



Análisis de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: Una revisión bibliográfica

Analysis of wastewater treatment technologies: A bibliographic review

Autores

***Fabiola Maribel Jiménez Tamayo** 

✉ fm.jimenezt@uea.edu.ec

Joana Alexandra Moreno López 

✉ ja.more nol@uea.edu.ec

Mónica Cecibel Encalada Zumba 

✉ mc. encaladaz@uea.edu.ec

Evelyn Alejandra Vargas Peralvo 

✉ ea.vargas p@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, El Puyo,
Ecuador.

*Autor de correspondencia.

Citación sugerida: Jiménez Tamayo, F. M., Moreno López, J. A., Encalada Zumba, M. C. y Vargas Peralvo, E. A. (2024). Análisis de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: Una revisión bibliográfica. *La Técnica*, 14(2), 103-117. DOI: <https://doi.org/10.33936/latecnica.v14i2.6467>

Recibido: Febrero 29, 2024

Aceptado: Mayo 15, 2024

Publicado: Julio 22, 2024

Resumen

Un manejo eficaz de los efluentes generados por la actividad resulta fundamental para proteger la salud pública y conservar el medio ambiente, especialmente cuando 2.400 millones de personas aún carecen de acceso a servicios sanitarios esenciales. La contaminación de los recursos hídricos en Latinoamérica amenaza la biodiversidad y la salud, haciendo esencial el tratamiento eficiente y sostenible de aguas negras para enfrentar la creciente demanda de agua potable y cumplir con regulaciones ambientales más estrictas. El objetivo fue identificar las principales tecnologías desarrolladas para el tratamiento de aguas residuales. La revisión bibliográfica se realizó mediante la metodología PRISMA, la cual, constó de cuatro etapas: identificación, selección, elegibilidad e inclusión. Se identificaron métodos físicos, mecánicos, biológicos, químicos y avanzados para el tratamiento de aguas residuales. Se enfatizó la efectividad de los métodos biológicos, como lodos activados y humedales construidos, para eliminar la materia orgánica, alcanzando eficiencias superiores al 80% en aguas domésticas y hasta 88% en efluentes industriales. También se destacó la utilidad de procesos físico-químicos en la eliminación de compuestos específicos. Se concluye que la combinación de tecnologías en sistemas híbridos es esencial para un tratamiento integral y se señala la emergencia de membranas, como la nanofiltración y ultrafiltración, para la eliminación selectiva de contaminantes. Además, se subraya la tendencia hacia el uso de procesos sostenibles, que incluyen el aprovechamiento de residuos como materiales de tratamiento, la generación de subproductos útiles y la reducción del consumo energético.

Keywords: eficiencia; innovación; saneamiento; sustentabilidad.

Abstract

Effective management of effluents generated by the activity is essential to protect public health and conserve the environment, especially when 2,4 billion people still lack access to essential health services. Pollution of water resources in Latin America threatens biodiversity and health, making efficient and sustainable wastewater treatment essential to meet the growing demand for drinking water and comply with stricter environmental regulations. The objective was to identify the main technologies developed for wastewater treatment. The literature review was carried out using the PRISMA methodology, which consists of four stages: identification, selection, eligibility and inclusion. Physical, mechanical, biological, chemical and advanced methods for wastewater treatment were identified. The effectiveness of biological methods, such as activated sludge and constructed wetlands, is emphasized to eliminate organic matter, reaching efficiencies greater than 80% in domestic waters and up to 88% in industrial effluents. The usefulness of physical-chemical processes in the elimination of specific compounds was also highlighted. It is concluded that the combination of technologies in hybrid systems is essential for a comprehensive treatment and the emergence of membranes, such as nanofiltration and ultrafiltration, for the selective elimination of contaminants is noted. Furthermore, the trend towards the use of sustainable processes is highlighted, which includes the use of waste as treatment materials, the generation of useful by-products and the reduction of energy consumption.

Palabras clave: efficiency; innovation; sanitation; sustainability.



