Resistencia antimicrobiana en aguas residuales

Maricela **Guerrero Suárez**
María Elena **Velázquez Meza**

Todos los organismos vivos necesitan agua para realizar procesos celulares necesarios para la supervivencia. Cada vez hay menos disponibilidad de agua apta para el consumo humano debido al constante incremento de la población, a la contaminación de los cuerpos acuáticos, su uso excesivo y el calentamiento global, entre otros factores. Este consumo implica el uso del agua para ser ingerida y el uso del líquido para la producción de comida, energía y otros servicios.

El acceso al agua potable en los hogares, centros de atención a la salud, lugares de trabajo y escuelas reduce de manera efectiva la mortalidad causada por enfermedades transmitidas por el agua. De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), alrededor del 26 % de la población a nivel mundial no tiene acceso a agua potable, lo que equivale a dos mil millones de personas en todo el mundo.

Por otro lado, el agua utilizada para las diferentes actividades antropogénicas siempre genera aguas residuales que resultan contaminadas por el mismo uso. A escala mundial, 3.6 mil millones de personas (46 %) carece de servicios sanitarios, y el 44 % de las aguas residuales generadas por las actividades antropogénicas tiene un tratamiento pobre o nulo, lo que hace que estas aguas lleguen contaminadas a diferentes ambientes acuáticos y terrestres,

generando con ello un riesgo significativo para la salud humana, animal y ambiental (UN-Water, 2021).

RESISTENCIA ANTIMICROBIANA

El descubrimiento de los antibióticos ha permitido salvar muchas vidas; sin embargo, el mal uso y el abuso de estos han favorecido la selección de bacterias resistentes a antibióticos (BRA) y de genes de resistencia antimicrobiana (GRA). Esta problemática se ha agravado con el paso del tiempo y actualmente se ha convertido en un problema importante de salud pública que ha escalado a nivel mundial, provocando altas tasas de morbilidad y mortalidad, así como costos millonarios para la atención de las enfermedades provocadas por BRA. De acuerdo con datos estimados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), ocurren más de 700,000 muertes al año causadas por BRA; esta cifra podría aumentar hasta 10 millones de muertes por año para el 2050 si no se generan estrategias para combatir la resistencia antimicrobiana (RAM). El impacto económico mundial para financiar las medidas de contención de la RAM se estima en aproximadamente 9,000 millones de dólares por año, y esta cifra aumentará si no se toman medidas preventivas. En la actualidad, la problemática de la RAM debe ser abordada a través del enfoque de "Una salud", el cual promueve una interrelación entre la salud humana, la salud animal y la salud ambiental, teniendo en cuenta que la afectación a cualquiera de estos tres ámbitos tiene una repercusión directa en los otros dos.

El concepto de "Una salud" fue creado en la década de 2000, en un esfuerzo tripartita entre la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE) y la OMS, con la finalidad de desarrollar un marco de trabajo que implementaría un enfoque interdisciplinario para desarrollar políticas encaminadas a entender y prevenir enfermedades. Uno de los retos de este enfoque, en cuanto a la RAM, es la vigilancia temprana de estos tres sectores (humano, animal y ambiental). En el sector ambiental se encuentran de manera importante los ecosistemas acuáticos, dentro de los que se incluye la vigilancia de la RAM en aguas residuales (Interagency Coordination Group on Antimicrobial Resistance, 2019; Velazquez-Meza *et al*., 2022).

