes emergentes en agua.

Abdoulaye Thiam

15

Conferencia 3. Hidroxiapatita como un material viable y de fácil acceso para la eliminación de metales pesados en agua

Magna Monteiro

22

Eje 2: Calidad microbiológica de aguas

Conferencia 4: El agua y la transmisión de microorganismos resistentes a antimicrobianos

Marynes Montiel

30

Conferencia 5: Detección de parásitos intestinales en aguas de consumo humano

Evita Mereles

38

Eje III: Tratamiento biológico de aguas

Conferencia 6: Tratamiento de aguas residuales y aprovechamiento de residuos agroindustriales

María Carolina Pire

56

Conferencia 7: Tratamientos biológicos combinados para efluentes industriales con alta carga orgánica y nutrientes

Sedolfo Carrasquero

62

Conferencistas Internacionales



MSc. María Luisa Coello

Economista con mención en Gestión Empresarial, Especialización Marketing. Máster en Desarrollo Económico Avanzado. Máster en Economía Ambiental. Posee un diplomado en Gobernabilidad, Herencia Política y Gestión Pública y Liderazgo para la transformación. Directora ejecutiva de la Agencia de Regulación y Control del Agua. Docente en el área de entorno económico.



Dra. Magna Monteiro Schaerer

Ingeniera Mecánica. Magister en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Doctora en Ingeniería Mecánica. Docente a dedicación exclusiva en la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de la Asunción, Paraguay. Investigadora en líneas como síntesis y caracterización de tierra material a base de impacto de calcio y también en la remoción de metales pesados en aguas residuales contaminadas



Dr. Abdoulaye Thiam

Químico. Doctor en Electroquímica, Ciencia y Tecnología. Realizó estancias doctorales en la Facultad de Ciencias de Ingenierías Ambientales de la Universidad Nankai (Tianjin, China) y en la Universidad de Santiago de Chile. Investigador del programa institucional para el Fomento de la Investigación, el Desarrollo y la Innovación de la Universidad Tecnológica Metropolitana en Chile.



Dra. Marynes Montiel

Bióloga. Magíster en Microbiología. Doctora en Ciencias Ambientales. Docente e investigadora de la Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador. Se ha desempeñado en el área de investigación como detección de microorganismos, indicadores, bacterias, virus y parásitos de importancia en la salud pública en muestras ambientales. Coordinadora de los Laboratorios de Microbiología de la Facultad de Ciencias de la Vida de la ESPOL.



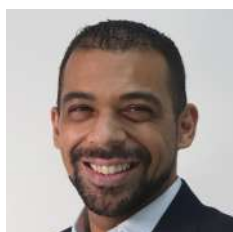
Dra. Evita Mereles

Bioquímica. Magister en Metodología de la Investigación. Doctora en Educación Superior. Docente e investigadora de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad del Este, Ciudad del Este, Paraguay. Directora del Laboratorio de Agua y Alimentos de la Facultad de Ciencias de la Salud de esta Universidad en la Universidad Nacional del Este.



Dra. María Carolina Pire

Ingeniera Química, Magister Scientiarum en Ingeniería Ambiental, Doctora en Ingeniería Ambiental. Profesora Titular de la Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado en Barquisimeto, Venezuela. Investigadora en el área de tratamiento biológico de aguas residuales y aprovechamiento de residuos agroindustriales.



Dr. Sedolfo Carrasquero Ferrer

Ingeniero Químico. Magister Scientiarum en Ingeniería Ambiental, Doctora en Ingeniería Ambiental. Director de Innovación y Desarrollo de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG). Líder de proyectos de investigación en el área de procesos de protección al medio ambiente y producción sostenible.



Eje 1:

Gobernabilidad y tratamiento fisicoquímico de aguas

La Gobernabilidad de los servicios de agua potable y saneamiento en el Ecuador



*Msc. María Luisa Coello*¹
maria.coello@arca.gob.ec

En el Ecuador, el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica tiene como función mejorar la utilización de los activos naturales mediante la promoción de cambios en los paradigmas culturales y bioeconómicos relacionados con la gestión ambiental, social y comunitaria del agua, disminuir la contaminación de los recursos ambientales e hídricos, y aumentar las metodologías para adaptarse y mitigar los efectos del cambio climático. Algunas de las funciones y obligaciones vinculadas a este Ministerio abarcan:

- Preservación ambiental. Diseñar estrategias y políticas para salvaguardar y explotar de manera sostenible los recursos naturales, biodiversidad y ecosistemas.
- Gobernanza del agua. Cumplir las políticas para la administración sostenible de los recursos hídricos, que abarquen regulación y supervisión de los servicios de agua potable y saneamiento.
- Aliviar el cambio climático. Establecer iniciativas para abordar el cambio climático, que incluyan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la

¹ Economista con mención en Gestión Empresarial, especialización Marketing. Máster en Desarrollo Económico. Máster en Economía Ambiental. Directora Ejecutiva de la Agencia de Control y Regulación del Agua (ARCA).

adaptación a los impactos generados por este fenómeno.

- Evaluación y supervisión ambiental, Realizar evaluaciones de impacto ambiental y supervisar el cumplimiento de las regulaciones ambientales en empresas y actividades que puedan afectar al medio ambiente.
- Educación ambiental. Fomentar la educación ambiental para aumentar la conciencia pública sobre la importancia de conservar y utilizar de manera sostenible los recursos naturales.

El Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica en temas de gestión hídrica posee tres instituciones. Una de ellas es la Empresa Pública del Agua (EPA-EP) que se encarga de la comercialización, es decir, es el ente de manejo y recaudación a nivel nacional; luego se tiene al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMI), que involucra el tema del clima, y precipitaciones. Por último, el ente de control, los veedores y cuidadores de los recursos hídricos a nivel nacional, la Autoridad Única del Agua, que tiene la Secretaría del Agua y la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), que maneja tres áreas importantes: recursos hídricos, agua potable y drenaje.

La gobernanza del agua abarca una amplia gama de mecanismos políticos, sociales, económicos y administrativos que se ponen en práctica para desarrollar y gestionar eficazmente los recursos hídricos; así como la prestación de servicios en varios estratos de la sociedad (Victoria, 2018).

Los sistemas de gobernanza desempeñan un papel fundamental a la hora de determinar la asignación de los recursos hídricos, y la manera en que se distribuyen; así como, gestionar los derechos y ventajas asociadas con su acceso y servicios relacionados. El agua posee un poder inmenso, y las personas o entidades que controlan la distribución en términos tanto temporales como espaciales pueden ejercer este poder de diversas maneras.

En el campo de la gobernabilidad del agua potable a nivel nacional se tienen actores trascendentales que son los prestadores públicos, es decir, todas las empresas públicas del agua que manejan los municipios en cada uno de los cantones. También existen los prestadores comunitarios en las zonas rurales, donde ya el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) no puede cubrir los servicios.

El Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica dirige y ejecuta la política pública, remarca el cómo se deben tomar las acciones y otorgan los permisos de agua, que ahora se llaman autorizaciones de uso y/o aprovechamiento. Es importante aclarar que el aprovechamiento del agua se refiere al uso consciente y eficiente de los recursos hídricos para satisfacer las necesidades humanas y las demandas de diversos sectores, como la agricultura, industria y consumo doméstico, de manera sostenible y equitativa. El aprovechamiento eficiente del agua de riego es un factor de preocupación de varios sectores e incluso del Estado. La preocupación recae en la eficiencia de la captación o de la conducción, y en la eficiencia del riego (Nieto y col., 2018).

En el contexto del uso y aprovechamiento del agua, se establece una clara distinción entre aquellos que consumen agua en sus actividades diarias y los que se involucran en la explotación de este recurso con fines productivos, eléctricos o mineros. En el ámbito del consumo humano, las empresas públicas de agua, a través de los municipios, desempeñan un papel fundamental al suministrar agua a los ciudadanos en sus hogares. Además, estas entidades brindan apoyo legal y organizativo a las juntas de agua, las cuales operan bajo una estructura directiva que coordina la prestación de servicios. La gestión eficiente de los recursos hídricos se lleva a cabo mediante un enfoque integral que evalúa la viabilidad y las habilidades técnicas necesarias para expandir la cobertura de servicios de manera sostenible, considerando todos los costos asociados. Este proceso garantiza la continuidad y el mejoramiento constante de la infraestructura, permitiendo la entrega continua de servicios de agua a la comunidad.

En el ámbito de la función como entidad reguladora y de control, la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) despliega un marco normativo sectorial que abarca desde la captación hasta la distribución de agua potable. Se ha avanzado significativamente en la formulación de políticas públicas respaldadas por regulaciones que se aplican de manera integral en todo el ciclo del agua.

En la calidad del agua, se han orientado esfuerzos hacia la mitigación de la desnutrición crónica infantil a nivel nacional, consolidándola como una política gubernamental prioritaria. Asimismo, se han establecido normativas rigurosas, especialmente en relación con el fenómeno de agua no contabilizada, que determina las pérdidas desde la captación hasta la distribución, incluyendo el agua no facturada. Dicha problemática, comúnmente asociada a operaciones municipales deficitarias, ha sido objeto de un control exhaustivo por parte de la ARCA.

El enfoque riguroso en las competencias de la ARCA respecto a estas pérdidas ha dado lugar a resultados notables, logrando una significativa reducción de aproximadamente 380 millones de metros cúbicos de agua anuales perdidos por los gobiernos autónomos descentralizados. Estas pérdidas, atribuibles a la falta de inversión y control, representan un impacto económico considerable y, más allá de ello, ejercen una presión innecesaria sobre los recursos naturales a nivel mundial, dado que se capta el 100% y se distribuye apenas el 50%.

Además, la labor de la ARCA abarca la macromedición, un aspecto esencial para evaluar la disponibilidad hídrica a largo plazo. Este enfoque no solo se dirige a garantizar la sostenibilidad del suministro de agua en las próximas décadas, sino también a certificar la disponibilidad del recurso para los aprovechamientos productivos. En conjunto, estas acciones demuestran el compromiso inquebrantable de la ARCA con el control efectivo, la conservación y la gestión responsable de este recurso vital. En la función de la ARCA como entidad de control, en alineación con las indicaciones del Ministerio, se asume la responsabilidad de emitir autorizaciones, garantizando la estricta adherencia a los acuerdos suscritos por los sujetos bajo supervisión en el marco del Programa de Regulación y Ordenamiento (PRO). En casos de incumplimiento, se detenta la autoridad para imponer multas y sanciones, pudiendo incluso elevar el asunto a instancias superiores.

Como entidad integral de control, la ARCA funge como vigilante del agua en el territorio, supervisando todas las autorizaciones y controlando activamente la calidad del recurso hídrico. Es crucial destacar que tanto la cantidad como la calidad del agua son aspectos de alta relevancia, y a través de rigurosas regulaciones, se gestiona la calidad y se promueve el uso eficiente del agua, extendiendo el control más allá de los sectores convencionales como agua potable y saneamiento, para abarcar también industrias, instalaciones eléctricas y empresas mineras.

El objetivo estratégico de la ARCA es evolucionar hacia una agencia más eficiente y controladora, reconociendo que el agua es un recurso vital que debe conservarse, inspirados por ejemplos de otros países como Australia y Chile, que enfrentaron severas crisis de agua, y buscaron fomentar una conciencia colectiva sobre la importancia de preservar el agua. La vinculación y participación ciudadana son aspectos fundamentales del enfoque de la ARCA, colaborando estrechamente con diversos actores, incluyendo el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el Consejo Nacional de Competencia, la Defensoría del Pueblo, y otros organismos gubernamentales y cooperativas internacionales.

En los últimos dos años de administración en la ARCA, se han promulgado numerosas regulaciones, incluida la gestión efectiva de la calidad del agua, antes descuidada. Se están implementando módulos para el seguimiento y la trazabilidad de la información, facilitando su intercambio con diferentes ministerios y actores relevantes. La información pública se erige como un componente clave para la toma de decisiones y la acción efectiva en el territorio. El trabajo articulado en las comunidades, la socialización y la participación ciudadana son elementos esenciales para el éxito de las iniciativas en la ARCA, respaldando la consecución de metas y objetivos en conjunto con los diversos actores involucrados.

Con el propósito de continuar fortaleciendo las regulaciones para ejercer un control efectivo en el territorio y asegurar el cumplimiento de las políticas estatales, es imperativo destacar la conformidad con los preceptos constitucionales. Según la Constitución, se reconoce el derecho de toda persona a acceder progresiva y universalmente al agua potable, asegurando su calidad, cantidad y suministro. Este derecho, considerado humano e irrenunciable, prohíbe cualquier forma de privatización del agua, estableciendo que su gestión será exclusivamente pública o comunitaria.

La alineación con los actores involucrados, desde el Ejecutivo hasta los agentes externos, es esencial para cumplir con regulaciones efectivas y asegurar el compromiso colectivo frente a los sujetos a control, quienes son los responsables de

cumplir con la normativa. Se prevé la implementación de estrategias técnicas para continuar regulando y controlando las prácticas relacionadas con la lluvia.

En el contexto del sector privado, que desempeña un papel crucial, se destaca la importancia de cumplir con las regulaciones, tanto a nivel nacional como internacional, para conservar el agua y garantizar la aceptación de productos en el mercado exterior. En este sentido, se subraya la colaboración estrecha de la ARCA con la academia, con convenios vigentes con varias universidades como Universidad San Francisco de Quito, Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL) y la Universidad Agraria del Ecuador, para abordar distintos aspectos, desde monitoreos en territorio hasta proyectos de investigación en temas específicos de riego y drenaje.

En la gestión del recurso hídrico a nivel nacional, los prestadores de servicio, ya sean públicos o comunitarios, tienen un papel esencial. Estos incluyen gastos municipales, hogares provinciales, prestadores públicos y comunitarios no públicos. Es importante señalar la relevancia de los sectores estratégicos como la agricultura y la soberanía alimentaria, que deben ser considerados en todas las fases de regulación.

A pesar de que la población ecuatoriana continúa creciendo, con una cifra actual de 17 millones, el 80% de la población ya tiene acceso al agua. Un 36% de esta población se encuentra en zonas rurales, y se reconoce la necesidad de abordar temas específicos como la agricultura y el riego en estas áreas.

En la gestión comunitaria, a nivel nacional existen 220 municipios, pero en el ámbito comunitario en la región Costa hay 1800 Juntas de Agua Potable (JAP), representando el 20% de la población comunitaria. En la región Sierra, donde se registran índices notables de desnutrición infantil, se cuentan con 5850 juntas, abarcando servicios tanto de agua potable como de riego y drenaje. Por su parte, en la región Oriente, se tienen 1350 juntas, demostrando la conciencia de la población en áreas rurales sobre la necesidad de una gestión comunitaria debido a limitaciones de cobertura e inversión.

Estos datos son cruciales, ya que a nivel nacional se gestionan alrededor de 9000 cuentas de agua, incluyendo riego, drenaje y agua potable, cifra que ha experimentado un aumento considerable en los últimos dos años. Anteriormente, se reportaban solo 400 Juntas, evidenciando un incremento del 500-600% en la recopilación de información durante esta administración del ARCA. Es importante mencionar que la ARCA trabaja en seis zonales: Chimborazo, Azuay, Guayas, Manabí, Loja y Zamora. Esta descentralización es resultado de un proceso arduo y colaborativo, respaldado por la voluntad del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, así como la Gerencia de Regulación y Control del Agua. Este proceso ha permitido acercarse a los usuarios del agua, abordando temas como permisos, demandas y contaminación directamente en territorio. Desde la creación de la agencia en 2014 hasta 2022, han transcurrido siete años, y se han centrado los esfuerzos en intensificar el control en territorio de manera significativa.

En la gestión de la ARCA, se han identificado 22 indicadores de agua potable y saneamiento a nivel nacional, utilizando una plataforma respaldada por la Asociación de Municipalidades del Ecuador y el INEC. Estos datos validados se publican en la página web, contribuyendo significativamente a mejorar la prestación de servicios a nivel nacional. Mediante esta plataforma, se evalúan a todos los GAD municipales, instándolos a garantizar un suministro continuo de agua de calidad, reducir la llamada «agua no contabilizada» y abordar cualquier tipo de contaminación. Se categorizan a los gobiernos locales como eficientes, buenos, aceptables, regulares o deficientes, según la escala que se muestra en la Figura 1.

Este ranking anual no solo fomenta la competencia entre municipios, sino que también brinda a los ciudadanos información sobre la calidad del agua en sus respectivas localidades. El benchmarking, disponible en la página web de la ARCA, se ha convertido en una herramienta para la toma de decisiones, especialmente en la categorización de municipios de diferentes regiones. Además, se cuenta con un boletín estadístico histórico desde 2019, obtenido con el respaldo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Este boletín evidencia la mejora en la prestación del servicio cuando se realizan inversiones efectivas en agua potable y saneamiento a nivel nacional.



Figura 1. Escala de evaluación para los prestadores de servicio del agua

La ARCA realiza también un seguimiento minucioso de cada certificado de disponibilidad de agua que se controla, utilizando el sistema SARA (Figura 2). Este sistema, alimentado por los informes de los GAD provinciales y municipales, permite elaborar boletines estadísticos, realizar análisis históricos y clasificar los indicadores para mejorar la prestación del servicio. Este enfoque se alinea con las inversiones del BID en agua potable y saneamiento a nivel nacional, evidenciando la efectividad de las inversiones mediante el benchmarking.

La transparencia y el control preciso son fundamentales para abordar la problemática de agua no contabilizada y mejorar la prestación del servicio a nivel nacional. El agua no contabilizada corresponde al volumen de agua potable producida que no llega a facturarse. Para el 2018 se tenía un 48% de pérdida a nivel de distribución a nivel de GAD municipal. Para el 2020, se siguió manteniendo un 48% (Figura 3). Se deben mitigar las pérdidas de 320 millones de dólares anuales producto de que cada mes se desperdician 8 millones de metros cúbicos de agua potable. Las regulaciones para el agua no contabilizada no solamente son hechas para mitigar las pérdidas millonarias, sino también para conservar y saber que el recurso agua es finito y que hay que saber preservarlo y cuidarlo. La regulación del agua no contabilizada garantiza la disponibilidad para todos los consumidores, incrementa la capacidad de recaudación y contribuye a la sostenibilidad del medio ambiente.



Figura 2. Sistema de recopilación de información y recopilación de prestadores públicos y privados

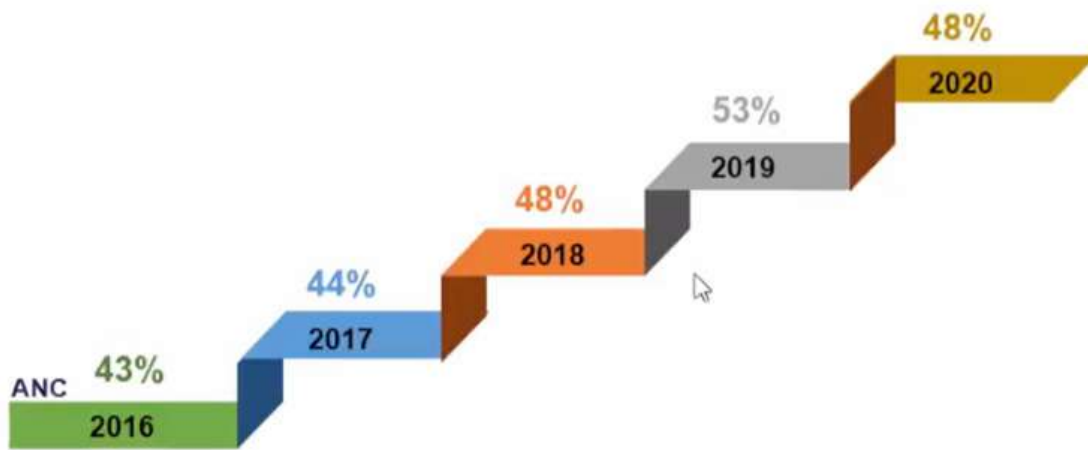


Figura 3. Evolución del porcentaje de agua no contabilizada (ANC)

Desde la ARCA se está trabajando no solamente en la conservación del recurso hídrico, sino también en una prestación de calidad a todos los 17 millones de habitantes ecuatorianos. Se generan todas las acciones de control de una política pública en temas de calidad de agua, esto se debe a que, si una persona no accede a un agua sana, no puede amamantar a su bebé y todo está concatenado. Es importantísimo abordar problemas como la desnutrición crónica infantil y obviamente con la mejora de la prestación del servicio se contribuye con esta situación.