Introducción

El progreso en la salud pública y el saneamiento a nivel global depende en gran medida de buenas prácticas de higiene, la disponibilidad de instalaciones sanitarias y un manejo confiable de las aguas residuales (AR; Peña, 2016). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que 2.400 millones de personas, alrededor de un tercio de la población mundial no tienen acceso a ningún tipo de instalación sanitaria (OMS, 2023). Esta falta de acceso afecta de manera desproporcionada a las comunidades rurales y a los países en desarrollo. Según Wolf et al. (2023) el acceso inadecuado al agua potable, saneamiento e higiene es responsable de casi el 10% de la carga mundial de morbilidad. Además, mencionó que la diarrea es la segunda causa principal de muerte en niños menores de 5 años en todo el mundo. Al mismo tiempo, la falta de saneamiento también facilitó la transmisión de enfermedades como el cólera, la disentería, la hepatitis A y la poliomielitis (Rodríguez et al., 2016).

Latinoamérica enfrenta un creciente desafío ambiental debido a la gestión inadecuada de las AR. A medida que la población de la región aumenta la cantidad de aguas servidas generadas por actividades domésticas, industriales y agrícolas también se incrementa. Estos efluentes se vierten directamente en el ambiente sin recibir el tratamiento adecuado (Rodríguez-Valencia et al., 2022). Esta práctica no solo amenaza la salud pública, al exponer a las comunidades a patógenos y sustancias tóxicas, sino que también pone en peligro la inmensa biodiversidad de la región. América del Sur es el hogar de aproximadamente un tercio de las fuentes de agua dulce del mundo depende directamente de los recursos hídricos, ve cómo sus ecosistemas acuáticos se ven afectados debido a los efluentes generados por la actividad humana (Sáez et al., 2022). Además, la contaminación del agua complica el uso en actividades esenciales como la agricultura, la industria y el consumo humano, lo que podría tener repercusiones económicas y sociales a largo plazo para los países de la región (Velázquez-Chávez et al., 2022).

El tratamiento de AR ha cobrado una importancia crítica en el contexto actual, donde la creciente demanda de agua potable y las regulaciones ambientales más rigurosas son más controladas. Esta situación se ve exacerbada por la rápida industrialización y el crecimiento demográfico, factores que han llevado a una disminución notable en la disponibilidad de recursos hídricos vitales (Díaz-Cuenca et al., 2012). En una era marcada por una creciente preocupación sobre las repercusiones de las estrategias de la gestión ambiental y la urgencia de abordar problemas de saneamiento, enfermedades y pobreza, se hace imperativo desarrollar tecnologías de tratamiento de AR que sean no solo eficientes, sino también respetuosas con el ambiente (Muga et al.,

2008). La adopción y promoción de estas tecnologías sostenibles no solo garantizarán un suministro de recursos hídricos más limpios y seguros, sino que también sentarán las bases para un futuro más sostenible y ecológicamente responsable (Lee et al., 2022).

A nivel internacional específicamente en Japón autores como Semaha et al. (2023) han desarrollado una transición en el tratamiento biológico de AR, pasando del proceso de lodo activado convencional (CAS) a sistemas de lodo granular aeróbico bacteriano y/o algal-bacteriano (AGS). Estos sistemas avanzados ofrecieron una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes y permiten la recuperación de recursos, alineándose con el concepto de economía circular. En cambio, Ewing et al. (2014) realizaron estudios para aprovechar los gradientes redox en lagunas facultativas (Pullman, EE. UU) utilizando una celda de combustible microbiana de laguna para mejorar autónomamente la entrega de oxígeno a la laguna a través de la aireación y la mezcla operando una bomba de aire. Se buscó demostrar el “lagoon microbial fuel cells (LMFC)” como una fuente alternativa de energía para sistemas de tratamiento de AR autónomos. Por último, Rojas-Morales et al. (2016) analizaron los efluentes generados en el proceso de matanza de aves. Este proceso involucró el uso de grandes cantidades de agua en actividades como escaldado, lavado, enfriamiento y limpieza, lo que resultó en la generación de AR contaminadas. El enfoque del estudio fue investigar el uso de carbones activados como adsorbentes para eliminar estos contaminantes.