AGUAS RESIDUALES Y RESISTENCIA ANTIMICROBIANA

Las aguas que provienen de distintos entornos hospitalarios, urbanos, agrícolas, industriales, ganaderos, avícolas, piscícolas, entre otros, convergen en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Las aguas residuales contienen contaminantes de distintos tipos como detergentes, metales pesados, trazas de antibióticos, desinfectantes, BRA y GRA; para disminuir la carga de estos contaminantes, las PTAR cuentan con diferentes procesos de tratamiento (pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario). Estos sistemas pueden variar dependiendo de la infraestructura de cada PTAR. Las PTAR tienen el objetivo de disminuir la carga de contaminantes presentes en las aguas residuales, reduciendo con ello los riesgos para la salud humana, animal y ambiental. A pesar de estos sistemas de tratamiento, las BRA, sus GRA y otros determinantes de resistencia logran salir al ambiente a través de las aguas residuales tratadas, lo que representa un problema de salud pública importante que requiere atención (Figura 1).

Las condiciones generadas en las aguas residuales y dentro de las PTAR promueven la adquisición de GRA mediante transferencia horizontal de genes entre bacterias de la misma especie o incluso entre bacterias de géneros diferentes. Este tipo de genes se encuentran mayormente ubicados en elementos genéticos móviles (EGM), casetes cromosómicos, bacteriófagos, plásmidos y transposones.

La vigilancia de la carga antimicrobiana de las aguas residuales crudas y tratadas resulta importante para conocer la eficacia de los sistemas de tratamiento de las PTAR, además de que permite conocer qué tipo de bacterias salen de las PTAR y el riesgo que esto conlleva cuando el agua tratada alcanza los distintos ecosistemas (Galarde-López *et al*., 2024; Velazquez-Meza *et al*., 2024). Los estudios

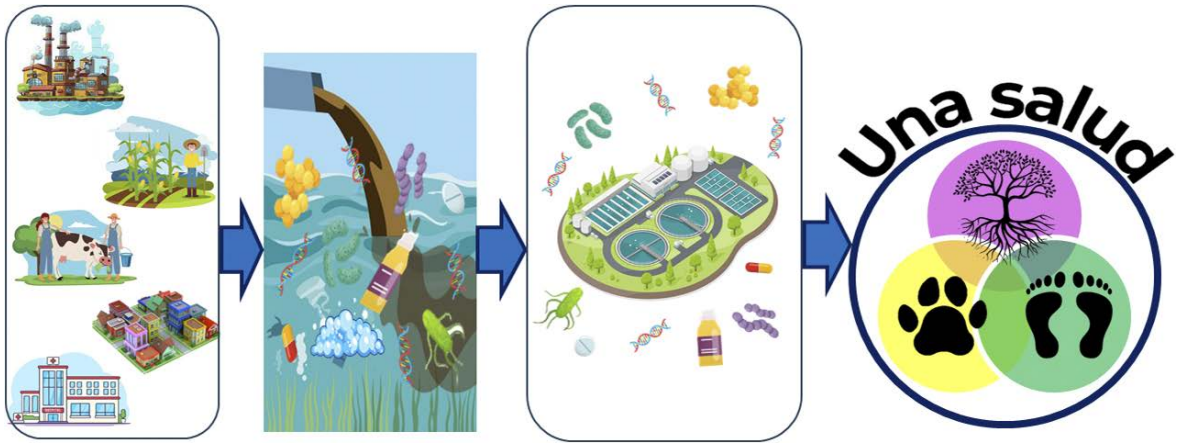

Figura 1. Representación esquemática de la diseminación de la RAM a través de las aguas residuales provenientes de diversas actividades antropogénicas y su repercusión en la salud humana, animal y ambiental.

de la RAM en aguas residuales han sido propuestos como un modelo de vigilancia temprana de la RAM debido a que este tipo de aguas se consideran puntos calientes para la adquisición y diseminación de GRA al medio ambiente. En los últimos años se han generado diversos trabajos que abordan este tema; a continuación, se describen brevemente los hallazgos más sobresalientes.