Actualmente, 27 de cada 100 menores de dos años sufren de desnutrición crónica infantil (DCI), es decir, 180.000 niños la padecen. Las principales provincias afectadas por la desnutrición crónica infantil son: Cotopaxi, Bolívar, Chimborazo, Tungurahua y Santa Elena (Figura 4). La desnutrición ha incrementado del 24 al 27% en niños menores a dos años del 2012 al 2018; por lo que desde ARCA se colabora en un plan estratégico de una mesa-comité donde todas las instituciones del Ejecutivo articulen acciones para mejorar la prestación del servicio de agua potable y con ellos mitigar la desnutrición crónica infantil a futuro.

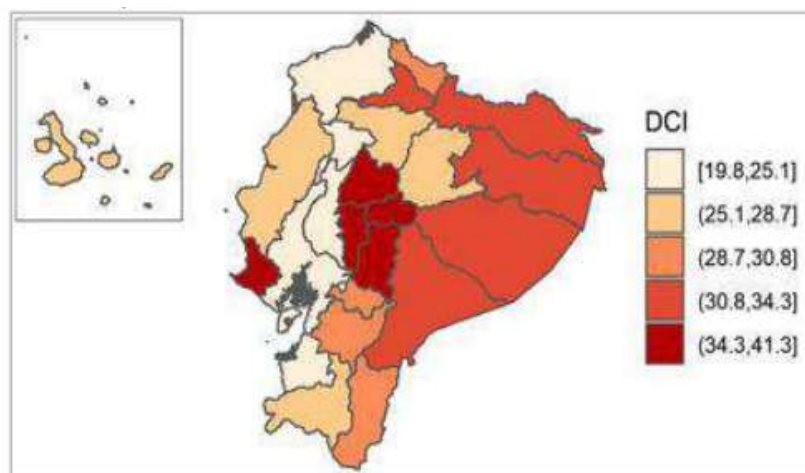


Figura 4. Mapa de calor de desnutrición crónica infantil en menores de 2 años (ENSANUT, 2018)

Consideraciones Finales

La temática del agua es transversal, si un ciudadano no bebe un agua sana no va a estar saludable, va a estar enfermo, no va a ser productivo. Entonces hay que empezar la mitigación desde la base, con una prestación del servicio de agua potable de

calidad y trabajar desde la ARCA en articulación con el Banco de Desarrollo, la Secretaría Técnica de Nutrición Crónica Infantil, el Ministerio de Ambiente y Transición Ecológica y otras instituciones, para tener presencia en las 90 cabeceras cantonales que involucran a las cinco provincias con mayor índice de nutrición infantil, recorriendo 728 parroquias a nivel nacional. El agua es un recurso vital, y todos son actores responsables no solamente en la conservación, sino también en el continuismo de un agua de calidad, y sobre todo en la sostenibilidad de los servicios públicos.

Referencias Bibliográficas

ENSANUT (2018). Proyecto de inversión Infancia con Futuro. https://www.infancia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/2_1_proyecto_infancia_con_futuro0150638001678212350

Victoria, M. (2018). Gobernabilidad y gobernanza del agua como bien común de la naturaleza. *Journal of Law and Sustainable Development*, 6(1), 1–20. <https://doi.org/10.37497/sdgs.v6i1.87>

Nieto, C., Pazmiño, E., Rosero, S., Quishpe, B. (2018). Estudio del aprovechamiento de agua de riego disponible por unidad de producción agropecuaria, con base en el requerimiento hídrico de cultivos y el área regada, en dos localidades de la Sierra ecuatoriana. *Siembra*, 5(1), 51–70. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1427>



Tratamiento electroquímico de contaminantes emergentes en agua



Dr. Abdoulaye Thiam²
athiam@utem.cl

La disponibilidad de agua, un recurso indispensable para la vida, se encuentra en una situación que se podría calificar como muy crítica, subrayando la urgencia de su cuidado y preservación. En la actualidad, es común que, en las actividades diarias, se abra el grifo y se utilice el agua potable sin reflexionar sobre las posibles repercusiones. No obstante, es esencial comprender los impactos que esto puede tener, especialmente para las futuras generaciones. El uso actual del agua tiene implicaciones significativas, y es crucial considerar no solo las necesidades del presente, sino también el legado que se dejará a las generaciones venideras en términos de cantidad y calidad del recurso hídrico.

Para abordar estos desafíos y cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fijados para el año 2030, es imperativo entender la situación mundial del agua. Se puede analizar la escasez hídrica desde diferentes perspectivas, la física y la económica, variables que impactan en la disponibilidad y distribución del agua. Hay zonas en el planeta con escasez hídrica y zonas con disponibilidad de agua, pero con desafíos en infraestructuras para garantizar

² Licenciado en Química. Doctor en Electroquímica. Investigador en el programa institucional de fomento a la I+D+i de la Universidad Metropolitana de Chile.

su acceso y calidad. Este análisis permite entender la relación entre la disponibilidad de agua, la infraestructura adecuada y la calidad del recurso, aspectos fundamentales al abordar normativas y estrategias para el tratamiento del agua.

En zonas con disponibilidad del recurso hídrico se identifica la necesidad apremiante de desarrollar infraestructuras que permitan una gestión eficiente y sostenible de este recurso vital. La problemática del estrés hídrico aporta una perspectiva fundamental a considerar, ya que las consecuencias pueden traducirse en la limitación del acceso a agua potable en diversas zonas. Por lo tanto, es de suma importancia proyectar y anticipar acciones para evitar situaciones futuras donde la escasez hídrica se convierta en una realidad insuperable. La planificación proactiva se vuelve esencial para garantizar que iniciativas efectivas se implementen y que, en el futuro, no enfrentemos desafíos más complejos relacionados con la disponibilidad de agua potable en determinadas regiones.

El agua se erige como el pilar esencial que sustenta diversos aspectos de desarrollo humano. La erradicación del hambre, la promoción de la salud, el acceso a la educación y la generación de energía, todos estos aspectos dependen intrínsecamente del recurso hídrico. En este sentido, cuidar y preservar el agua se convierte en una prioridad ineludible para asegurar el cumplimiento exitoso de todos estos objetivos y, en última instancia, mejorar la calidad de vida a nivel global. Sin agua no puedes erradicar el hambre, sin agua no puede haber salud, sin agua ni educación no puede haber energía. Así que el pilar de todos esos objetivos es el agua y es muy importante que se trate de cuidarlo.

El agua fue importante durante los años de pandemia por COVID-19 debido a que era imprescindible lavarse las manos. De ahí, la importancia de este recurso, no solo para el consumo, sino también la salud, bienestar y desarrollo económico.

Con respecto a la situación actual mundial del agua, al menos 3.000 millones de personas desconocen la calidad del agua de consumo debido a falta de supervisión. Los ecosistemas relacionados con el agua en el mundo se están degradando a un ritmo alarmante, en los últimos 300 años más del 85% de los humedales del planeta se han perdido. Es por ello que, para cumplir con las metas de agua potable, saneamiento e higiene para 2030 se requiere incrementar por cuatro el ritmo del progreso. Al ritmo actual, en 2030, 1600 millones de personas no contarán con agua potable, 2800 millones de personas no tendrán saneamiento gestionado de manera segura, más de 1900 millones de personas no disponen de instalaciones básicas para lavarse las manos.

La situación planteada es preocupante, y como profesionales en la ciencia y la ingeniería, se debe abordar de manera proactiva. El COVID-19 alertó sobre las consecuencias inminentes de la falta de agua para consumo humano, y como científicos e ingenieros, es imperativo plantearse la pregunta crucial: ¿cómo podemos contribuir a resolver este problema?

Cada uno de las ramas de la Ingeniería, ya sea Ingeniería Civil, Mecánica, Química, Industrial u otras especialidades, tienen la capacidad de aportar soluciones significativas. Un enfoque clave podría ser el desarrollo de tecnologías sostenibles para eliminar contaminantes, siendo este un paso fundamental en la preservación del recurso hídrico. Además, se puede desempeñar un papel crucial en la formulación de políticas para la gestión eficiente de los recursos hídricos. Esto implica un monitoreo detallado de canales y lagos para comprender el consumo y, a su vez, permitir una gestión más precisa y sostenible.

Participar en la protección del agua es otra área vital, guiada por principios de gobernanza. Aquí, la comprensión profunda de las normativas y la contribución al establecimiento de políticas efectivas se vuelve esencial. Cada uno de los ciudadanos puede identificar en qué ámbito específico puede contribuir para proteger este bien común y optimizar su uso.

En el ámbito agrícola, por ejemplo, el uso excesivo del agua, que representa aproximadamente el 70% del total del consumo, es una cuestión crítica. Introducir tecnologías innovadoras, como la agricultura inteligente, que emplea sensores y sistemas de riego eficientes, puede ser clave para optimizar el uso del agua y reducir el impacto ambiental de esta actividad. Es fundamental compartir las habilidades y conocimientos para marcar una diferencia significativa en la conservación del agua y el desarrollo sostenible.

Otro aspecto que se debe abordar es la problemática de la contaminación del agua, su relevancia radica en mantener la cantidad y calidad del agua, aspectos que se han deteriorado recientemente. En este contexto, los contaminantes emergentes, como compuestos farmacéuticos, pesticidas, aditivos y productos de cuidado personal, se han convertido en focos de preocupación. Los contaminantes emergentes, se refieren a compuestos químicos que surgen como consecuencia de los esfuerzos humanos realizados en la existencia diaria, que abarcan las prácticas de higiene personal y atención médica. Estos compuestos, en virtud de su presencia, tienen el potencial de inducir consecuencias adversas en el ecosistema y, por lo tanto, modificar el medio ambiente circundante (Ramírez y col. 2019; Urbina y Vera, 2020).

Estos contaminantes emergentes anteriormente no llegaban al agua o no eran detectables, lo que ha generado una falta de normativas específicas. Sin embargo, con los avances en Química Analítica, ahora es posible cuantificar su presencia y entender los efectos negativos que generan en el medio ambiente. La ausencia de legislación clara permite a las empresas verter cantidades significativas de estos contaminantes, lo que agrava la polución ambiental.

La problemática se intensifica debido al modelo de uso y descarga lineal predominante en muchas empresas, donde se toma el agua, se utiliza y se descarga sin un tratamiento adecuado. Es fundamental cambiar este enfoque adoptando un modelo circular, es decir, tratar el agua antes de su descarga para que pueda ser reutilizada. Este enfoque contribuye a un desarrollo sostenible al reducir la presión ejercida sobre los recursos hídricos y garantiza un suministro de agua confiable.

Para lograr este cambio, es necesario implementar tecnologías seguras y eficientes que fomenten la austeridad en el uso del agua. Esto no solo conlleva a la reducción del estrés hídrico, sino que también contribuye a establecer un nuevo paradigma en la gestión del agua, asegurando su disponibilidad y promoviendo la sostenibilidad a largo plazo.

En el desarrollo de tecnologías, es evidente que hay que tomar en cuenta la complejidad inherente a la estabilidad de los productos químicos, especialmente en el caso de fármacos y pesticidas. Estos compuestos están diseñados para resistir condiciones extremas, como la exposición a la luz, lo que complica su eliminación eficiente en las plantas de tratamiento de agua convencionales. Es imperativo abordar esta problemática mediante el desarrollo de tecnologías más eficientes que puedan integrarse de manera complementaria a las existentes, mejorando su capacidad de eliminación.

En este contexto, se destaca la relevancia de las tecnologías electroquímicas, centradas en el uso de la electricidad para desencadenar reacciones químicas y generar oxidantes destinados al tratamiento del agua. Estas tecnologías electroquímicas se pueden categorizar en tres grupos principales (Tabla 1), abarcando métodos de oxidación, de reducción, y de separación, como la electrocoagulación (Juárez y col. 2022).

Oxidación	Reducción	Separación
Oxidación electroquímica	Electrogeneración de peróxido de hidrógeno	Electrocoagulación
Electroclorinación	Reducción/Recuperación de iones metálicos	Electrosorción
Fotoelectrocatalisis	Reducción electroquímica de oxianiones	Electrodialisis
	Dehalogenación de contaminantes orgánicos	Deionización capacitiva

Tabla 1. Categorización de las técnicas electroquímicas

La importancia de desarrollar estas tecnologías radica en su compatibilidad ambiental, ya que el electrón actúa como el reactivo principal, eliminando la necesidad de sintetizar o adquirir reactivos químicos adicionales. Su versatilidad, seguridad y eficiencia energética destacan como atributos clave. La eficacia de estas tecnologías depende en gran medida de los diseños y tipos de electrodos utilizados, lo que subraya la necesidad de enfoques cuidadosamente diseñados.

Cabe resaltar que, aunque se proclaman como tecnologías limpias y ambientalmente compatibles, la verdadera sostenibilidad depende de la fuente de energía empleada. Por ejemplo, en sistemas alimentados por energía nuclear, la limpieza del electrón

se ve contrarrestada por la generación de residuos radiactivos. Así, la compatibilidad ambiental de estas tecnologías electroquímicas debe ser evaluada en el contexto de la totalidad de su cadena de suministro energético.

En un plano descriptivo, estas tecnologías electroquímicas encuentran su fundamento en la electrólisis y en el funcionamiento de dos tipos de celdas electroquímicas, las celdas galvánicas y las electrolíticas (Figura 1). Esta visión ofrece un panorama esclarecedor de cómo estas tecnologías se integran en el tratamiento del agua, proporcionando soluciones eficaces y compatibles con el medio ambiente.

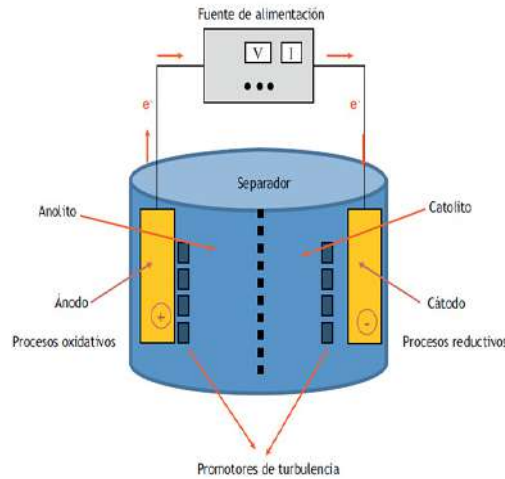


Figura 1. Principales componentes de los reactores electrolíticos

La configuración fundamental de un reactor electrolítico requiere dos electrodos, el cátodo, donde se produce la reducción, y el ánodo, donde ocurre la oxidación (Figura 2).

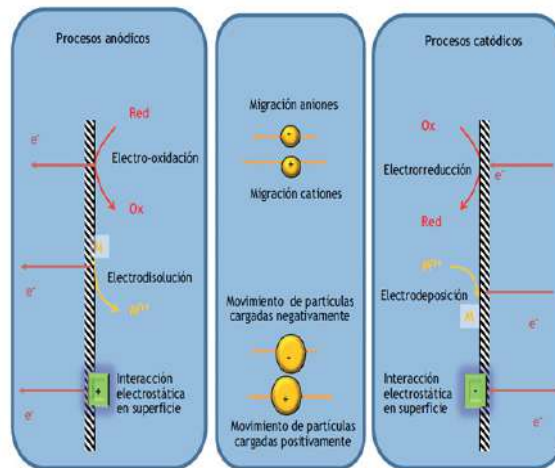


Figura 2. Principales procesos que pueden desarrollarse en una celda electrolítica

Por su parte, los procesos electroquímicos de oxidación avanzada se destacan por su eficacia en la generación de radicales hidroxilos. Estos radicales, reconocidos por su capacidad oxidante excepcional, son capaces de eliminar diversos contaminantes presentes en el agua. El radical hidroxilo se posiciona como uno de los oxidantes más potentes, superando incluso al ozono en términos de fuerza oxidante. Su aplicación se justifica por su alta reactividad en la eliminación de contaminantes sin generar residuos adicionales durante el proceso de tratamiento.

Es importante señalar que, aunque el radical hidroxilo no es selectivo y puede eliminar una amplia gama de contaminantes, su no selectividad se convierte en una ventaja significativa. Esta característica lo distingue, ya que su capacidad para abordar contaminantes diversos lo hace altamente efectivo en aplicaciones de tratamiento de agua.

Dentro de los métodos de oxidación avanzada, se destacan la oxidación generada y los procesos basados en la reacción de Fenton, como electro-Fenton y fotoelectro-Fenton (Figura 3). Además, se tienen métodos electroquímicos de separación, como la electrocoagulación, que complementan la eficiencia de los procesos de oxidación avanzada en la eliminación de contaminantes. Estos enfoques electroquímicos representan una vanguardia en la búsqueda de soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas.

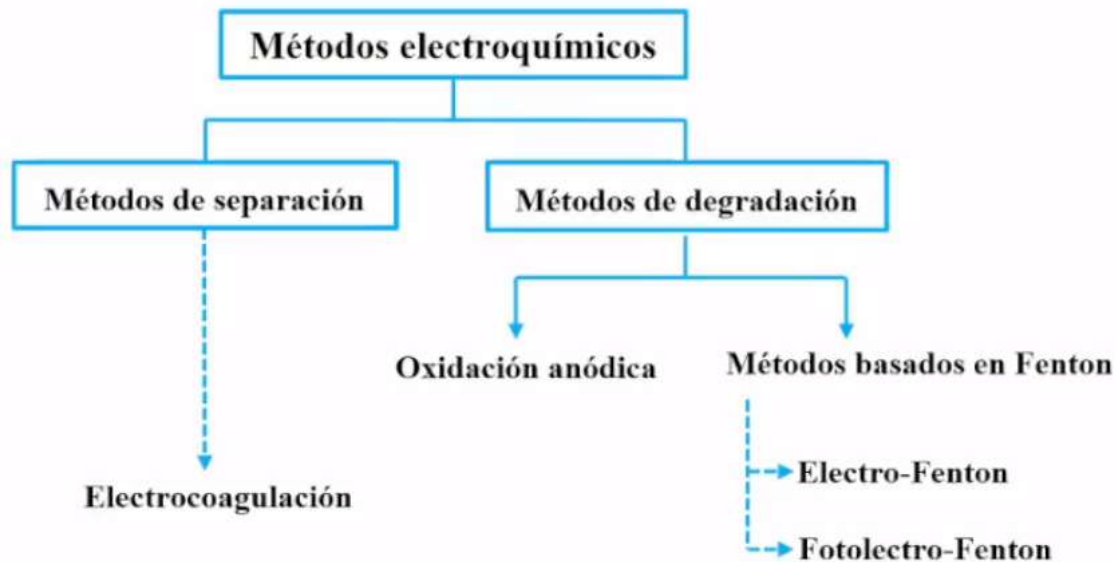


Figura 3. Procesos electroquímicos de oxidación avanzada.

En el ámbito de la electroquímica aplicada al tratamiento de agua, se utiliza electricidad para desencadenar reacciones en un electrodo, siendo el agua la sustancia que se oxida en el electrodo, generando así radicales hidroxilos. Estos radicales son los responsables de la eliminación de los contaminantes presentes en el agua. Existen dos tipos de materiales en este proceso: los activos y los no activos. Los materiales activos reaccionan con los radicales hidroxilos, transformando el contaminante inicial en otro menos nocivo. Por otro lado, los materiales no activos no reaccionan con los radicales, lo que permite que estos últimos estén más disponibles para eliminar el contaminante. Aquí, la oxidación se explica mediante una alta absorción. Una entalpía de absorción más baja indica una absorción de radical menos intensa, lo que implica que el radical hidroxilo está más disponible para la eliminación (Candia y col. 2017). Este fenómeno se puede observar en ejemplos prácticos, como el platino y el diamante dopado con boro, que son electrodos activos con alta entalpía de absorción.

Un ejemplo de esta tecnología, se desarrolló por ingenieros israelíes quienes generaron un prototipo que permite tratar el agua de piscinas utilizando esta innovadora tecnología electroquímica. Se utilizó un electrodo de diamante dopado con boro, y no existe la necesidad de añadir cloro para la desinfección. Se generan radicales hidroxilos que permiten eliminar las bacterias, virus y compuestos orgánicos que vienen de los protectores solares, y esto permite no reciclar tan frecuentemente agua de piscina.

Por su parte, los métodos basados en Fenton generan radicales hidroxilos utilizando el oxígeno del aire y un cátodo a base de carbono. Se produce peróxido de hidrógeno, luego se añade hierro, y se forman los radicales hidroxilos que pueden eliminar los contaminantes (Figura 4).

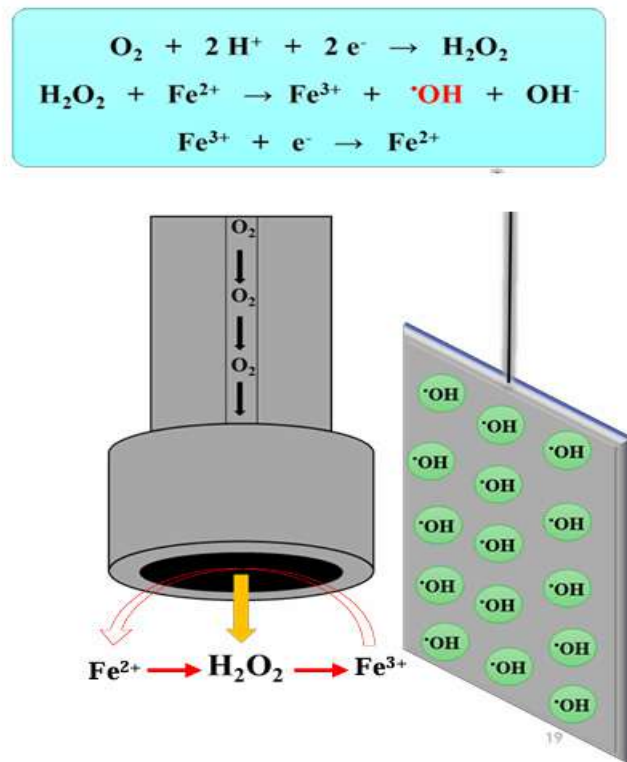


Figura 4. Fundamentos del proceso Fenton

El proceso foto-Fenton se puede optimizar irradiando luz solar ultravioleta, lo que permite que el hierro en medio ácido forme hidróxido de hierro, y estos compuestos se puedan fotodegradar formando radicales hidroxilos. Estos sistemas son muy eficientes, logran reducir el tiempo para la remoción de color en efluentes textiles de 8 a 0,5 h cuando se aplican en reactores electroquímicos. Los procesos foto-Fenton se utilizan para la remoción de fármacos como antibióticos, se ha reportado la eliminación de cefaloxil en 15 minutos cuando se utiliza luz solar.

Otro proceso electroquímico es la electrocatálisis, se basa en usar un semiconductor y con la irradiación de luz ultravioleta, o solar, se pueden generar especies oxidantes para poder eliminarlo. Este campo tiene muchas aplicaciones; por ejemplo, la eliminación de dióxido de carbono (CO₂), la electrosíntesis y la descomposición del agua para producir hidrógeno y torio. En el ámbito del tratamiento de agua, se deben generar iones hidroxilos, es esencial la generación de portadores de carga, específicamente la introducción de huecos en un semiconductor. Cuando un electrón se mueve de la banda de valencia a la banda de conducción, se generan pares electrón-hueco, y estos huecos pueden emplearse para producir radicales. Asimismo, los huecos son útiles para reducir directamente los contaminantes y para generar peróxido. No obstante, uno de los desafíos inherentes a estos procesos es la recombinación, donde el electrón en la banda de conducción puede recombinarse con el hueco en la banda de valencia.

Los últimos estudios en tratamiento electroquímicos se enfocan en la síntesis de nanopartículas magnéticas, que, además de ser binarias, poseen propiedades magnéticas que facilitan su separación mediante un campo magnético, permitiendo así su recuperación y reutilización. También se encuentran los Metal-Organic Frameworks (MOFs), estructuras novedosas conocidas por su alta porosidad, reactividad y sensibilidad.

Consideraciones Finales

Hoy en día las investigaciones deben estar orientadas para acelerar el desarrollo de tecnologías innovadoras en América Latina para el tratamiento de las aguas implementando tecnología que permita la reutilización del recurso. A pesar de los mitos que circulan sobre el consumo energético de las tecnologías electroquímicas, diversos estudios demuestran que estas tecnologías pueden ser más eficientes energéticamente que los métodos convencionales utilizados en la actualidad.

Referencias Bibliográficas

Candia, C., Thiam, A., Salazar, C., Martínez, C., Salazar, R. (2017). Enhanced degradation of the industrial textile dye disperse red BD by electrochemical process with different anodes. *Journal of the electrochemical society*, 164 (13) E440-E447. 10.1149/2.1101713jes.

Juárez, H. R., Soto-Padilla, M. Y., & Acosta, M. D. (2022). Electrocoagulación de iones de metales pesados en aguas residuales: Una revisión. *Cultura Científica y Tecnológica*, 19(2), 28-42.

Ramírez, L.; Chicaiza, S.; Ramos, A.; Álvarez, C. (2019). Detección de antibióticos betalactámicos, tetraciclinas y sulfamidas como contaminantes emergentes en los ríos San Pedro y Pita del cantón Rumiñahui. *Revista de Ciencias de la Vida*, 30(2), 88-102.

Urbina, J.; Vera, J. (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. *Informador Técnico*, 84(2), 249-263. <https://doi.org/10.23850/22565035.2305>.



Hidroxiapatita como material viable y de fácil acceso para la eliminación de metales pesados en agua



Magna Monteiro ³
mmonteiro@pol.una.py

Los biomateriales son todos los materiales (metal, cerámico, polímero, vidrio o compuesto), que pueden ser implantados en el organismo con la finalidad de tratar, restituir, sustituir o aumentar un órgano o tejido perdido o dañado, sin causar cualquier respuesta biológica adversa local o sistémica. Estos materiales son biocompatibles, es decir, tienen la aceptabilidad biológica de los organismos por lo que tienen aplicaciones médico-hospitalarias.

En los primeros estudios de la hidroxiapatita (HAp), este material se empleaba principalmente para sustitución o pérdida de masa ósea. En la actualidad, existen diversas líneas de investigación que aplican este material para funcionalizar otros materiales para diversas aplicaciones médicas y hospitalarias.

El tejido óseo humano está compuesto por una fase mineral, agua y materia orgánica, incluyendo el colágeno, entre otras sustancias (Figura 1). La fase mineral, que se llama hidroxiapatita, conforma huesos y dientes, su fórmula

³ Ingeniero Mecánico. Maestría en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Doctorado en Ingeniería Mecánica. Docente-Investigadora a Dedicación Exclusiva en la Universidad Nacional de Asunción,

general, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, revela que es una cerámica compuesta principalmente por calcio y fósforo. En los primeros estudios de este material, Aoki (1994) aseguró que la hidroxiapatita posee la clave para el origen de la vida, el mecanismo del envejecimiento, la esencia de la inmunología y los métodos de tratamientos médicos para incurables enfermedades como el cáncer y el SIDA. Existen numerosos estudios actuales que aplican este material en estas áreas de investigación, demostrando su relevancia en el desarrollo de tratamientos cerámicos.

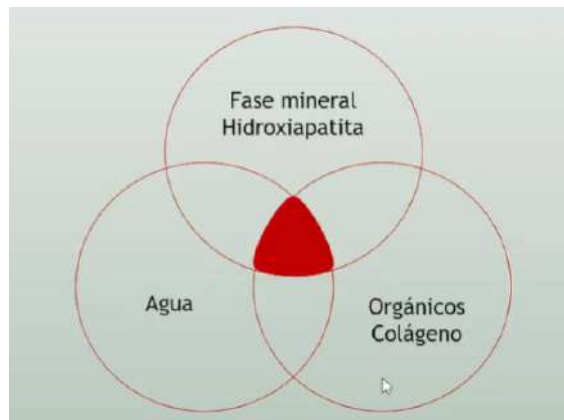


Figura 1. Principales componentes del tejido óseo humano

La fórmula química general de las apatitas es $\text{M}_{10}(\text{Z}_4)_6\text{X}_2$, donde M, Z y X representan metales que pueden sustituir estos elementos químicos en su estructura cristalina (Tabla 1), demostrando así su versatilidad y capacidad de formar otros compuestos estables (Tabla 2).

Componente de la fórmula química

M
Z
X

Metales o grupos

Ca, Sr, Ba, Cd, Pb, Mg, Na, K, H, D, entre otros
P, CO_3 , V, As, S, Si, Ge, Cr, B, entre otros
OH, OD, CO_3 , O, BO_2 , F, Cl, Br, entre otros

Tabla 1. Variedades más comunes en la fórmula de las apatitas

Nombre	Fórmula química
Fluoroapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$
Clorapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$
Hidroapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
Dahlita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6(\text{OH})_2$
Podolita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{CO}_3$
Francolita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6(\text{F}, \text{OH})_2$

Tabla 2. Formas estables más comunes de las apatitas

La estructura cristalina de la hidroxiapatita se presenta en un sistema hexagonal compacto con constantes de red que definen sus propiedades (Figura 2). Tiene una masa molecular de 1004,8 g/mol, es una cerámica de fosfato de calcio, y constituye el componente principal de dientes y huesos en vertebrados.

La obtención de este material puede realizarse de manera sintética en el laboratorio, utilizando reactivos puros o a partir de precursores naturales. Se puede obtener hidroxiapatita directamente de fuentes como cáscaras calcáreas, huesos de animales y cáscaras de huevo, que actúan como precursores.

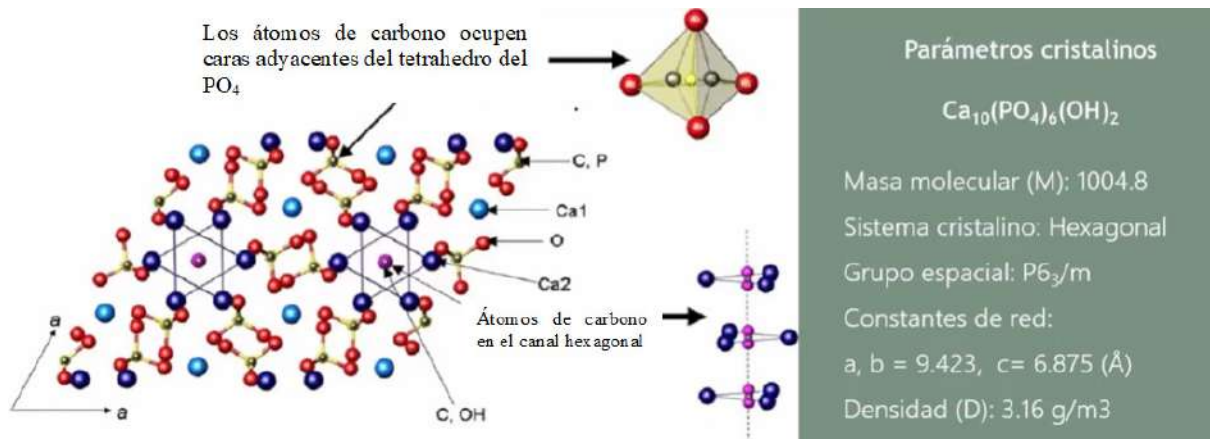


Figura 2. Sistema hexagonal de la Hidroxiapatita

En la obtención de hidroxiapatita a partir de material óseo, la presencia de materia orgánica puede evidenciarse en los huesos quemados (coloración gris), donde una temperatura adecuada puede eliminar completamente esta fracción, dejando solo la fase mineral de hidroxiapatita (color blanco).

Los estudios actuales sobre este material deben considerar todo el proceso de producción, desde la recolección de los precursores hasta la obtención de hidroxiapatita, con el objetivo de desarrollar un procedimiento reproducible, incluso en entornos con tecnologías limitadas, para que las comunidades afectadas por aguas residuales con metales puedan procesar y aplicar este material.

Si se utiliza hueso bovino, primeramente, debe eliminarse el máximo posible de materia orgánica, se deben seleccionar los huesos que contengan la menor cantidad de este tipo de material o que en su defecto sea fácil su eliminación manualmente. Posteriormente, se procede a la etapa de hervido, con el objetivo de eliminar la materia grasa remanente. En la tercera fase, el hueso se mantiene bajo exposición solar controlada, protegido de las inclemencias climáticas, pero con una iluminación adecuada para facilitar la eliminación adicional de material no deseado. Además, se puede optar por triturar el material antes de la calcinación, especialmente en regiones donde se utiliza horno tradicional utilizado en la preparación de alimentos. Este tipo de hornos proporciona condiciones ideales para la calcinación, ya que puede someterse a diversas temperaturas controladas.

En este contexto, se destacan las diferencias en la granulometría de los materiales preparados para los ensayos, siendo un aspecto crucial para la consistencia y reproducibilidad de los resultados, debido a que esta tiene relación con la superficie específica, propiedad de los sólidos que representa la relación entre el área superficial total y la masa del sólido o volumen bruto o área de la sección transversal (m²/kg) o (m²/m³) o (1/m).

Para comprender esta definición se tiene como ejemplo un cubo con arista igual a la unidad. Para calcular el área superficial (Áreas) de este cubo (Ecuación 1), se multiplica la cantidad de caras del cubo por la longitud de la arista al cuadrado. Con esta Áreas, se puede calcular el área superficial específica (Se), es decir, el área que va a estar en contacto con la solución que posee el contaminante (Ecuación 2).

$$\text{Áreas} = 6 * a^2 \quad (1)$$

$$Se = \frac{\text{Áreas}}{\text{Volumen}} \quad (2)$$

Se sabe que mientras más finas sean las partículas, mayor eficiencia se tendrá del proceso de adsorción, es decir, cuanto más yo triture, mayor captura o remoción de ese metal pesado en el proceso de remoción se va a obtener, y eso también por raciocinio

lógico lleva entender por qué se están buscando hoy en día las nanopartículas. Para entender este planteamiento, si se tiene un cubo con arista igual a la unidad, y se encuentra su superficie específica, se obtiene un valor de 6 (Figura 3). Sin embargo, si de este cubo grande se generan 8 cubos de aristas de 0,5, se calcula nuevamente el área superficial específica, y se obtiene 96. Si se divide más el cubo, y se generan 32 cubos más pequeños con arista 0,25, y se calcula la superficie específica, el valor obtenido es de 769,23. Se observa como el área superficial va creciendo exponencialmente. Cabe destacar que no se está aumentando la masa que se tiene, se siguen con la masa del cubo grande, solo que se están reduciendo en partes más pequeñas, por lo que cuanto menos es el tamaño de partícula, mayor será el área superficial. Es por ello que el proceso de remoción será más eficiente porque se tiene más área para estar en contacto con la solución contaminada, por ejemplo, la solución que tiene el metal pesado.

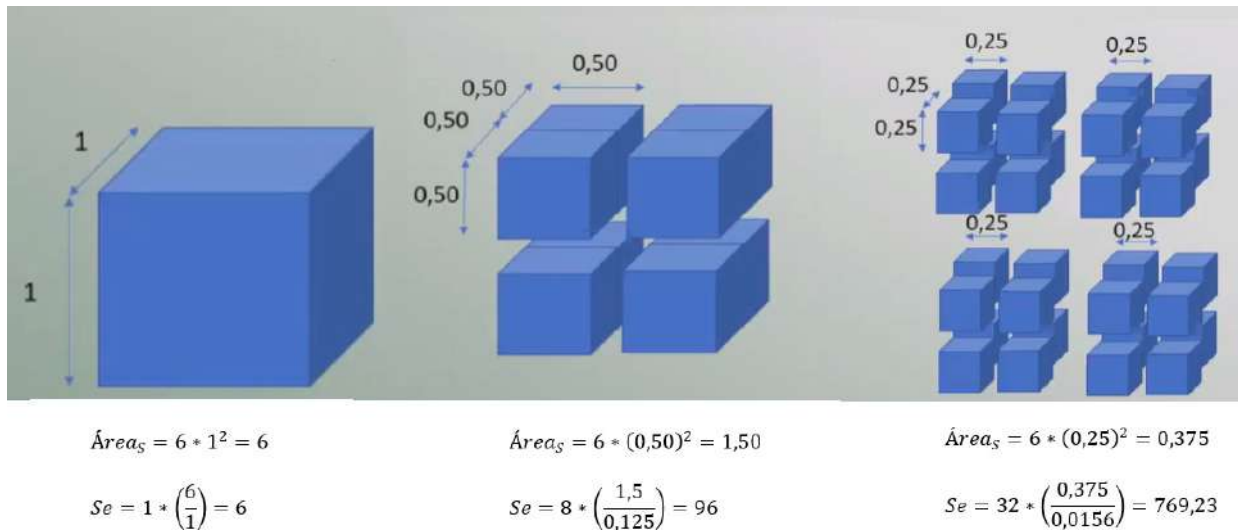


Figura 3. Superficies específicas en cubos de diferentes aristas

Un factor importante que puede influir en la capacidad de sorción de la HAp es su grado de cristalinidad (Ibrahim y col. 2020). Una correlación entre la cristalinidad de la hidroxiapatita y su comportamiento de adsorción de iones fue encontrada en un estudio realizado por Stötzel y col. (2009). Estos autores afirmaron que una disminución de la cristalinidad de la HAp (cristalinidad = 95, 65, 22 y 0%, en el caso de polvos calcinados a 1000 °C, calcinados a 700 °C, polvos mesocristalinos y nanocristalinos, respectivamente), conduce a un crecimiento de su superficie específica, lo que es beneficioso para las propiedades de sorción del material y su capacidad para eliminar metales pesados e iones, como lo demuestra la Figura 4. Además, este trabajo reveló que el polvo de hidroxiapatita nanocristalina supera al carbón activado en la eliminación de los metales divalentes examinados en el estudio (Pb^{2+} y Zn^{2+}) en casi un orden de magnitud, lo cual demuestra el atractivo de este sorbente apatítico como inmovilizador de metales pesados.

No se observaron diferencias significativas entre el material nanocristalino y mesocristalino hasta que se analizan los elementos adsorbidos después del Galio, esto se debe a que el proceso de remoción de este metal pesado no solo está influenciado por el tamaño de partícula sino también otros factores, como por ejemplo el pH de la solución y el tiempo de contacto. A pesar de que la remoción con hidroxiapatita es muy rápida hay factores que potencian esta captura.

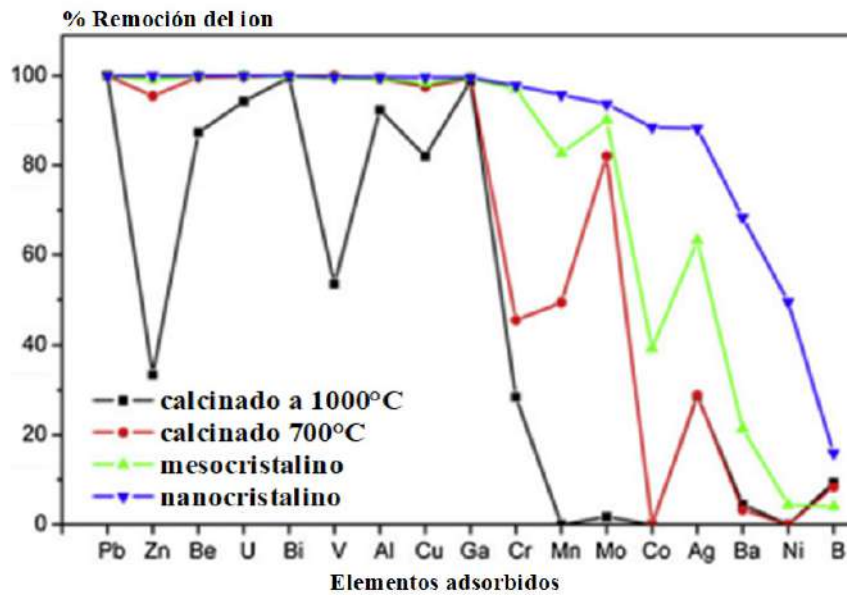


Figura 4. Comparación del potencial de adsorción de iones de polvos de HAp con diferentes cristalinidades. Los polvos se sumergieron en una solución multicomponente de iones (1000 mg/L Ca, 100 mg/L Be, B, Fe, Zn, As, Se y 10 mg/L Li, Na, Mg, Al, K, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Sr, Mo, Rb, Ag, Cd, Te, Ba, Tl, Bi, Pb, U. Esta solución fue diluida con agua doblemente destilada hasta concentraciones de 100–1000 ppb durante 10 min. (Stötzel et al., 2009).