Existen múltiples estudios alrededor del mundo en los que se analizan aguas residuales para conocer el contenido bacteriano y los GRA presentes en estos entornos. En el artículo de revisión realizado por La Rosa y colaboradores, publicado en 2025, refiere un estudio realizado en 2019 en Croacia, en el que se encontró que la abundancia relativa de GRA fue mayor en las aguas residuales farmacéuticas, mientras que la riqueza de GRA fue mayor en las aguas residuales municipales (La Rosa *et al*., 2025). Esta revisión también documenta la presencia de enterobacterias resistentes a fosfomicina mediada por los genes *fosA3* y *fosA4* en aguas residuales hospitalarias y comunitarias. Otro trabajo citado en esta revisión reportó la presencia de *Acinetobacter baumannii* resistente a carbapenémicos en aislamientos clínicos y en aguas residuales hospitalarias crudas y tratadas, lo que demuestra el potencial que tienen las aguas residuales hospitalarias para la diseminación de BRA. Estudios más recientes incluidos en esta revisión reportan GRA que codifican para carbapenémicos, fluoroquinolonas y aminoglucósidos en aguas residuales (Brasil, 2024). En otro estudio mencionado en la revisión se ha reportado la presencia de bacterias productoras de betalactamasas de espectro extendido en ríos y aguas residuales de origen farmacéutico, hospitalario y municipal en Nepal. También se refiere otro trabajo realizado en Italia (2024), donde se comparó la abundancia de GRA en aguas superficiales y aguas residuales tratadas, y se encontró mayor diversidad de GRA en el agua residual (La Rosa *et al*., 2025).

En México, este tipo de estudios ha sido abordado de manera muy reciente. El primer artículo sobre RAM en aguas residuales hospitalarias en México, publicado en 2022, mostró la presencia y persistencia de cepas de *Klebsiella pneumoniae* resistentes a carbapenémicos y a otros grupos de antimicrobianos (Galarde-López *et al*., 2022a). Otro reporte en México (2022) detectó en aguas residuales hospitalarias aislamientos de *E. coli*, *Acinetobacter* spp. y *Enterobacter* spp. resistentes a cefalosporinas y otros grupos de antimicrobianos (Galarde-López *et al*., 2022b).

En 2024 se realizó un estudio en aguas residuales hospitalarias y comunitarias, detectando la presencia de aislamientos multirresistentes de *Staphylococcus* spp. y *Enterococcus* spp., 17 % y 38 %, respectivamente (Velazquez-Meza *et al*., 2024).

© **Raúl Chiquito**. *Vendiendo leña.* Vendedores de leña de la región del Tentzo.

La presencia y persistencia de bacterias del grupo ESKAPEE y sus GRA fueron detectadas en aguas residuales hospitalarias en México; en este trabajo se encontraron un total de 172 GRA; los más abundantes y persistentes fueron aquellos que codifican para resistencia a aminoglucósidos, betalactámicos, macrólidos, tetraciclinas, sulfonamidas, lincosamidas y glucopéptidos (Galarde-López *et al*., 2024).

Urzúa *et al*., en 2024, realizó un estudio de aguas residuales de origen comunitario, industrial y hospitalario, donde se aislaron Enterobacterales y otros bacilos Gram negativos resistentes a diversos antimicrobianos, incluyendo los carbapenémicos.

Recientemente, Velazquez *et al*., 2025, realizó un estudio metagenómico en aguas residuales comunitarias y hospitalarias, donde describió la abundancia de las poblaciones bacterianas, la abundancia de GRA y plásmidos que portan GRA, evidenciando que los GRA más abundantes fueron aquellos que codifican para antibióticos considerados de última elección (Velazquez-Meza *et al*., 2025).

CONCLUSIONES

La RAM es un fenómeno creciente que representa un problema de salud pública importante en todo el mundo.

© **Raúl Chiquito**. *Cuatreros y tienda*.
Bandoleros pasando por la calle central de Tlaxcalancingo.

© **Raúl Chiquito**. *Llegando a Contlantzinco*. Llegada de Alonso Galiote a Tlaxcalancingo.