Otro factor que afecta el desempeño de la hidroxiapatita es la temperatura de calcinación. Numerosos estudios confirman que el aumento de la temperatura de calcinación en el proceso ejerce una influencia considerable. Por ejemplo, si se consideran cuatro nanopartículas, una elevada temperatura de calcinación puede promover su extinción debido a que el incremento de la temperatura favorece la coalescencia de las partículas. El aumento de la temperatura actúa como un catalizador, desencadenando una serie de interacciones entre partículas. Cuando dos partículas se acercan, se fusionan y originan una partícula más grande.

En el caso de temperaturas elevadas, existe una dualidad de interpretaciones. Algunos sugieren que se produce un reordenamiento cristalino, especialmente evidente al trabajar con micropartículas y microcristales. Sin embargo, al pasar a la fase de nanoescala, este fenómeno no es tan pronunciado.

El aumento de temperatura influye en la generación nanopartículas de manera significativa. En ocasiones, la percepción de obtener nanopartículas en altas temperaturas puede ser engañosa. Este proceso, a pesar de inducir la formación de nanopartículas, también favorece las interacciones entre ellas, resultando en un aumento del tamaño de la partícula debido a la unión y fusión.

Se han dedicado considerables esfuerzos al estudio de la remoción de metales usando hidroxiapatita, llevándose a cabo pruebas de eficiencia a altas concentraciones, lo que representa un hito significativo en esta área de investigación. Caballero y col. (2019) estudió el uso de hidroxiapatita en soluciones con alta concentración de plomo con la finalidad de estudiar los compuestos que se forman cuando la HAp entra en contacto con el metal pesado para comprender qué tipos de compuestos se generan. Este conocimiento permite investigar la estabilidad del compuesto resultante durante el proceso de remoción o captura de metales pesados.

En el estudio de Caballero y col. (2019), se pudo identificar la hidroxiapatita de plomo, también llamada plomohidroxiapatita, y la formación de hidroxicarbonato de plomo o hidróxido de carbonato de plomo (Figura 5). Al comprender la naturaleza de

estos compuestos, se estudia su estabilidad en situaciones accidentales o intencionadas de liberación en la naturaleza. Dicha información es vital para comprender los posibles riesgos para la población derivados del proceso de remoción de metales pesados.

En el proceso de eliminación de un contaminante mediante el uso de materiales específicos, como los obtenidos de precursores de la hidroxiapatita, surge una dualidad funcional. Si bien se busca eliminar un contaminante, simultáneamente se genera un subproducto que podría tener implicaciones desconocidas para el medio ambiente. Esto subraya la importancia de evaluar la estabilidad de los compuestos generados y los posibles riesgos asociados. Por ejemplo, al emplear carbonato de calcio puro como precursor, debemos considerar la influencia de trazas presentes, las cuales varían según las limitaciones impuestas por la naturaleza del animal.

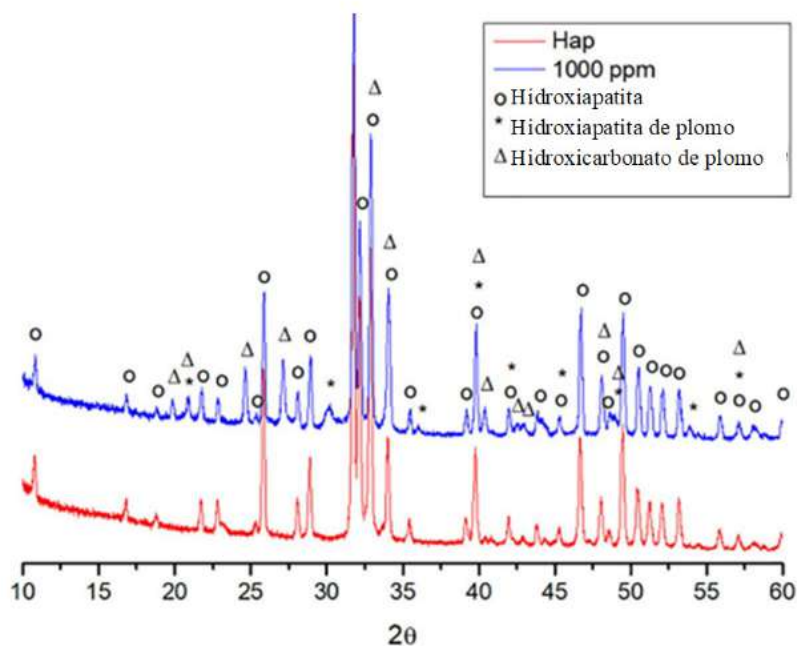


Figura 5. FTIR de la HAp de huesos bovinos sometidos a una solución de 1000 ppm de Pb(II) (Caballero y col., 2019)

Las cáscaras de huevo son un material precursor para la elaboración de hidroxiapatita. Las cáscaras de huevo son una mejor fuente de calcio, para el óxido de calcio (CaO), el carbonato de calcio (CaCO₃) y el hidróxido de calcio Ca(OH)₂, en comparación con otras fuentes (Tangboriboon y col. 2012; Rodas y col., 2018). Las variables que pueden ejercer influencia en la formación de la cáscara del huevo son numerosas, pero en términos generales, el contenido de carbonato de calcio desempeña un papel fundamental.

En este contexto, se ha llevado a cabo un exhaustivo estudio de la secuencia de procesos mediante un análisis sistemático de las fases de transformación. Inicialmente, el carbonato de calcio experimenta una transformación al ser sometido a calcinación, dando como resultado óxido de calcio. Posteriormente, mediante un proceso de hidratación, este óxido de calcio se convierte en hidróxido de calcio, que es el precursor utilizado para producción de la hidroxiapatita.

Al variar el tiempo de calcinación del carbonato de calcio, los picos observados en el espectro corresponden al carbonato de calcio, indicando una fase cristalina característica. A 800 °C y después de cuatro horas, se observa una eliminación prácticamente completa del carbonato de calcio. La Figura 6 revela que se alcanza un 95,3% de óxido de calcio.

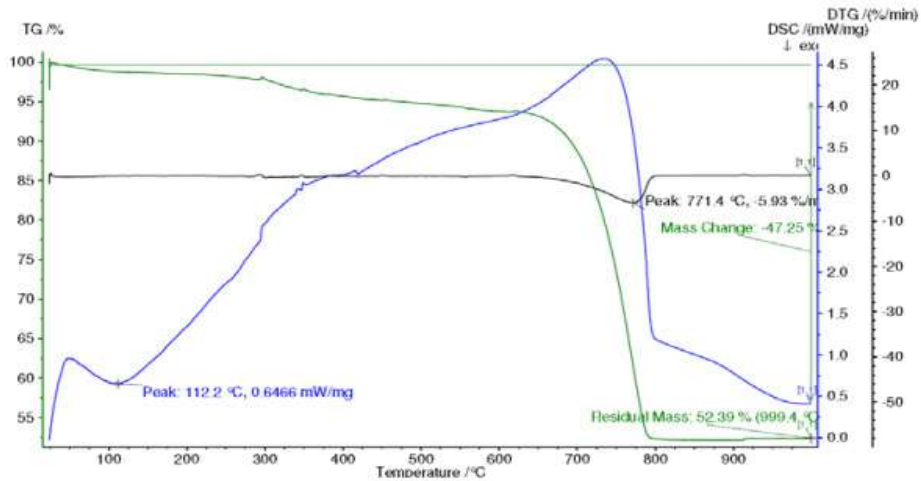


Figura 6. Curva TGA, DSC y DTG de la muestra CH800 (Rodas y col., 2018)

Para la síntesis de la hidroxiapatita a partir de la cáscara de huevo se deben analizar diversos factores como el tiempo de calcinación. Las cáscaras de huevo muestran una superficie pulida y lisa con microporos. Desde las cuatro horas, se aprecia una eliminación casi completa del carbonato de calcio al variar el tiempo de calcinación. Se observa en la Figura 7 los picos típicos del carbonato de calcio, indicando una fase cristalina característica.

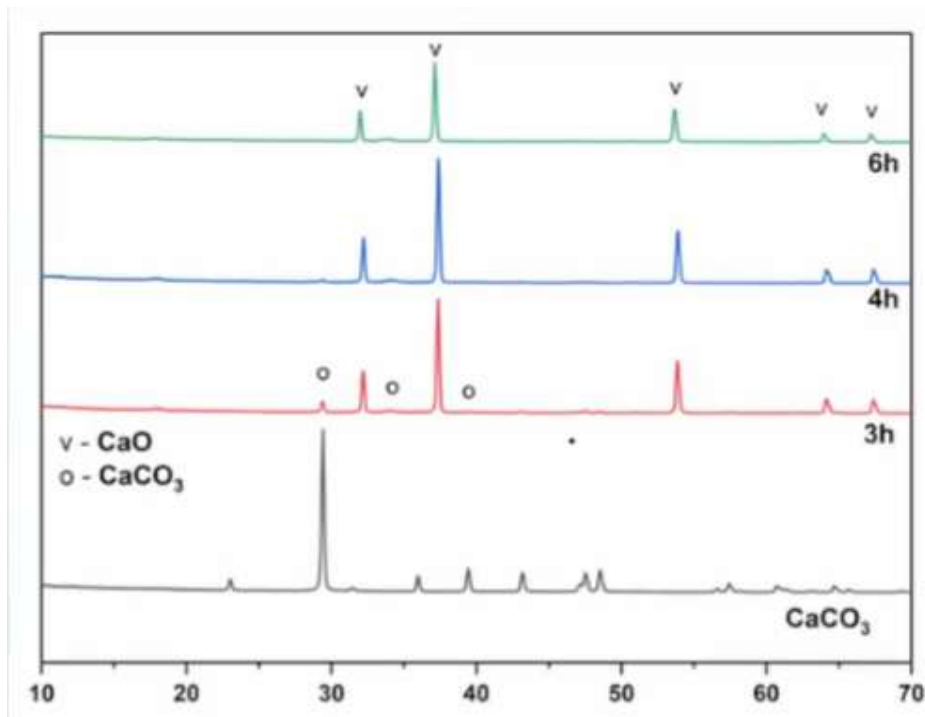


Figura 7. Reducción de carbonato calcio a través de diferentes tiempos de calcinación.

Se ha evaluado la toxicidad de la hidroxiapatita obtenida a través de ensayos citotxicológicos con artemia salina, un crustáceo extremadamente sensible a compuestos tóxicos. Los resultados indican que las nanopartículas generadas no son tóxicas para este organismo, lo que abre nuevas perspectivas para su aplicación.

Consideraciones Finales

La hidroxiapatita puede usarse en la absorción de metales pesados en aguas residuales y suelos a través de mecanismos de intercambio iónico.

Las aplicaciones de la hidroxiapatita abarcan desde filtros de aire para vehículos hasta tratamiento de aguas residuales y barreras de lavado de suelos. Además, se emplea en técnicas analíticas como cromatografía para proteínas y soportes para electroforesis de ácidos nucleicos. Esta cerámica demuestra ser versátil y gana cada vez más adeptos en diversos campos de estudio.

Referencias Bibliográficas

Aoki, H. (1994). *Medical Applications of Hydroxyapatite*. 1a Edición. Japón. Ishiyaku EuroAmerica, Inc.

Ibrahim, M., Labaki, M., Giraudon, J., Lamonier, J. (2020). Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 383,121139. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121139>.

Rodas, J., Riberino, A., Monteiro, M. (2018). Producción y caracterización de óxido de calcio a partir de fuentes alternativas para uso como un precursor en la síntesis de hidroxiapatita. *Memorias del Congreso Brasileño de Ingeniería y Ciencia de los Materiales*, 35-45.

Stötzel, C., Müller, F., Reinert, F., Niederdraenk, F., Barralet, J., Gbureck, U (2009). Ion adsorption behaviour of hydroxyapatite with different crystallinities *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 74 (1): 91-95.

Tangboriboon, N; Kunanurksapong, R., Sirivat, A. (2012). Preparation and properties of calcium oxide from eggshells via calcination. *Mat. Sci-Pol*, v. 30, p. 313- 322.



Eje 2:

Calidad microbiológica de aguas

El agua y la transmisión de microorganismos resistentes a antimicrobianos



Dra. Marynes Montiel⁴
marymont@espol.edu.ec

En esta sección se aborda el tema del agua y la transmisión de microorganismos, centrándose en la dimensión microbiana. El aspecto que se quiere destacar es la problemática creciente de resistencia a los antibióticos desarrollada por los microorganismos, especialmente las bacterias. Hace unos 20 años, la mayoría de las bacterias eran sensibles a la mayoría de los antibióticos disponibles. Sin embargo, en la actualidad, se ha experimentado un aumento significativo en la resistencia a diversos antimicrobianos. Este fenómeno se ha convertido en un problema grave.

Es importante tener en cuenta que los microorganismos resistentes a antimicrobianos pueden llegar al agua de diversas formas, incluyendo aguas residuales no tratadas (Figura 1). Este proceso puede conducir a la transmisión fecal-oral, una ruta que lleva a repensar cómo los microorganismos, en general, pueden afectar a los humanos. Esta vía, donde el agua no es tratada adecuadamente, es una ruta importante de microorganismos que pueden llegar

⁴ *Bióloga. MSc en Microbiología. PhD en Ciencias Ambientales. Docente-Investigadora de la Facultad de Ciencias de la Vida. Escuela Politécnica Superior del Litoral, Guayaquil, Ecuador.*

nuevamente a los humanos. Por ejemplo, cuando se ven fugas en las cloacas y en las aguas servidas, cuando los patógenos llegan a las aguas recreacionales a través de las heces de humanos y animales salvajes, e inclusive por asociaciones como cuando las aves transportan microorganismos patógenos entre poblaciones distantes.

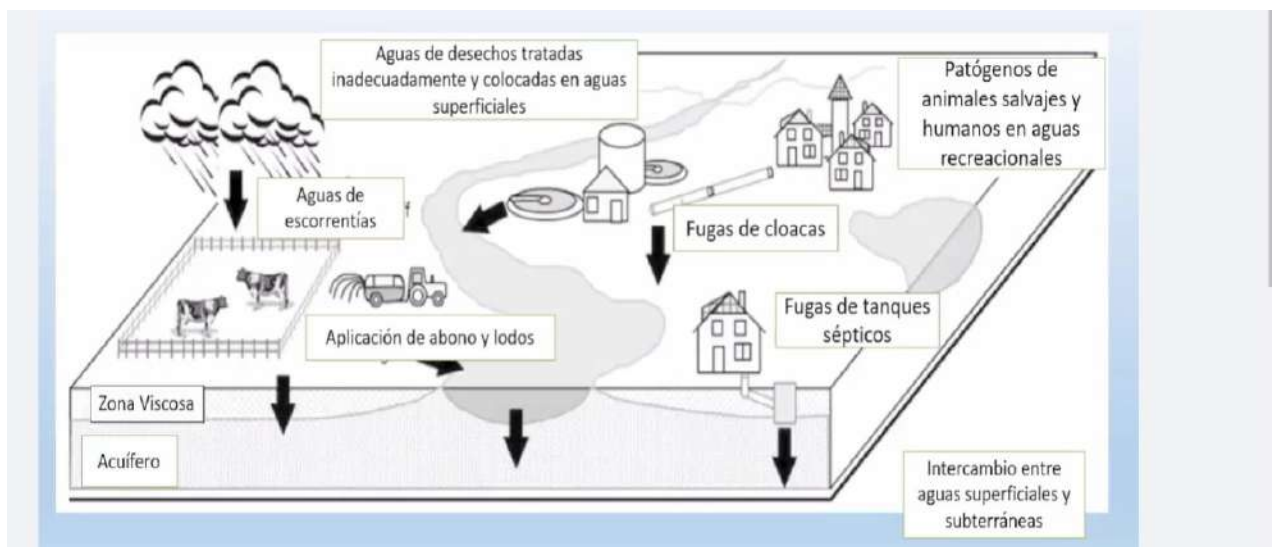


Figura 1. Fuentes de microorganismos patógenos (Seidel y col. 2016)

Otras fuentes de microorganismos patógenos a considerar son las fugas de tanques sépticos y las aguas de escorrentía, que cuando hay lluvia, movilizan a los microorganismos por encima de la tierra hasta llegar también a las aguas superficiales y subterráneas. Por otro lado, aun cuando se piensa no tiene tanta inherencia en la parte de agua, pero la aplicación de abonos y lodos a partir de plantas de tratamiento en suelos puede ser una fuente de microorganismos cuando estos alcanzan cuerpos de aguas. El problema es que no solo llegan a un agua superficial o subterránea, sino que se conoce que en el ciclo del agua hay un gran intercambio entre aguas superficiales y profundas. Aguas superficiales que son contaminadas en algún momento dado pueden llegar a la parte subterránea, y lo contrario, hay conexión entre las aguas subterráneas y superficiales. Es por ello que los microorganismos ingresan a un sitio específico, y a partir de ese punto, se diseminan por todo el sistema acuático.

La vía de infección de los agentes patógenos resulta crucial, ya que, además de la contaminación directa, la formación de aerosoles se presenta como un problema significativo tanto a nivel respiratorio como dérmico al tener contacto con aguas contaminadas. Entre las diversas patologías, se tienen los problemas gastrointestinales por ingesta a través de la bebida de agua contaminada. Por otro lado, el contacto por baño, la inhalación y aspiración por aerosoles, generan una diseminación de microorganismos, alcanzando la vía respiratoria y, en última instancia, afectando la salud dérmica. Los aerosoles, constituidos por pequeñas gotas de agua dispersas en el entorno, se convierten en un vehículo potencial para la transmisión de patógenos como bacterias, virus, protozoos y helmintos. Desde este enfoque, se observa la complejidad y diversidad de los procesos de transmisión microbiológica asociados al agua.

Cada país y región cuenta con normativas específicas para determinar la calidad del agua, y estas directrices a menudo se basan en microorganismos asociados a problemas gastrointestinales. Esto se debe a que estos microorganismos siguen la ruta fecal-oral, incluyendo a los coliformes totales, coliformes fecales y la bacteria *Escherichia coli*, que se incluye cada vez más en las normativas de diversos países. Además, se consideran algunos parásitos, como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*, que son dos grupos microbianos de gran importancia en términos de calidad del agua. Sin embargo, esta sección se centrará en la resistencia antimicrobiana transmitida a través del agua, y cómo esta resistencia se origina en bacterias a través de diversas fuerzas ambientales, y cómo pueden exponerse y llegar a organismos, causando enfermedades.

Existe una estrecha relación entre las fuerzas ambientales, como las variaciones climáticas, tales como eventos naturales, lluvias y sequías, movimientos del suelo que modifican las condiciones acuáticas con liberación de patógenos en el ambiente, cambios en el uso del suelo y movimientos globales relacionados con viajes y comercio, que crean rutas de exposición que

permiten a los patógenos alcanzar a los seres vivos, desencadenando enfermedades.

La resistencia microbiana ha sido identificada por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una de las diez principales amenazas para la salud mundial (ONU, 2019). En otras amenazas, se tiene la contaminación del aire, el cambio climático, que también influye en la resistencia a los antimicrobianos, las enfermedades no transmisibles, la falta de atención primaria de salud, el dengue, entre otras. Sin embargo, la resistencia antimicrobiana destaca como una de las principales preocupaciones a nivel global.

La resistencia a los antimicrobianos (RAM) ocurre cuando un microorganismo es capaz de resistir la presencia de un antibiótico. Por ejemplo, en el caso de una infección tratada con penicilina, si el microorganismo causante se vuelve resistente, la penicilina ya no surte efecto. La resistencia verdadera se produce en cambios que experimenta el microorganismo al estar expuesto a un agente antimicrobiano. Es importante destacar que la resistencia microbiana es una estrategia natural para la supervivencia de los microorganismos, ya que buscan adaptarse y sobrevivir en su entorno.

La resistencia antimicrobiana puede darse de forma natural, o adquirida. De forma natural, el microorganismo buscará la manera de sobrevivir, si encuentra bajo una presión externa de un antibiótico, tratará de desarrollar mecanismos para volverse resistente y combatir el antibiótico. Existen diversas vías que los microorganismos emplean para resistir, como sistemas de bomba de flujo y la producción de enzimas hidrolíticas.

En la resistencia antimicrobiana adquirida, un microorganismo incorpora genes de resistencia, a menudo a través de procesos como la transformación, conjugación o transducción, donde el material genético se mueve entre células o bacterias. La transferencia de material genético entre géneros o especies bacterianas puede llevar consigo la codificación para la resistencia a los antibióticos.

La resistencia antimicrobiana ha evolucionado en un problema de salud mundial, con más de 700.000 muertes anuales relacionadas con infecciones resistentes en el 2019. Se estima que hasta 5 millones de fallecimientos podrían estar indirectamente asociados con la resistencia antimicrobiana. Se proyecta que para 2050, podrían ocurrir hasta 10 millones de muertes anuales sino se toman precauciones (Gallagher, 2015; Goverse y Zennaro, 2019). Esta problemática se extiende globalmente, y se prevé la posibilidad de otra pandemia relacionada con este desafío de salud pública.

En América Latina, se han detectado alrededor de cuatro millones de aislamientos resistentes a nivel humano en diferentes géneros microbianos (Figura 1). Es crucial resaltar la importancia de esta problemática, especialmente porque se está trabajando activamente en ella en los diferentes niveles universitario, gobiernos locales, provinciales y nacionales. Al examinar el transcurso del tiempo, se nota un aumento en el número de cepas aisladas que han desarrollado resistencia (OPS, 2020). Este aumento varía entre los diferentes países, lo que subraya la necesidad de abordar el problema con una perspectiva global.

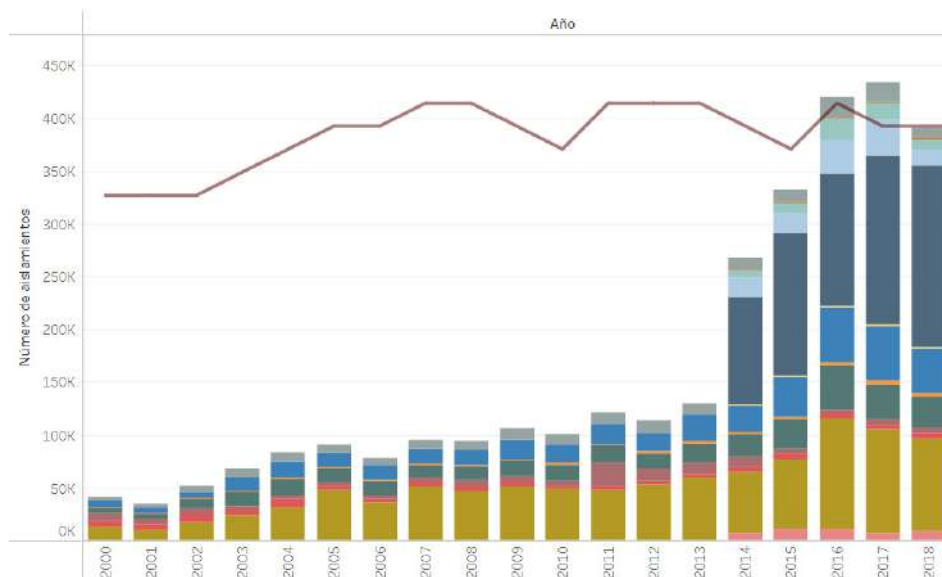


Figura 1 (página anterior). Resistencia antimicrobiana. Número de aislamientos por patógeno y año para los países y territorios de las Américas (OPS, 2020).

La resistencia antimicrobiana se asocia principalmente con microorganismos como bacterias resistentes a antibióticos. La contaminación es un factor clave en la introducción de antimicrobianos en los entornos, especialmente en los acuáticos, ya sea en forma de antibióticos o como residuos después de su consumo. La liberación de antibióticos en el agua se produce a menudo a través de la orina de personas que los consumen. Las presiones selectivas, junto con los genes de resistencia, y elementos genéticos móviles, afectan las bacterias, propiciando la evolución de la resistencia antimicrobiana.

El problema radica en qué las bacterias pueden acceder al agua mediante una vía con patrones específicos de resistencia. La presión selectiva puede modificar estos patrones, lo que podría hacer que las bacterias sean más agresivas y adquieran resistencia a múltiples agentes antimicrobianos.

La diseminación de resistencia antimicrobiana en el ambiente puede producirse por el uso de antibióticos en la producción animal, como en el caso del engorde para un crecimiento más rápido (Figura 2). En particular, el uso de antibióticos en animales puede introducirse en el suelo a través del estiércol, movilizándose a través de las aguas de escorrentía o los ríos y llegando a las aguas superficiales y subterráneas. Este proceso puede llevar los microorganismos resistentes a las plantas de tratamiento de aguas residuales y, eventualmente, a través del suministro de agua potable, regresar al entorno humano.

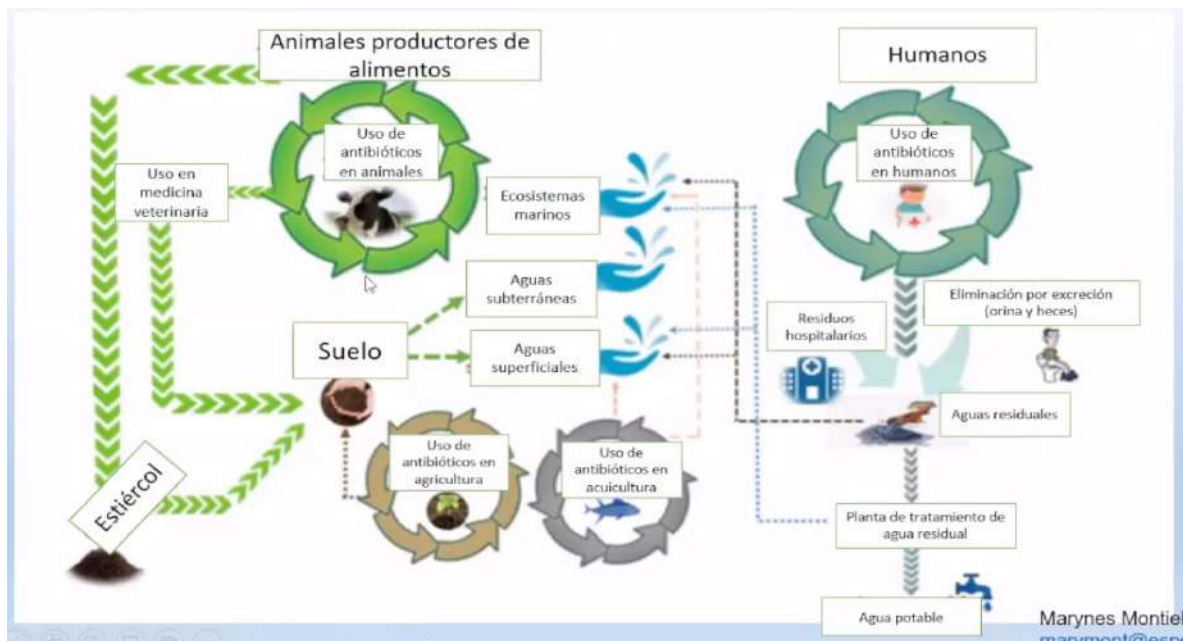


Figura 2. Ciclo de diseminación de microorganismos con RAM

En los humanos, el uso de antibióticos también contribuye, ya que su eliminación a través de la orina o las heces se convierte en otra fuente que llega al agua. Un aspecto adicional a considerar es el uso de antibióticos en la acuicultura, que, aunque en algunos casos no está permitido, sigue siendo una fuente significativa de microorganismos resistentes.

Los principales reservorios de resistencia antimicrobiana, también llamados hotspots, son las instalaciones médicas, infraestructuras para la cría de animales y mataderos, funerarias, cementerios y tumbas, viviendas, sistemas sanitarios in-situ como los pozos sépticos, basureros no planificados ni diseñados y las aguas de lluvia, que a través de las descargas de aguas residuales, lixiviados, sedimentos y residuos biológicos, alcanzan las aguas superficiales y los sistemas de aguas subterráneas, pudiendo alcanzar los sistemas de tratamiento de aguas, convencionales y avanzados, para tener presencia en aguas de consumo.

El consumo humano de estas aguas contaminadas genera riesgos para la salud como desarrollo de resistencia antimicrobiana, incremento de virulencia y patogenicidad, incremento de infecciones microbiológicas, morbilidad, y mortalidad. La afectación también puede producirse por contacto con aguas recreacionales. Cabe destacar que las aguas contaminadas por microorganismos patógenos con RAM al ser ingeridas por los humanos originan que se mantenga el ciclo de diseminación debido a estos son defecados, llegan a los ambientes acuáticos y todo el proceso nuevamente.

Es por ello que debe realizar un monitoreo de RAM, buscando detectar los genes de resistencia a antibióticos (ARGs) que circulan en la población humana, identificar los hotspots para la evolución y diseminación de la resistencia, informar los riesgos epidemiológicos y para la salud humana a través de modelos de riesgo, y cuantificar la eficiencia de remoción en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para el control de la RAM se ha propuesto trabajar con una perspectiva One Health, Una sola salud, de forma muy general se combina que haya una sola salud entre los humanos, los animales y el medio ambiente (Figura 3). El concepto de Una sola salud, introducido a principios de 2000, se refiere a una noción que se comprende desde hace más de un siglo: la salud humana y la salud animal son interdependientes y están vinculadas a los ecosistemas donde coexisten. Más específicamente, One Health se define como los esfuerzos de colaboración de múltiples disciplinas (profesionales médicos, veterinarios y de investigación) que trabajan a nivel local, nacional y global para lograr una salud óptima para las personas, los animales y nuestro medio ambiente (ISGlobal, 2021).

Desde esta perspectiva integral, los antimicrobianos están siendo usados para mejorar la salud humana y animal, y es el medio ambiente, a través de la contaminación del agua y el cambio climático, dónde se produce la diseminación de estos grupos de antibióticos y de microorganismos resistentes.



Figura 3. Elementos de la perspectiva: Una sola salud.

Un aspecto muy importante en la lucha contra la RAM es el monitoreo, trabajar en el monitoreo tanto de las bacterias resistentes a los antimicrobianos como de los genes (Figura 4). Es importante que se puedan cuantificar las bacterias que evaden el proceso de tratamiento y estimar la eficiencia de remoción de estas bacterias en una planta de tratamiento y determinar cómo han ido evolucionando los patógenos.



Figura 4. Monitoreo de puntos importantes y rutas de transmisión de antimicrobianos importantes, microorganismos resistentes, elementos genéticos móviles y genes de resistencia a antibióticos en humanos y ambiente (Liguori y col., 2022).

En muchos casos se ha considerado a las bacterias resistentes a los antibióticos como patógenos emergentes, es decir, como contaminantes emergentes, por lo que se trabajan con procesos de susceptibilidad a antimicrobianos utilizando la técnica de difusión en disco (Figura 5). En esta técnica se trata de colocar el antibiótico en presencia de la bacteria y ver si la bacteria es resistente o no.

Desde los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Vida de la ESPOL se está trabajando básicamente con cepas de *E. coli* y una batería de unos 15 antibióticos diferentes de los diferentes grupos de antimicrobianos. Se ha obtenido para un ambiente acuático en Guayaquil, porcentajes de resistencia antimicrobiana para antibióticos como la ciprofloxacina, ampicilina, y cefazolina (Figura 6). Los estudios en RAM hoy en día se centran en la búsqueda de genes de resistencia y genes de importancia relacionados con las betalactamasas, con la tetraciclina, con la sulfonamida, utilizando técnica en cadena de reacción de la polimerasa (PCR).



Figura 5. Prueba de susceptibilidad microbiana de difusión en disco

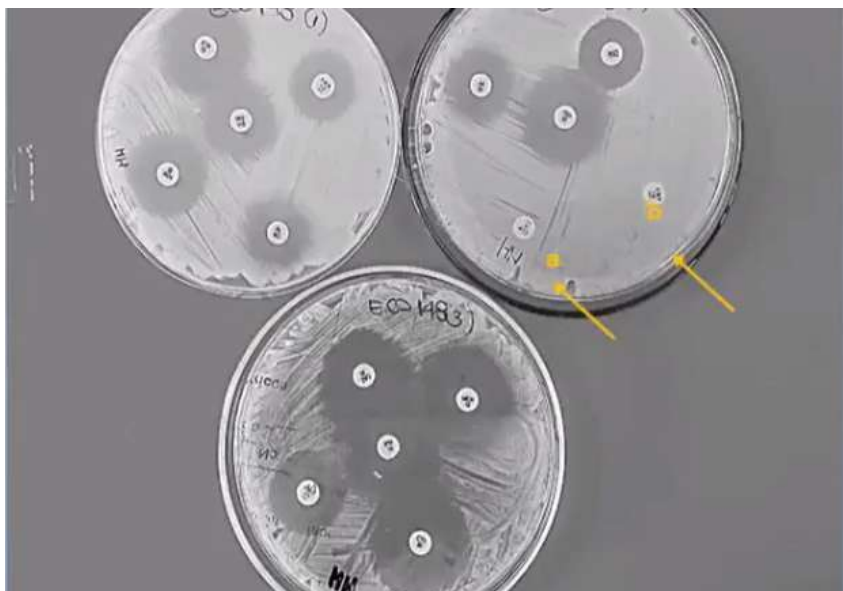


Figura 6. Antibiograma de la colonia ECO 148, cepa de *Escherichia coli*, (a) resistencia a ciprofloxacina, (b) resistencia a ampicilina

Consideraciones Finales

Las acciones necesarias para trabajar en la lucha por la RAM, en primer lugar, contemplan implementar medidas para controlar tanto el uso como la disposición de los antibióticos. Asimismo, la gestión del agua es una tarea compartida que involucra a diversos actores, el cuidado del agua representa una responsabilidad que compete a múltiples agentes.

Además del control y la regulación del uso de antibióticos, se hace imperativo mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales y perfeccionar los planes gubernamentales relacionados con la producción de alimentos, con el fin de limitar la liberación de antibióticos en el medio ambiente.

Una tendencia en alza es la implementación de enfoques integrales de «una sola salud» (One Health) y establecer sistemas de vigilancia para monitorear la diseminación de la resistencia y sus efectos. Es esencial resaltar el papel fundamental del entorno en la transmisión de bacterias resistentes a los antimicrobianos, siendo una fuente significativa para la adquisición de nuevos genes de resistencia.

Por lo tanto, es imperativo realizar estudios más exhaustivos sobre la dinámica de la resistencia bacteriana existente, abordando tanto la presencia de antimicrobianos como la determinación de las fuentes más críticas para la adquisición de nuevos genes de resistencia por parte de los patógenos mediante elementos genéticos móviles. Cada región, localidad y país presenta condiciones únicas, con presiones ambientales distintas, es el momento de pasar a la acción y abordar estos desafíos de manera proactiva.

Referencias Bibliográficas

Barcelona Institute for Global health (ISGlobal) (2021). One Health. <https://www.isglobal.org/en/-/one-health-una-sola-salud>

Gallagher, J. (2015). Descubren en China bacteria capaz de resistir a uno de los antibióticos más poderosos. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151119_antibiotico_bacteria_resistente_gtg

Goverse, T., Zennaro, How drug-resistant pathogens in water could spark another pandemic. UN programme environmentale. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-drug-resistant-pathogens-water-could-spark-another-pandemic>

Organización de Naciones Unidad, ONU (2019). Conoce las diez principales amenazas contra la salud mundial. <https://news.un.org/es/story/2019/01/1449582>

Organización panamericana de la salud (OPS). (2020). Resistencia antimicrobiana. www3.paho.org/data/index.php/es/temas/resistencia-antimicrobiana.html

Seidel, M., Jurzik, L., Brettar, I., Hofle, M., Griebler, C. (2016). Microbial and viral pathogens in freshwater: current research aspects studied in Germany. *Environmental Earth Sciences*, 1384. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6189-x>

Liguori, K., Keenum, I., Davis, B., Calarco, J., Milligan, E., Harwood, V., Pruden, A. (2022). Antimicrobial Resistance Monitoring of Water Environments: A Framework for Standardized Methods and Quality Control *Environmental Science & Technology*, 56 (13), 9149–9160. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08918>



Detección de parásitos intestinales en aguas de consumo humano



Dra. Evita Mireles⁵
laa@facisaune.edu.py

La Universidad Nacional del Este está ubicada en Ciudad del Este, Paraguay, tiene también dos sedes en la ciudad de Minga Guazú. Está en la triple frontera entre Brasil, Argentina y Paraguay y esto hace que se tenga mucha información referente a la circulación de microorganismos que hay entre estos tres países. En la Universidad Nacional de la Este se tienen dos laboratorios, uno en el Centro de Investigaciones Médicas, que se llama Laboratorio de Agua y Alimento, y otro en la Facultad de Ingeniería, en el Departamento de Agua. En los dos laboratorios se realizan monitoreos de aguas de consumo, se realizan análisis tanto microbiológicos como fisicoquímicos.

Además, se realizan proyectos de investigación con estudiantes y una vez que se tienen los resultados, se vuelve a la comunidad y se trabaja con ellos en proyectos de extensión, porque los resultados de investigación deben ser transferidos y se deben aportar los conocimientos generados a la sociedad en general.

⁵ *Bioquímica. MSc en Metodología de la investigación. Doctora en Educación Superior. Docente e investigadora del laboratorio de Agua y Alimentos de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad del Este, Ciudad del Este, Paraguay.*

En la Facultad de Ciencias de la Salud se han recibido más de 200 muestras de comunidades aledañas a la Universidad, provenientes de pozos tubulares profundos en un 54,5%, pozos comunes, que son pozos de poca profundidad en un 18,2% y de la red pública de distribución en un 27,3%. Desde esta Facultad, núcleo de investigación de enfermedades infecciosas, se están analizando las causas de las enfermedades diarreicas en los niños y en la población en general, y esto permite a los alumnos de Medicina crear sus casos y plantear cómo resolverlos.

Los estudios se han concentrado en el análisis de los coliformes, entre ellos la *Escherichia coli*, uno de los microorganismos que orientan e indican que el agua está contaminada con materia fecal. Dentro de los resultados encontrados, un 36,2% de las muestras analizadas presentan *E. coli* y un 49,1%, coliformes fecales. Lo más llamativo que se ha encontrado es que el 100% de los pozos de poca profundidad, que vendrían a ser unos pozos de hasta 20 metros, contienen coliformes fecales.

Los coliformes fecales son indicadores de que están otros microorganismos presentes, pudiendo ser virus, hongos, y parásitos. Usualmente en estudios de análisis de aguas de consumo, se centra la atención en dos tipos de parásitos, la *Giardia* y el *cryptosporidium*, que suelen ser resistentes al tratamiento con cloro. Entonces, si no se hace una filtración en las plantas de tratamientos de agua no funciona la desinfección para estos dos parásitos.

La Organización Mundial de la Salud ha registrado 3.500 millones de personas parasitadas y 450 millones de personas que padecen enfermedades parasitarias. Las personas pueden estar parasitadas, pero no padecer de una enfermedad parasitaria (Rodríguez, 2015; Murillo y col., 2020). Así, el parásito está viviendo con el individuo, pero no le está causando signos y síntomas de la enfermedad. Es muy importante que los niños, mujeres embarazadas y adultos mayores no estén en contacto con estos parásitos porque a ellos sí les causarían enfermedades parasitarias.