© **Raúl Chiquito**. Dinero para el santuario de Cholula. Esteban Tocatl derramando dinero para la reconstrucción del santuario de la Virgen de los Remedios de Cholula en el siglo XIX.

Este problema abarca los tres ámbitos incluidos en el concepto de Una Salud: la RAM en la salud humana, animal y ambiental, siendo probablemente la RAM en salud ambiental la menos explorada. Es por ello que los estudios de RAM en aguas residuales podrían ser un modelo de vigilancia temprana que permita detectar el surgimiento y diseminación de BRA y sus determinantes de resistencia, como sus GRA, plásmidos y fagos portadores de GRA, evidencia necesaria para generar políticas públicas encaminadas a regular las descargas de aguas residuales más allá de la detección de coliformes totales y fecales, así como impulsar la implementación de sistemas de tratamiento más eficaces en las PTAR.

REFERENCIAS

Galarde-López M, Velazquez-Meza ME, Bobadilla-del-Valle M *et al*. (2022a). Surveillance of antimicrobial resistance in hospital wastewater: Identification of carbapenemase-producing *Klebsiella* spp. *Antibiotics* 11(3):288.

Galarde-López M, Velazquez-Meza ME, Bobadilla-del-Valle M *et al.* (2022b). Antimicrobial resistance patterns and clonal distribution of *E. coli*, *Enterobacter* spp. and *Acinetobacter* spp. strains isolated from two hospital wastewater plants. *Antibiotics* 11(5):1-9.

Galarde-López M, Velazquez-Meza ME, Godoy-Lozano EE *et al*. (2024). Presence and persistence of ESKAPEE bacteria before and after hospital wastewater treatment. *Microorganisms* 12(6):1231.

Interagency Coordination Group on Antimicrobial Resistance (2019). *No time to wait: Securing the future from drug-resistant infections*. World Health Organization. Recuperado de: https://www.who.int/publications/i/item/no-time-to-wait-securing-the-future-from-drug-resistant-infections.

La Rosa MC, Maugeri A, Favara G *et al.* (2025). The impact of waste water on antimicrobial resistance: A scoping review of transmission pathways and contributing factors. *Antibiotics* 14(2):1-29.

UN-Water (2021). *Summary progress update 2021: SDG 6-Water and sanitation for all*. Recuperado de: https://www.unwater.org/new-data-on-global-progress-towards-ensuring-water-and-sanitation-for-all-by-2030/.

Urzua-Abad MM, Aquino-Andrade A, Castelan-Vega JA *et al*. (2024). Detection of carbapenemases in Enterobacterales and other Gram-negative bacilli recovered from hospital and municipal wastewater in Mexico City. *Scientific Reports* 14(1):26576.

Velazquez-Meza ME, Galarde-López M, Carrillo-Quiróz BA y Alpuche-Aranda CM (2022). Antimicrobial resistance: One health approach. *Veterinary World* 15(3):743-749.

Velazquez-Meza ME, Galarde-López M, Cornejo-Juárez P *et al.* (2024). Multidrug-resistant *Staphylococcus* sp. and *Enterococcus* sp. in municipal and hospital wastewater: A longitudinal study. *Microorganisms* 12(645):1-15.

Velazquez-Meza ME, Galarde-López M, Cornejo-Juárez P *et al.* (2025). Bacterial communities and resistance and virulence genes in hospital and community wastewater: Metagenomic analysis. *International Journal of Molecular Sciences* 26(2051):1-20.

Maricela Guerrero Suárez
Centro de Investigación sobre Enfermedades Infecciosas
Instituto Nacional de Salud Pública
Centro de Investigación en Biotecnología
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

María Elena Velázquez Meza
Centro de Investigación sobre Enfermedades Infecciosas
Instituto Nacional de Salud Pública
mevelaz@insp.mx

© **Raúl Chiquito**. *Tirando dinero*. Don Esteban tirando dinero en el camino a México.