En América Latina se tiene un registro de 30% de parasitosis, esta cifra puede aumentar en un 50 a 95% en las zonas rurales (Cando y col., 2017). En las zonas rurales hay escasez de información debido a la falta de fuentes de aguas tratadas. Entonces esto hace que aumente la frecuencia de la parasitosis y se diseminan estos microorganismos.

Existen diversos parásitos de importancia clínica (Figura 1), usualmente los que están en el grupo de los protozoos y helmintos son los que frecuentemente están causando diarreas en la población de América Latina. Dentro de los protozoos se tiene la *Entamoeba*, la *Giardia* y el *Cryptosporidium*, mientras que en los helmintos está la *Áscaris*, y la *Hymenolepis*. En el caso de la *Giardia*, ingresa en forma de quiste, el cual es eliminado por los humanos o animales una vez que el cursó con una reproducción en el intestino. Este quiste que en el intestino adquiere una forma de trofozoito, es liberado en las heces y contamina así las aguas y los alimentos (Figura 2). Los microorganismos una vez liberados en las aguas recorren diversas fuentes debido a que pueden pasar de aguas superficiales a subterráneas, es un ciclo constante que no se interrumpe.



Figura 1. Parásitos de importancia clínica (Murray y col., 2013).

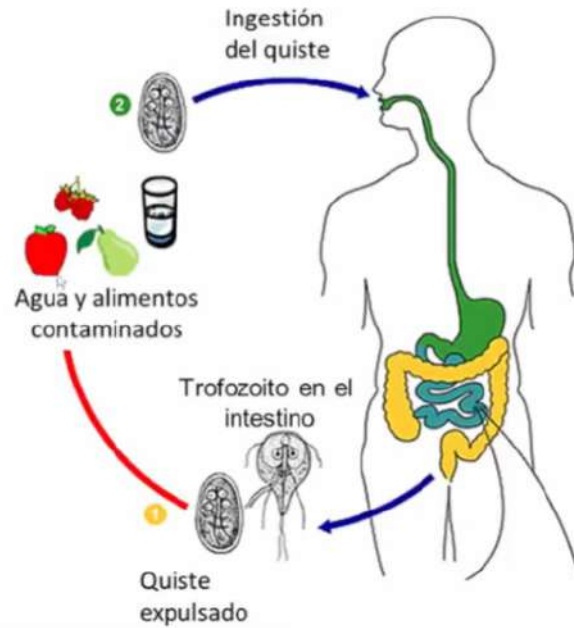


Figura 2. Ciclo de contaminación por la Giardia

El quiste de Giardia usualmente resiste la desinfección con cloro, justamente la membrana que envuelve el quiste le da esta protección, es un caparazón protector que le permite resistir a los cambios climáticos, lluvias y luz solar. Puede estar varias semanas en el suelo y una vez que encuentra un hospedador, se activa en el intestino. También resiste a la acidez, por lo que puede pasar al intestino sin que se le haya hecho daño, y ahí eclosionar y convertirse en un trofozoito.

El mecanismo de la Giardia también se presenta en la Entamoeba histolytica, los quistes maduros, son los que ingresan a través del agua o los alimentos que consumimos, o también cuando utilizamos utensilios personales de las personas que están parasitadas (Figura 3). Estas van a pasar por el ácido clorhídrico del estómago y van a eclosionar en el intestino. Ahí se van a multiplicar y luego van a volver a enquistarse para salir al medio ambiente y seguir su camino buscando otro hospedador.

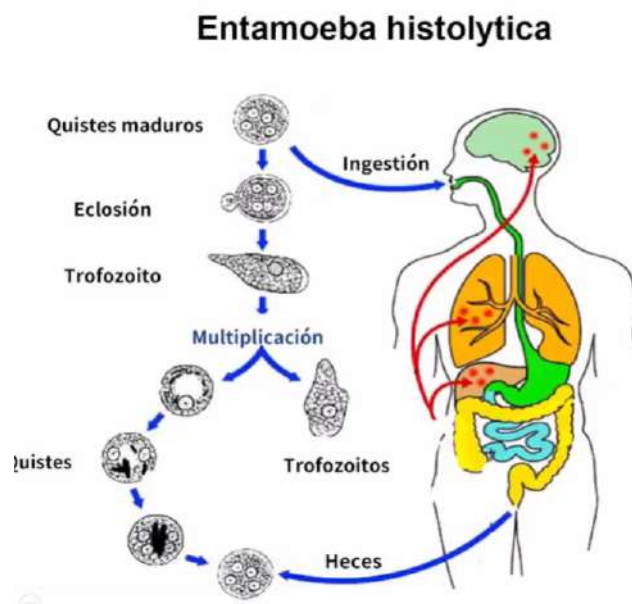


Figura 3. Ciclo de contaminación de la Entamoeba histolytica

El parásito *Cryptosporidium* también puede adquirirse por la ingestión en agua de bebida o aguas recreacionales. Estos parásitos son viables hasta 140 días y resisten a desinfectantes clorados (Ríos y col. 2017). Produce enfermedades diarreicas, incluso, muertes en niños, ancianos y pacientes inmunodeprimidos. Son sensibles a la luz ultravioleta y ozonización; sin embargo, la realidad en América Latina es que no se tienen tratamientos de agua por estos dos métodos, por lo que se está expuesto a estos parásitos

Otro microorganismo que se denomina *Blastocystis hominis* actúa de la misma manera, el quiste que está libre en el ambiente, ingresa con el agua y los alimentos contaminados, va a eclosionar en el intestino para su reproducción y luego volver a enquistarse para salir (Figura 4).

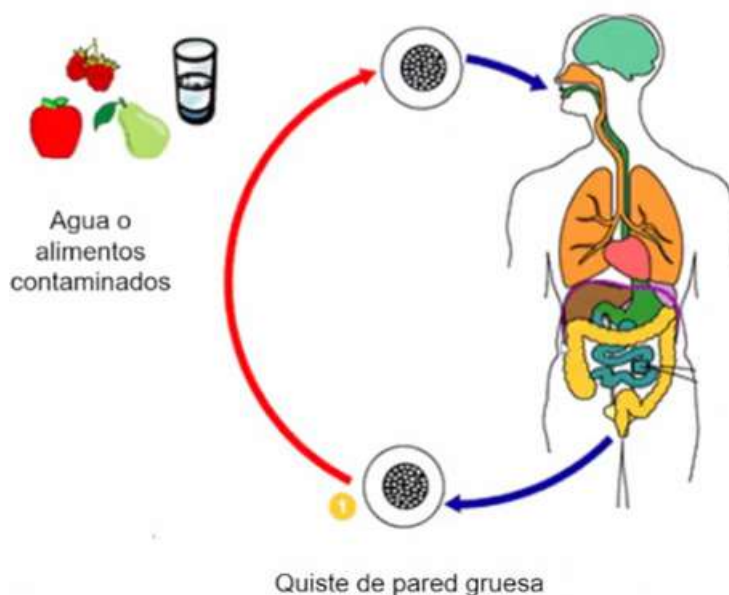


Figura 4. Ciclo biológico *Blastocystis hominis*

Las manifestaciones clínicas de enfermedades parasitaria son cefaleas, náuseas y vómitos, dolor e hinchazón abdominal, diarrea y fiebre. El parásito puede incorporarse al organismo por contacto directo; por ejemplo, cuando los niños comparten juguetes que pueden tener parásitos, porque usualmente ellos no se lavan frecuentemente las manos y entre ellos comparten también utensilios que se meten a la boca. Por lo que es mucho más fácil la diseminación en niños, lactantes y escolares.

El contacto indirecto sería por el consumo de los alimentos y el agua contaminada. Hay dos factores que favorecen a la adquisición de estos parásitos, primeramente, es la falta de higiene y luego es la contaminación fecal del entorno. Esta contaminación sucede muchísimo en las zonas rurales, porque las personas utilizan letrinas o pozos ciegos que tienen poca profundidad en el suelo, no tienen una capa que los cubra para impermeabilizarlos, y este filtra la materia fecal y orina; por lo que va circulando por el suelo, llegando fácilmente a los pozos de agua de consumo.

Una de las poblaciones más vulnerables de sufrir enfermedades parasitarias son los niños porque pueden desarrollar mala absorción intestinal, y eso genera una disminución en el peso y talla. De igual manera, pueden presentar anorexia, desnutrición y anemia, lo que termina afectando su capacidad cognitiva (Murillo, 2002). Los parásitos afectan a nivel celular generando pérdidas de líquidos y electrolitos; así como la pérdida de magnesio, hierro, cobre y zinc; por lo tanto, las células resultan modificadas o pueden ser mutadas perdiendo su funcionalidad y afectando a otros órganos.

En base a una revisión de la literatura, se ha encontrado que existen diversos reportes de detección de reportes en América Latina. En poblaciones rurales de Chongoyape, Chiclayo, Perú, la coccidiosis y la amibiasis intestinal son frecuentes en niños (Malca y Alvitres, 2013). Otros estudios en Perú, indican que existe una elevada prevalencia de *Blastocystis* spp. y de otros

enteroparásitos; también, un elevado poliparasitismo en la población escolar de la zona periurbana del distrito de Yura, Arequipa (Ouispe y col., 2016).

En Brasil, Carvahlo y col. (2007), demostraron que existía relaciones entre las enfermedades parasitarias entéricas y algunos indicadores nutricionales en una muestra de niños que viven en un área urbana de la Amazonía. Los datos mostraron una interacción entre la infección por *G. lamblia* y los parámetros antropométricos El estudio demostró que el 29% de los niños estaban infectados con *G. lamblia*.

En Colombia, Lucero y col. (2015) encontraron, en la localidad de Florencia, Caquetá, una prevalencia de 90% para niños parasitados, la frecuencia mayor fue de protozoarios *Blastocystis* spp: 49%, *Giardia duodenalis*: 36%, *E. histolitica/dispar*: 29%, la prevalencia de coccidios fue del 19%; *Cryptosporidium* sp: 7% *Cystoisospora* sp: 8% y *Cyclospora* sp: 4%; respecto a los helmintos la prevalencia fue de *Ascaris lumbricoides*: 5%, *Trichuris trichura*: 1%, *Uncinaria* spp: 1%, el poliparasitismo. La susceptibilidad de la población evaluada a la enteroparasitosis se atribuye en gran medida a las condiciones socioeconómicas imperantes. En consecuencia, resulta imperativo abordar este fenómeno mediante la implementación de intervenciones médicas y gubernamentales, mejorando así su calidad de vida en general.

Castro y col. (2020), examinaron la prevalencia y determinantes epidemiológicos de la parasitosis intestinal en escolares de dos cantones de Manabí, Ecuador. Se analizaron un total de 793 muestras de heces mediante la técnica de examen directo en niños de entre 1 y 16 años de edad, de ambos sexos. Los autores determinaron que la prevalencia global del parásito era del 44,4% (352 de 793).

En Venezuela, se estableció una incidencia sustancial de infección por *Blastocystis* spp. (67,8%) en comunidades indígenas, lo que puede atribuirse a las circunstancias sociales y de salud deficientes observadas en una comunidad del estado Bolívar, junto con otros casos de parasitosis intestinal. De igual manera, Acuro y col. (2016) en Machiques de Perijá, estado Zulia, detectaron una presencia sustancial de protozoos en comunidades indígenas. Este hallazgo indica una predisposición a la transmisión de persona a persona dentro de la población examinada, o al consumo de agua o alimentos contaminados que contienen materia fecal.

En Paraguay, en los estudios realizados por los laboratorios de la Universidad Nacional del Este, se han encontrado valores de prevalencia de 46,7% en protozoarios y 2,7% en Helmintos en comunidades de Minga Guazú, a través de la técnica de Baillenger modificada por Bouhoum y Schwartzbrod usando sedimentación y flotación (Prato y col., 2020).

En los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Nacional del Este, se trabaja directamente con las comunidades cercanas a la institución, en ubicaciones a lo largo de 20 kilómetros, se le solicita muestras de 20 L de agua. Una vez recibidas las muestras, se dejan reposo durante diferentes tiempos de sedimentación 3, 7 y 10 días. Se descarta el sobrenadante, para pasar filtrar el sedimento a través de una membrana de 0,45 micras. En esta membrana se quedan atrapados todos los microorganismos que son de mayor tamaño que el diámetro de poro.

El filtro con el material que queda retenido se coloca en un detergente orgánico que se llama Twin 80, para que estas partículas puedan desprenderse del filtro. Luego se lleva el material a centrifugación a 2500 revoluciones por minuto (rpm) durante 10 minutos y se observa el sedimento al microscopio, y se identifican los tipos de protozoos después de realizar tinción con Lugol (Figura 5). De igual manera, se utiliza el método de tinción de Ziehl-Neelsen para la identificación de coccidios.



Figura 5. Identificación de protozoos al microscopio.

De acuerdo a los resultados obtenidos en comunidades en Ciudad del Este y Minga Guazú, se han encontrado una mayor diversidad de microorganismos en pozos poco profundos que en pozos más profundos. Cuanto más profundo el pozo, el suelo funciona como filtro y va reteniendo los parásitos. Sin embargo, se han encontrado estos microorganismos en pozos profundos de hasta 140 metros.

En pozos poco profundos la mayor prevalencia fue la del *Blastocystis* spp con un 36% seguido de *Giardia duodenalis* y *Entamoeba* spp en un 18%. En pozos profundos, la mayor prevalencia también fue para el *Blastocystis* spp con un 45% seguido de la *Entamoeba coli* y la *Entamoeba* sp con un 18%.

Consideraciones Finales

El acceso al agua es un derecho, pero en realidad muchas comunidades no pueden acceder a mecanismos de desinfección, por lo que no tienen acceso a agua potable.

Los tres principales parásitos reportados en toda América Latina como causantes de enfermedades parasitarias son el *Blastocystis*, la *Giardia*, y el *Cryptosporidium*, por lo que se propone apelar a la educación, ya que el saneamiento suele ser deficiente o no existe una conciencia del saneamiento que se debería de tener.

Se recomienda enseñar a las comunidades a potabilizar de forma casera desde las aulas, desde las universidades, hacerles comprender que los parásitos y microorganismos existen, que si las personas no se lavan las manos van a contraer enfermedades y van a disminuir la calidad de vida.

Referencias Bibliográficas

Acurero, E., Díaz, O., Rivero, Z., Bracho, Á., Calchi, M., Terán, R., Paz, M. (2016). Enteroparásitos en niños de una comunidad indígena del municipio Machiques de Perijá, estado Zulia Venezuela. *Kasmera*, 44(1), 26-34.

Cando, V., Escobar, S., Espinoza, C., Caluña, E. (2017). Prevalencia de parasitosis intestinales y su posible relación con estados anémicos en los niños que acuden a los centros de educación inicial. *ESJ*, 13, 113. <https://doi.org/10.19044/esj.2017>.

v13n27p113.

Castro, J., Mera, L., Schettini, M. (2020). Epidemiología de las enteroparasitosis en escolares de Manabí, Ecuador. *Kasmera*, 48(1): e48130933.

Carvalho, F., Gonçalves, A., Lassance, S., Silva, L., Salmazo, C., Bóia M. (2007). Giardia lamblia and other intestinal parasitic infections and their relationships with nutritional status in children in Brazilian Amazon. *Rev Inst Med Trop Sao Paulo*, 49(3):147-53. doi: 10.1590/s0036-46652007000300003.

Devera, R., Cordero, A., Uzcategui, Y., Blanco, Y., Amaya, I., Requerna, I., Aray A, Nastasi, M. (2016). Blastocistosis en niños y adolescentes de una comunidad indígena del estado Bolívar, Venezuela. *Saber*, 28(1), 73-82.

Lucero, A., Álvarez, L., Chicue, J., López, D., Mendoza, C. (2015). Parasitosis intestinal y factores de riesgo en niños de los asentamientos subnormales, Florencia-Caquetá, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 33(2):171-80.

Malca T., Alvitres C. (2013). Factores de riesgo asociados a la parasitosis intestinal en niños de una comunidad rural, Chiclayo — Perú. *Aporte Santiaguino*, 6:108-120.

Murillo, A., Rodríguez, Z., Bracho, A. (2020). Parasitosis intestinales y factores de riesgo de enteroparasitosis en escolares de la zona urbana del cantón Jipijapa, Ecuador. *Kasmera*, 48(1), e48130858, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3754787>.

Murray, S., Rosenthal, K., Pfaller, M. (2013). *Microbiología Médica*. Séptima Edición. Elsevier, España.

Ouispe-Juli, Cender Udai, Chiara-Coila, Yatsen Socrates, & Moreno-Loaiza, Oscar. (2016). Elevada prevalencia de Blastocystis spp. en niños de una escuela periurbana. *Anales de la Facultad de Medicina*, 77(4), 393-396.

Prato, J., Millán, F, Prada, C, Tana selia, C., Prado L., Lucena M., Ríos I., Gonzále, L. (2020). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas subterráneas de un sector rural a baja altitud en Los Andes venezolanos. *Kasmera*, 48(1):e48131414.

Ríos, S., Agudelo, R., Gutiérrez, L.. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 35(2):236-47.

Rodríguez, A. (2015). Factores de riesgo para parasitismo intestinal en niños escolarizados de una institución educativa del municipio de Soracá-Boyacá. *Universidad y Salud*, 17(1):112-20.



Eje 3:

Tratamiento biológico de aguas

Tratamiento de aguas residuales y aprovechamiento de residuos agroindustriales



*Dra. María Carolina Pire*⁶
mcpirre@ucla.edu.ve

Las destilerías son un sector destacado dentro de la agroindustria, ya que generan un tipo específico de agua residual que requiere un tratamiento adecuado debido al alto grado de contaminación que podría ocasionar en su entorno. Este sector se dedica al procesamiento y producción de diversos productos como el etanol para diversos usos, incluso para la fabricación de bebidas alcohólicas y alcohol sanitario.

En Venezuela, este tema representa un desafío significativo debido a la cantidad de destilerías y empresas involucradas en esta actividad. Cada destilería está vinculada a la generación de un subproducto conocido como vinaza. En la Figura 1, se puede apreciar claramente este problema, los conos contienen la vinaza, un líquido residual que surge durante el proceso de destilación para obtener alcohol etílico al 96%. Este subproducto se acumula en el fondo de la columna de destilación.

⁶ Ingeniería Química. MSc en Ingeniería Ambiental. Doctora en Ingeniería Ambiental. Docente e investigadora en el Programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Centroccidental Lisando Alvarado



Figura 1. Vinazas generan por las destilerías

El proceso de destilación inicia con la introducción de la materia prima que se desea procesar para obtener etanol al 96%, al pasar por la primera columna la corriente de fondo genera las vinazas. Estas vinazas son típicamente almacenadas en lagunas de considerable tamaño debido a su alta producción por litro de alcohol, lo que representa un desafío para el tratamiento, no solo en términos de cantidad, sino también desde una perspectiva financiera. Además de la cantidad producida de este efluente, surgen otros problemas originados en el proceso de destilado, el efluente tiene una temperatura elevada, alcanzando aproximadamente los 90° C, su pH oscila entre 3,5 y 4,0 unidades, característica ácida normal en este tipo de procesos (Robles y col., 2018; Zelaya y col., 2021).

Además, el efluente presenta una carga orgánica significativamente alta, la concentración de demanda química de oxígeno (DQO) dependiendo de la fuente y materia prima utilizada para generar etanol, puede variar entre 40.000 y 80.000 mg/L. Esta concentración de materia orgánica, medida como DQO, es una medida del contenido de carbono, cuya degradación en cuerpos de agua requiere oxígeno, resultando en un daño ecológico considerable. La demanda biológica de oxígeno (DBO) en estos efluentes varía entre 21 y 47 g/L, lo que equivale de 21.000 a 47.000 mg/L, mientras que el contenido de sólidos totales es elevado, alrededor de los 35.000 mg/L, y presentan una coloración intensa café oscura rojiza con un elevado grado de turbidez.

El etanol se obtiene de un proceso de destilación, pudiendo utilizar diversos residuos vegetales, cereales, tubérculos, algas marinas y la caña de azúcar, que es la que normalmente se utiliza en Venezuela. La diversidad de materias primas hace que las vinazas tengan una composición variable entre destilerías (Ibarra y col., 2019).

Todos estos parámetros hacen que las vinazas sean desde todo punto de vista, organoléptico, químico y físico, una sustancia muy contaminante y que requiere un tratamiento adecuado antes de regresar estos efluentes a un cuerpo de agua. Aproximadamente, alrededor del 98 al 99% de toda la composición de las vinazas es agua, agua contaminada con todos los componentes que se mencionaron. Esto hace que estos efluentes no puedan ser descargados directamente en un cuerpo de agua ni en el sistema de alcantarillado, obligatoriamente se debe aplicar un tratamiento.

En una destilería, un litro de alcohol etílico genera entre 10 a 15 litros de vinazas, lo que hace entonces más complejo el tratamiento de estos efluentes, por el elevado volumen que hay que manejar. El sistema de destilado en las empresas depende de la materia prima que se esté utilizando. Hay muchos factores que intervienen y que hacen que este rango sea tan amplio, hay destilerías que llegan a producir por cada litro de alcohol, 18 litros de vinazas.

Las vinazas no son peligrosas, provienen de un proceso agroindustrial; por tanto, por su composición no se caracteriza por tener una elevada carga de sustancias que la cataloguen como un material peligroso, pero sí son efluentes complejos debido

a que una gran proporción del material orgánico no es fácilmente biodegradable o recalcitrante, lo que hace que los procesos biológicos puedan funcionar, pero ayudados o asistidos con otros tipos de tratamientos. La vinaza se produce en tal cantidad que no hay una solución única para el tratamiento y el manejo de estos líquidos residuales.

La vinaza es rica en nutrientes, nitrógeno, fósforo y potasio, los tres macronutrientes de mayor importancia en la agricultura. Es por ello que se puede pensar en utilizarla para fertirrigar los suelos, es decir, aportar nutrientes y materia orgánica en suelos que están empobrecidos, desgastados o que necesitan algún tipo de fertilización. Por lo que en vez de utilizar un abono químico pudiera utilizarse la vinaza de una forma controlada, porque no se quiere alterar la química de los suelos.

En cualquier proceso de manejo de aguas residuales, lo primero que se debe realizar es una caracterización completa, una imagen clara de qué componentes conforman los efluentes. Con las concentraciones de DBO y DQO es posible calcular el índice de biodegradabilidad (DBO/DQO), este cociente para las vinazas oscila entre 0,53 y 0,59, lo que significa que por procesos biológicos se puede llegar a remover hasta el 59% de la DQO de la materia orgánica en estos efluentes.

En cuanto al tratamiento de las vinazas, lo primero que se tiene que hacer es un proceso de pretratamiento para adecuar las características de la vinaza. Cuando se habla de un pretratamiento se hace referencia a la remoción de sólidos grandes a través de una reja de desbaste, remoción de aceites y grasas. En el tratamiento primario, puede aplicarse sedimentación por gravedad o sedimentación asistida. Para las vinazas se propuso la realización de un pretratamiento de ajuste de la temperatura, pH y un tratamiento primario basado en un proceso de sedimentación (Figura 2).



Figura 2. Esquema de tratamiento para las vinazas.

El tren continúa con una combinación de sistemas biológicos, un tratamiento anaeróbico, es decir, sin presencia de oxígeno disuelto en el agua, seguido de un proceso aeróbico. García y col. (2019) aseguran que estos residuos pueden ser aprovechados mediante la tecnología de digestión anaerobia. En este proceso se suministra aire para que se termine el proceso de degradación de la materia orgánica. Esta combinación se utiliza principalmente para la remoción de materia orgánica en estado coloidal y disuelta. Al final de los procesos biológicos, la vinaza todavía contiene concentraciones de DQO, nutrientes, color, turbidez, por lo que para poder completar el tratamiento se ha incluido un tratamiento físicoquímico posterior a través de la coagulación-floculación.

En las investigaciones realizadas desde la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), solo se ha trabajado a escala de laboratorio; por tanto, los reactores tienen un volumen útil de 2 L, tiempos de retención hidráulica de 24 h y tiempos de sedimentación entre 45 y 30 minutos. La proporción biomasa(lodo)/agua residual fue de 20/80 para el tratamiento anaeróbico, es decir, 20% de biomasa o microorganismos activos dentro del reactor y 80% de vinaza. Por su parte, para el reactor aeróbico se usó combinación de 40% de biomasa y 60% de vinaza. Para el tratamiento físicoquímico se utilizaron coagulantes como sulfato de aluminio y cloruro férrico. De igual manera, se han tenido experiencias muy positivas utilizando coagulantes naturales como la Moringa oleifera.

La destilería en estudio dispone de grandes espacios, superficies de tierra en donde hay lagunas que almacenan el volumen de las vinazas que se generan diariamente. Se cuenta por lo menos con tres lagunas en donde la primera tiene una profundidad

de cinco metros y una superficie casi de dos hectáreas. Una vez generadas las vinazas, estas son descargadas a las lagunas que sirven como reservorios de homogenización, acá se ajusta el pH a la neutralidad. Este pH es el óptimo para el tratamiento biológico y la temperatura de 90°C se disminuye a valores de temperatura ambiente (28-30°C).

En cuanto a los resultados obtenidos a escala de laboratorio, se ha logrado una remoción global del tren de tratamiento (pretratamiento + tratamiento anaeróbico-aeróbico + tratamiento fisicoquímico) de 93% de DQO, 95% de turbidez y 94,6% de color, trabajando en condiciones de pH de 7,57 unidades y temperatura ambiente. Se logró disminuir la DQO de 23.024 a 1.600 mg/L. La Figura 3 muestra la disminución en la coloración de la vinaza, pasa de marrón rojiza oscura a una coloración marrón mucho más clara. La turbidez final es de 11,4 UNT y el color 0,32 abs.



Figura 3. Cambio de coloración en la vinaza

A pesar de los elevados porcentajes de remoción de DQO, color y turbidez, el efluente no cumple con la legislación venezolana para descarga a redes cloacales o cuerpos de agua. Para descargar en el sistema de alcantarillado se debió a ver llegado por lo menos a 800 mg/L de DQO, lo que indica que todavía queda trabajo por hacer, con otros tipos de tratamientos, mucho más avanzados como ósmosis inversa y nanofiltración.

La Figura 4 (página siguiente) muestra la comparación de color entre muestras crudas de vinazas y tratadas con ósmosis inversa. La primera imagen corresponde a la muestra vinaza cruda tomada directamente de la laguna receptora. Esta vinaza cuando pasa por un proceso de ósmosis inversa, donde se fuerza el agua a pasar por una membrana para separar las partículas contaminantes, se genera un permeado que se observa en la segunda imagen que es completamente incoloro. El ser incoloro no significa que no contenga de DQO, DBO, nitrógeno, fósforo o potasio, pero sí se mejoró el aspecto organoléptico. De acuerdo a mediciones realizadas, se ha obtenido un valor en el permeado de 700 mg/L de DQO.

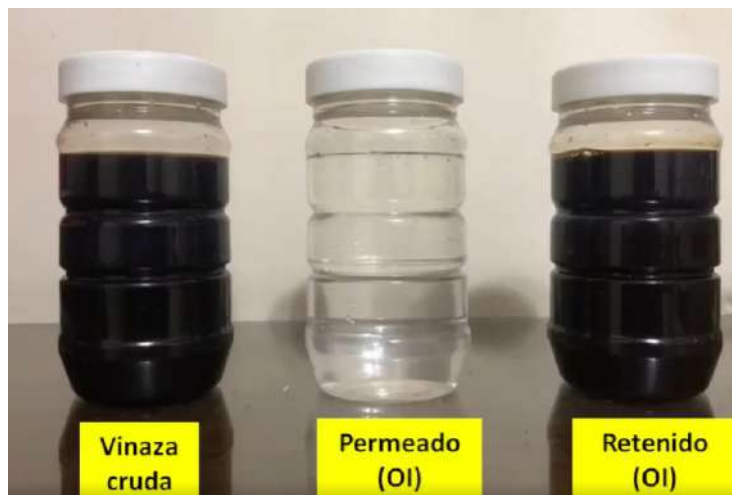


Figura 4. Comparación de color entre muestras crudas de vinazas y tratadas con ósmosis inversa

Cuando se hace el proceso de ósmosis inversa siempre se obtiene un permeado, pero también se obtiene la corriente de rechazo, que representa lo que es retenido o la parte concentrada que corresponde a la tercera imagen. El retenido en cuanto a volumen se genera en menor cantidad, pero en cuanto a concentración de contaminantes, está mucho más concentrado porque todos los contaminantes se están quedando en esta fracción. Por tanto, a pesar de que se está mejorando notablemente la composición del efluente tratado, se sigue teniendo un problema, que se va a hacer con el retenido.

Consideraciones Finales

La cantidad de vinazas que se generan en las destilerías es muy elevada por lo que antes de llegar al tratamiento como agua residual, podría aprovecharse por las virtudes que tiene en la parte agrícola como aporte de nutrientes. Además, existen otras estrategias que pueden aplicarse como la incineración, debido a que la vinaza está constituida principalmente por agua, este proceso permite ir la concentrando por evaporación del agua, y los componentes aprovechables van a quedar más concentrados. Al incinerar se pueden obtener cenizas ricas en potasio, unos de los macronutrientes más costosos al momento de aplicar en la agricultura y que normalmente se obtiene de la fuente química. Por lo que de un residuo que se genera en la industria de producción de alcohol se pueden generar un recurso que pudiera ser aprovechado.

Otra propuesta de aprovechamiento de la vinaza es utilizarla como sustrato para realizar el compost. El compost es un abono orgánico generado por el proceso de degradación aeróbica de ciertos sustratos. Se puede igualmente realizar la fertirrigación, es decir, el riego de cultivos o el riego del suelo antes de sembrar, de manera que el nitrógeno y potasio se hagan disponibles y puedan ser aprovechados.

La vinaza también puede ser aprovechada como suplemento alimenticio generando vinaza en polvo. En Colombia y Brasil, están concentrando la vinaza, y llegan a formar pellets, lo que generaría una facilidad para la gestión de este residuo, es más fácil manejar un saco de vinaza que una cisterna.

También se puede aplicar una tecnología llamada BioFloc, que es aprovechar vinazas para enriquecer ríos, lo que permite el crecimiento microorganismos heterótrofos, y se crían peces como tilapia y cachama.

Referencias Bibliográficas

Ibarra, R., León, L., Osoria, A. (2019). Caracterización físico-química de vinazas de destilerías. *Revista Cubana de Química*, 31(2), 246-257.

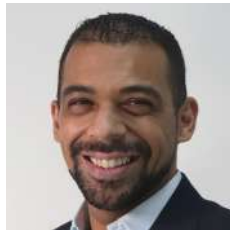
García, M., Intriago, S., Loureiro, J., Delgado, C. (2019). Evaluación de la producción de metano de vinazas mediante digestor anaerobio tipo batch. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(2), 79-88. <https://doi.org/10.46380/rias.v2i2.52>.

Robles, V., Poggi, H., Galíndez, J., Ruiz, N. (2018) Combined treatment of mezcal vinasses by ozonation and activated sludge. *Water Environment Research* 90: 1985-1996.

Zelaya, E., Martínez, G., Escamirosa, C., Morales, I. (2021). Vinazas de mezcal y su efecto biofertilizante en el rendimiento de hortalizas. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(3), e3159, <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3159>.



Tratamientos biológicos combinados para efluentes con alta carga orgánica y nutrientes



*Dr. Sedolfo Carrasquero Ferrer*⁷
scarrasquero@uteg.edu.ec

Las aguas residuales son aguas que han sido usadas, es decir, son aguas que se toman de la fuente, bien sea natural o de una red de abastecimiento, y se someten a un uso en particular (Henze y Comeua, 2008). En ese uso, se incorporan algunos contaminantes que deben ser removidos cuando el agua, continuando su ciclo, se descarga en el sistema de alcantarillado y termina en los cuerpos de agua. La clasificación general de las aguas residuales es en domésticas e industriales. En el caso de las aguas residuales domésticas, el tratamiento usualmente es predecible por su potencial contaminante relativamente homogéneo.

Todo proceso industrial genera un agua residual, aunque en el producto que se elabore puede no se tenga agua en su formulación, esto debido a que la mayoría de las operaciones industriales requieren agua; por ejemplo, para procesos de refrigeración y limpieza. Por lo tanto, dependiendo del sector, del 80 al 90% del agua utilizada en las industrias termina siendo agua residual.

⁷ Ingeniería Químico. MSc en Ingeniería Ambiental. Doctor en Ingeniería Ambiental. Director de Innovación y Desarrollo de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG), Ecuador.

El tratamiento de las aguas residuales industriales representa un reto, porque la composición de esta agua depende mucho del proceso productivo. Los efluentes industriales consisten en disoluciones acuosas con concentración de los diferentes productos que se emplean en la actividad industrial (Chamy y Jeison, 2003). Esta composición puede ser diversa y compleja debido a que puede contener una gran variedad de compuestos que se consideran contaminantes y que se requieren ser removidos en el sistema de tratamiento para su respectiva descarga o su reúso en procesos industriales o agricultura. Dentro de las características de las aguas residuales industriales se tiene que presentan una gran carga orgánica, es decir, estos efluentes presentan una elevada concentración de materia orgánica medida como DBO o DQO (Fernández y col., 2006). También tienen un caudal importante que se puede producir de forma continua o discontinua dependiendo el proceso productivo. Además, estas aguas suelen tener presencia de compuestos tóxicos para los microorganismos, que usualmente son los responsables de los procesos biológicos de tratamiento, y poseen sustancias que no son biodegradables o que presentan difícil degradación.

Las aguas residuales industriales son variables en volúmenes y composición y dependen mucho del tipo de vertido continuo o discontinuo (Ariza y Vargas, 2020). Cuando los vertidos son discontinuos se debe garantizar un caudal que alimente a los sistemas de tratamiento porque se pueden generar variaciones en las cargas orgánicas y volumétricas.

En general, los procesos industriales generan cuatro tipos de efluentes, el líquido residual propiamente dicho, este hace referencia a un agua que contiene el producto que se está elaborando o restos de la materia prima. Por ejemplo, en las tenerías, las empresas que se dedican a producir cuero, sus aguas tienen sales de cromo que es el compuesto que se utiliza como curtiente en el proceso. Adicional al líquido residual, se tienen también aguas residuales de proceso que pueden estar relacionadas con el lavado, son aguas residuales que tienen concentraciones menores, hasta 50 veces menos que un líquido residual, pero en cantidad, el caudal puede ser 50 veces más. También se tienen las aguas de refrigeración, que son solamente usadas para procesos de calentamiento o enfriamiento y aguas de drenaje, que usualmente son para la recolección de agua de lluvia en las instalaciones industriales.

Usualmente estas corrientes de agua residual pueden generarse en las plantas industriales de forma separada, pero también pueden generarse en un alcantarillado único, y esto es clave a la hora de realizar el diseño, porque muchas veces combinar corrientes puede ayudar para mejorar las condiciones orgánicas del agua residual a tratar.

Existe una gran diversidad de efluentes industriales, lo que requiere que se tengan estudios concretos de caracterización. Se recomienda que se realice una caracterización tradicional, con lo que lo que exige la legislación ambiental en cada uno de los países. Sin embargo, adicional a estos estudios deben acompañarse de caracterizaciones detalladas, es decir, ir más allá de una lista de parámetros físicos y químicos que contiene la norma ambiental, sino determinar fracciones y velocidades de degradación de compuestos orgánicos, lo que es clave para el diseño. Se sugiere además realizar estudios de tratabilidad, que pueden ser a escala laboratorio o piloto, esto permite definir estrategias operacionales y seleccionar adecuadamente la tecnología de tratamiento.

Los contaminantes en las aguas residuales se pueden agrupar en ocho grandes grupos (Figura 1, (página siguiente)), la materia orgánica en sus dos tipos, biodegradable y no biodegradable o refractaria. Adicional, los nutrientes, compuestos de nitrógeno y fósforo, los sólidos que pueden aparecer como suspendidos o disueltos, otros contaminantes importantes como metales pesados o contaminantes emergentes, y microorganismos patógenos (Rolim, 2000).



Figura 1. Contaminantes de importancia en aguas residuales (Rolim, 2000)

En los efluentes industriales es importante la medición de la materia orgánica en sus dos formas la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) porque esto permite estimar una relación de biodegradabilidad o índice de biodegradabilidad (IB), que es cociente entre la DBO_{5,20} y la DQO. Si el valor del IB es mayor a 0,8, el efluente es muy biodegradable. Por el contrario, si es menor a 0,3 es no biodegradable, inerte o refractario (Tabla 1).

Por lo tanto, este cociente permite identificar los tipos de tratamiento que se pueden utilizar. Si el efluente es muy biodegradable, o biodegradable, se pueden aplicar tratamientos biológicos porque se garantiza el éxito en la remoción de la materia orgánica. Sin embargo, si el efluente es poco biodegradable, la mejor opción sea la combinación de tratamiento biológico y fisicoquímico. En caso de ser el efluente no biodegradable, solo se aplicaría tratamiento fisicoquímico.

DBO ₅ /DQO	Carácter
> 0,8	Muy biodegradable
0,7-0,8	Biodegradable
0,3-0,7	Poco degradable
< 0,3	No biodegradable

Tabla 1. Relación de biodegradabilidad (INESCOP, 2008)

El IB da una información preliminar, pero se sugiere determinar las fracciones de la materia orgánica, es decir, cuanta es lentamente biodegradable o rápidamente biodegradable, porque con estos valores se pueden estimar los tiempos de residencia en reactores para sistemas de tratamiento. De igual manera, conocer la fracción no biodegradable, que puede ser soluble o particulada, permite estimar la fracción que no podrá ser eliminada por los sistemas biológicos (Figura 2). Esta fracción es la soluble inerte, ya que la particulada se puede remover eliminar en sistemas biológicos a través de la purga.

De acuerdo a resultados obtenidos para diversos efluentes industriales como alimenticios, matanza de animales y lácteos, el cociente entre la concentración de DQO biodegradable (DQOB) y la DQO oscila entre 0,80 y 0,92, lo que indicaría que se podría remover entre un 80 y un 92% de la materia orgánica en estos efluentes. Sin embargo, cuando se compara con la relación DBO/DQO, se encuentran importantes diferencias, este índice varió entre 0,34 y 0,68 para los mismos efluentes. En el caso de los efluentes lácteos, el cociente DQOB/DQO fue de 0,92 mientras que la relación DBO/DQO fue de 0,44; esta diferencia puede deberse a que la DBO es un parámetro muy sensible. Cuando se hace la medición en efluentes industriales siempre hay la presencia de compuestos que pueden inhibir el crecimiento microbiano, y si no se hace con biomasa aclimatada se van a obtener valores que no corresponden a la fracción biodegradable que realmente se puede remover, porque esa fracción lentamente biodegradable muchas veces no se manifiesta en la medición de la DBO.

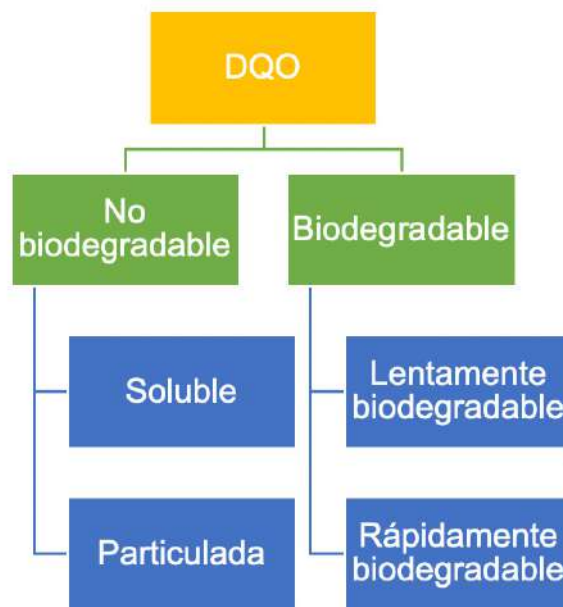


Figura 2. Fracciones de la materia orgánica medida como DQO

Además de la materia orgánica, también se debe realizar la medición de los compuestos nitrogenados, tanto el nitrógeno amoniacal como el orgánico, así como los nitritos y los nitratos, que son las formas más importantes de nitrógeno en el agua residual (Arteaga y col., 2019). También es importante que se midan los compuestos fosforados; por lo menos, fósforo total, y orgánico. Otros parámetros que se recomiendan determinar como variables de control son el pH, alcalinidad total y acidez total. También, y dependiendo del efluente, se puede añadir la medición de metales y otros parámetros que se consideren importantes.

Estos parámetros varían notablemente para los diferentes efluentes industriales. Dentro del sector agroindustrial, las aguas residuales provenientes de la matanza de animales son las que presentan la mayor concentración de DBO y DQO, sobre todo porque hay una alta carga orgánica producida por la sangre que suele acompañar los procesos de la matanza y también restos de orina y heces. Los animales previo matanza realizan defecan por el estrés generado. Usualmente si se realiza la separación de la sangre de la corriente de agua residual en el matadero o en el camal, se va a obtener una reducción del importante en la concentración de materia orgánica. De hecho, la sangre puede ser utilizada para la fabricación de producto de valor agregado como alimento para animales.

Los efluentes de matanza también poseen a una elevada concentración de nitrógeno y fósforo, por lo que son aguas residuales complejas y requieren combinar tratamientos porque un único sistema no va realizar con éxito la remoción de los contaminantes para la descarga en cuerpos de agua, redes cloacales o reutilización.

Cuando se van a tratar efluentes industriales, es importante calcular la carga contaminante o carga másica que se expresa frecuentemente en kg/d y debe entenderse como la masa de contaminantes aportada en una unidad de tiempo (Ecuación 1).

Un efluente puede tener bajas concentraciones de un contaminante, pero elevado caudal, y eso va a generar una carga másica contaminante que puede ser mayor que en efluentes que tienen poco caudal, pero elevada concentración.

Carga contaminante = Concentración*Caudal (Ecuación 1)

Donde:

Carga contaminante (en kg/d)

Concentración (en kg/m³)

Caudal (m³/d)

Cuando se tiene un agua residual que está siendo producida por una industria, se realiza el proceso de caracterización para tener la composición del agua residual cruda (Figura 3). Esta agua se somete a un sistema de tratamiento para mejorar su calidad y lograr la descarga o reutilización que sería lo ideal; por ejemplo, reusó de agua tratada con fines agrícolas o en procesos industriales. La calidad final del efluente tratada viene dada por la respectiva norma vigente en cada uno de los países.



Figura 3. Comparación del agua residual cruda y tratada

Para el cumplimiento de estas normativas, no suele aplicarse un tratamiento único, suele combinarse formando sistemas de tratamiento (Figura 4). En el tratamiento preliminar se remueven sólidos de gran tamaño, se retira material inorgánico fundamentalmente, luego se tiene el tratamiento primario, donde se elimina material orgánico por sedimentación usando tiempos de retención de una o dos horas.

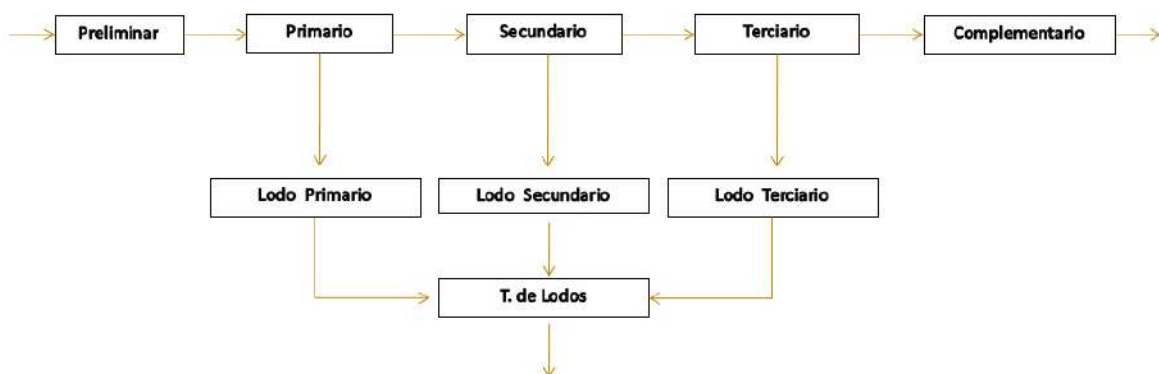


Figura 4. Sistemas de tratamiento en una planta de efluentes industriales.

El tratamiento secundario corresponde a un tratamiento biológico que se lleva a cabo en reactores con o sin aire utilizando organismos vivos para la reducción de contaminantes. Seguido, se aplican tratamientos terciarios, complementarios o de

pulimento para mejorar la calidad del efluente. Todas las plantas de tratamientos tienen dos líneas, una para tratar las aguas y una línea de producción de lodos generados que requiere tratamiento para su disposición final. Por los requerimientos energéticos, el tratamiento de lodos puede ser tan costoso como la línea de aguas, es por ello que cuando se realizan análisis técnico-económicos se debe tomar en cuenta la cantidad de lodos que se van a generar.

El tratamiento biológico se basa en utilizar organismos vivos; por ejemplo, bacterias y protozoos que utilicen la materia orgánica presente en el efluente industrial como fuente de carbono y energía. Esto va a permitir un crecimiento microbiano y la generación de un flóculo biológico que permita la estabilización de esta materia orgánica para su transformación en gases volátiles. Por supuesto, el flóculo biológico debe removerse del sistema y lograr su disposición. Se tiene entonces un conjunto de bacterias y protozoos que se llama biomasa y la materia orgánica que representa el sustrato, es decir, es el alimento de la biomasa. Mientras la biomasa se alimenta del sustrato, se realiza el proceso de descontaminación, transformando la materia orgánica en compuestos menos nocivos como el dióxido de carbono, que se escapa como gas.

Esta transformación ocurre por oxidación biológica, es decir, por conversión bacteriana de los elementos que se encuentran presentes en el compuesto orgánico. Si el compuesto orgánico tiene carbono se producirá dióxido de carbono, si el ambiente es completamente aeróbico, es decir, el oxígeno se convierte en el último aceptor de electrones en la cadena respiratoria. Si se tiene nitrógeno se generan nitratos, si hay presencia de azufre, sulfatos, y si existe fósforo, fosfatos, con esto se logra entonces una mineralización, estabilización o descomposición biológica de la materia orgánica, que se está llevando a su forma inorgánica altamente oxidada, que suele ser la más estable.

Existen otro tipo de reacciones bacterianas que pueden darse en el agua residual durante estos tratamientos. En ausencia de oxígeno, el aceptor de electrones en la cadena respiratoria es el sulfato se va a producir reducción de sulfatos, y si es el nitrato, se origina la desnitrificación. Si es el dióxido de carbono, va a ocurrir la metanogénesis y si es la propia materia orgánica, se produce una fermentación. Dependiendo de las condiciones que como se diseñen los sistemas de tratamiento, prevalecerán unas reacciones bacterianas por encima de otras.

En general son tres los procesos metabólicos que van a preponderar en estos sistemas, pueden ser completamente aeróbicos, anaeróbicos y anóxicos. Se tendrán procesos aeróbicos si se brinda oxígeno a través de aireación garantizando concentraciones superiores a 2 mg/L, toda la materia orgánica se oxida a dióxido de carbono (Figura 5). Son procesos altamente eficientes, pero generan una gran cantidad de biomasa que luego debe removerse del sistema, ser tratada y dispuesta en el medio ambiente.

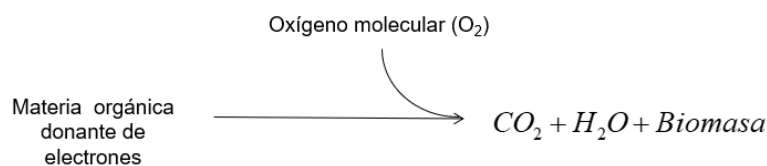


Figura 5. Procesos aeróbicos para estabilización de la materia orgánica

En los procesos anaeróbicos no se logra una oxidación completa, sino que se transforma fundamentalmente la materia orgánica a metano y dióxido de carbono (Figura 6). En los procesos anóxicos, no hay oxígeno molecular, pero sí oxígeno asociado al nitrógeno, es decir, hay la presencia de nitratos por lo que ocurre el proceso de desnitrificación, que es la transformación del nitrato a nitrógeno gas (Figura 7). Las bacterias que realizan este proceso son heterótrofas por lo que requieren de una fuente de carbono orgánico que se pueden suministrar desde una fuente externa; por ejemplo, metanol, o se puede utilizar el propio carbono endógeno.

El nitrógeno contribuye al proceso de eutrofización, fenómeno que consiste en un crecimiento excesivo de algas en las aguas superficiales. Los compuestos nitrogenados exigen una demanda de oxígeno ocasionando una disminución del oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, un parámetro importante que informa sobre la salud de ecosistema acuático. Si produce una disminución del oxígeno disuelto, van a desaparecer algunas especies acuáticas superiores.

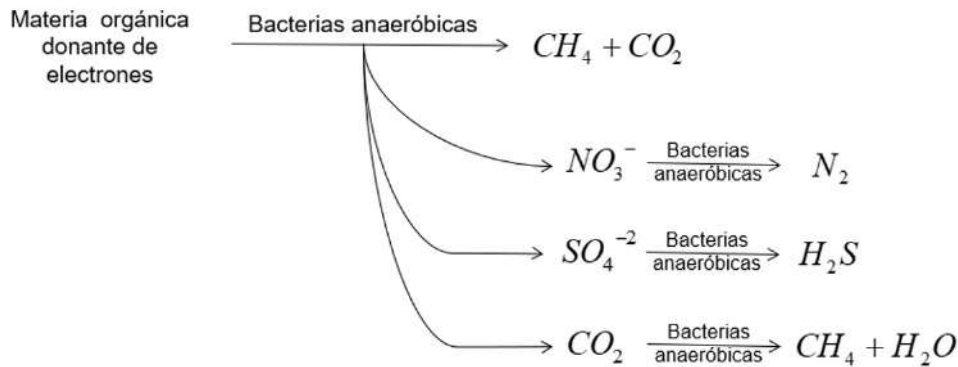


Figura 6. Procesos anaeróbicos de transformación de materia orgánica (Romero, 2001)

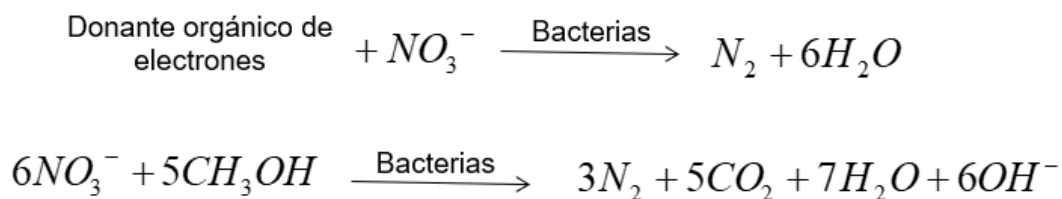


Figura 7. Procesos anóxicos de transformación de materia orgánica

El nitrógeno se puede eliminar por diferentes vías, la manera tradicional es la nitrificación-desnitrificación. Usualmente en los efluentes industriales, el nitrógeno se encuentra principalmente bajo la forma de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal. En ambientes completamente aeróbicos, el nitrógeno amoniacal se transforma a nitritos, y posteriormente a nitratos a través de dos grupos bacterianos importantes, las nitrosomonas y nitrobacter. Luego los nitratos se transforman a nitrógeno gas por una desnitrificación anóxica. La acumulación de nitritos usualmente es insignificante porque la etapa limitante en el proceso de remoción de nitrógeno es la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitritos.

Este proceso consume oxígeno, 4,57 gramos de O_2 por cada gramo de $N-NH_4$ oxidado. De igual manera se consume alcalinidad (7,14 mg $CaCO_3/mg$ $N-NH_4$ oxidado), esto se debe a que las bacterias nitrificantes son autótrofas; por lo tanto, requiere de una fuente carbono inorgánico.

Los procesos de nitrificación y desnitrificación ocurren en reactores con aire y sin aire, respectivamente, además del uso de sedimentadores para separar el agua residual tratada de la biomasa que se recircula a la entrada de los reactores. Cabe destacar que se puede hacer en diferentes unidades, o también en un solo reactor que opera con secuencias, es decir, primero se inyecta aire, luego se elimina el aire, y, por último, se coloca una fase de sedimentación.

Por otro lado, el fósforo no se convierte por acción biológica como el nitrógeno, este elemento se asimila. Es por ello que la eliminación de fósforo se logra por una asimilación biológica aumentada. Se busca que la biomasa utilice más fósforo del que necesita, y luego este se retira cuando se remueve la biomasa por sedimentación y extracción de la purga en exceso.

Un sistema aeróbico remueve fósforo entre un 15 y 25% por asimilación, es decir, la biomasa utiliza este nutriente para crecer. Si se quiere potenciar esta remoción de fósforo, se debe alternar la biomasa en ambiente aeróbicos y anaeróbicos porque esto favorece el crecimiento de los organismos acumuladores de fósforo (PAOs) que pueden incorporar 0,38 mg P por cada mg de sólido suspendido volátil (SSV).

Los PAOs suelen ser facultativos, es decir, existen tanto en ambientes con o sin aire. En fases aeróbicas, estos microorganismos compiten con los organismos heterótrofos ordinarios (OHOs) que son completamente aeróbicos. Es por ello que, en las etapas

anaeróbicas, los PAOs almacenan ácidos grasos volátiles de cadena corta bajo la forma de polihidroxialcanoatos (PHB), utilizando la energía liberada por el desdoblamiento de moléculas de ATP en ADP que liberan grupos fosfatos al medio (Figura 8).

Cuando los PAOs ingresan a la fase aeróbica consumen sus reservas de material orgánico, y reponen los grupos fosfatos perdidos en la fase anaeróbica, con esto se logra que el organismo consuma más fósforo del que necesita.

Para la remoción simultánea de nutrientes, las experiencias prácticas realizadas han demostrado que se deben combinar tratamientos como fermentación anaeróbica, reactores aeróbicos, y procesos fisicoquímicos para lograr generar un efluente que pueda ser descarga a cuerpos de aguas receptores. En cuanto a la fermentación anaeróbica, este proceso origina variaciones en las fracciones de la materia orgánica del efluente industrial, mejora su composición y tratabilidad en reactores biológicos. Los tiempos de fermentación varían entre los 7 y 30 días a temperaturas ambientales.

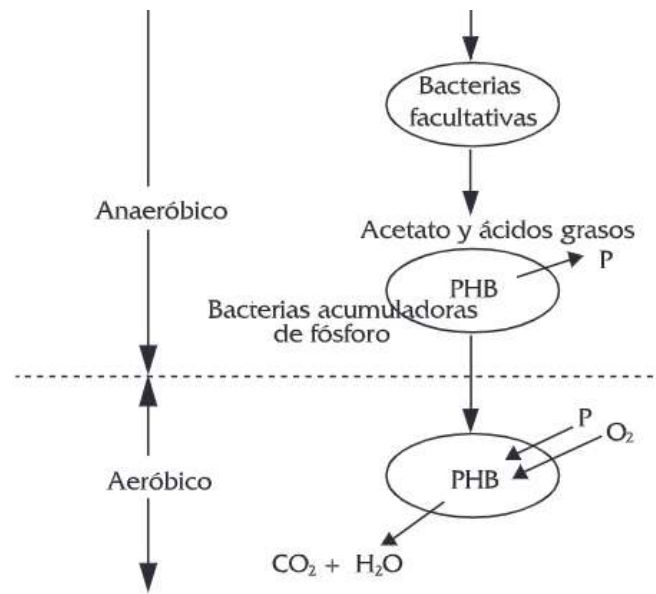


Figura 8. Esquema de remoción de fósforo en ambientes anaeróbicos y aeróbicos (Escaler y Mujeriego, 2001).

En reactores por carga utilizando una secuencia anaeróbica-aeróbica-anóxica y tiempos de ciclo operacional que varían entre 8 y 24 horas se logran obtener las variaciones típicas de los procesos de remoción de nutrientes. Estos reactores suelen operar con tiempos de retención celular que varían entre los 5 y 25 días debido a que altos tiempos favorecen la remoción de nitrógeno porque resulta que las bacterias nitrosomonas tardan algún tiempo en desarrollarse. En la fase sin aire del reactor, los sistemas muestran un aumento en la concentración de fósforo, lo que indica la presencia de PAOs. En la fase aeróbica, se logra la disminución del fósforo con valores de remoción mayores al 50%. En esta fase también se obtienen las mayores concentraciones de nitritos y nitratos, es decir, está ocurriendo el proceso de nitrificación.

Para la visualización de estos procesos se recomienda la construcción de perfiles de parámetros fisicoquímicos como DQO, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, ortofosfatos, alcalinidad total, y correlacionarlos con variables de control en línea como potencial de oxido reducción, pH, y oxígeno disuelto, entre otros. Se recomienda que la toma de muestras sea cada 15 o 30 minutos durante todo el ciclo operacional.

Para la remoción de materia orgánica inerte en los efluentes se puede aplicar un tratamiento posterior de coagulación-floculación utilizando productos comerciales o algún coagulante no tradicional como amargos de salmuera, extractos de semillas, polímeros naturales como el quitosano, entre otros. Hay que fomentar el uso de las corrientes de salida de los sistemas de tratamiento en usos industriales como agua de servicio, agua de lavado o riego.

Consideraciones Finales

Para el tratamiento de los efluentes industriales complejos es necesaria la combinación de diferentes operaciones y procesos unitarios como reactores biológicos, fermentadores, unidades de coagulación-floculación, adsorción, entre otros, para la eliminación tanto de la materia orgánica biodegradable como la refractaria.

Se recomiendan acompañar los ensayos de tratabilidad con estudios básicos de microbiología para conocer el comportamiento de los microorganismos predominantes

La eliminación simultánea de carbono, nitrógeno y fósforo es posible en sistemas biológicos, si se combinan ambientes aeróbicos, anaeróbicos y anóxicos; por ejemplo, en reactores por carga secuencial, una opción de fácil operación para el pequeño productor de carne res y cerdo que todavía no tiene el presupuesto para poder instalar un sistema de tratamiento más complejo.

Referencias Bibliográficas

Ariza, M., Gutiérrez, L. (2020). Revisión bibliográfica del uso de coagulantes naturales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeciencia*, 5, 95-108.

Arteaga, V., Quevedo, A., Valle, D., Castro, M., Bravo, Á., Ramírez, J. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 319-343. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>.

Chamy, R.; Jeison, D. (2003). *Avances en biotecnología ambiental: tratamientos de residuos líquidos y sólidos*. Ediciones Universitarias de Valparaíso. pp. 327. Chile.

Escaler, M., Mujeriego, R. (2001). Eliminación biológica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante un proceso discontinuo de fangos activados. *Ingeniería del agua*, 8 (1): 67-77. <https://doi.org/10.4995/ia.2001.2860>

Fernández, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., Sanz, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Fondo editorial de la Universidad de Alcalá. Madrid, España. 137 pp.

Henze, M., Comeua, Y. (2008). Wastewater characterization. In: *Biological wastewater treatment: Principles, modelling and design*. Edite by Henze, M., Van Loosdrecht, M., Ekama, G., Brdjanonic, D. Published by IWA Publishing, London, Reino Unido. 511 p.

INESCOP. Centro de Innovación y Tecnología. (2008). *Aplicación de bioensayos respirométricos en aguas de tenerías*. Departamento del medio ambiente de INESCOP, Alicante, España, 16 p.

Rolim, S. (2000). *Sistema de lagunas de estabiización*. Editorial Mc Graw Hill. Bogotá, Colombia. 370 p.

Romero, J. (2001). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia. 1232 p.

GOTAS DE VIDA

Celebrando la Semana Internacional del

AGUA

Un legado de Sostenibilidad para las generaciones futuras

ISBN: 978-9942-614-27-8



9 789942 614278