En Ecuador autores como, Peña et al. (2018) trataron las AR de la ciudad de Yaguachi mediante uso de cuatro lagunas facultativas y ocho lagunas de maduración. Con este sistema, se espera una reducción de la carga contaminante del 82% para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y del 99,99% para los coliformes. Este método ha sido popular debido a su sencillez, bajo costo inicial y de operación, y la mínima capacitación requerida para el personal encargado de su funcionamiento. Por otro lado, Sánchez et al. (2018) realizaron estudios en la quebrada de “Chasinato” en el cantón Ambato para determinar la eficiencia de un sistema de tratamiento de AR de flujo subsuperficial con macrófitas para la remoción de coliformes. La presencia de este microorganismo fue un indicador de contaminación fecal en el agua. Mientras, Marín et al. (2015) propusieron una solución para las AR generadas en la industria procesadora de pescado en Manta, mencionó el uso de un tratamiento anaeróbico como una solución viable, ya que utiliza microorganismos para oxidar la materia orgánica presente en los efluentes. Una de las ventajas de este método es que produce biogás, que puede ser utilizado como fuente de energía, y genera una menor cantidad de lodos en comparación con otros métodos de tratamiento.

Atendiendo las premisas anteriores el objetivo del presente trabajo fue identificar las principales tecnologías desarrolladas para el tratamiento de AR.

Materiales y métodos

La metodología de la investigación bibliográfica se estructuró en dos etapas clave, apoyada en los estándares PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) expuesto por Page et al. (2021). Inicialmente, se efectuó una búsqueda sistemática en bases de datos académicos, utilizando una selección estratégica de términos claves. Además, se usó operadores booleanos como “AND” para interceptar conceptos, “OR” para ampliar la búsqueda incluyendo sinónimos o temas relacionados, y “NOT” para excluir términos no deseados sobre métodos de tratamiento de AR, eficiencia de remoción de contaminantes y sostenibilidad de los procesos. Esta fase se orientó a identificar literatura que abordó de manera significativa tratamientos de AR. Posteriormente, se aplicó un criterio de selección estricto, descartando aquellos estudios que no cumplieron con los requisitos de relevancia o calidad. Este procedimiento garantizó una revisión bibliográfica exhaustiva y meticulosa, enfocada en consolidar una base de conocimiento robusta para el estudio en cuestión.

Recuperación de la información

La metodología PRISMA para este análisis se inició con una fase de identificación utilizando repositorios de investigación clave como ScienceDirect, SciELO, MDPI, y añadiendo Google Académico para una cobertura más amplia. Se diseñó una estrategia de búsqueda con términos precisamente seleccionados que abarcaron aspectos cruciales del tratamiento de AR, como “tratamiento de aguas”, “purificación” y “sistemas de depuración”, aplicando una lógica de búsqueda refinada para abordar el espectro completo de la investigación actual en el campo.

La fase de selección, siguiendo la metodología PRISMA, se efectuó después de reunir inicialmente los estudios en octubre de 2023, resultando en 263 documentos preliminares (figura 1). Se aplicaron criterios de exclusión para eliminar trabajos sin una autoría definida y aquellos no directamente relacionados con el tratamiento de AR. Los criterios de inclusión se basaron en la relevancia directa al tema y la cobertura de publicaciones desde 2007 hasta 2023. Este proceso meticoloso redujo la selección a 192 artículos, asegurando una base de datos concentrada y pertinente para el análisis subsiguiente.

En la fase de evaluación de elegibilidad del proceso PRISMA, se procedió a un escrutinio detallado de los 192 documentos filtrados, enfocándose en su pertinencia para el ámbito del tratamiento de AR. Este análisis implicó una revisión profunda de los resúmenes y títulos, centrándose en criterios como la innovación en las técnicas de tratamiento, su viabilidad ambiental y su eficacia. Se descartaron los duplicados y aquellos estudios que divergían de

los objetivos principales del estudio, culminando en la selección de 93 trabajos que cumplieran con los estándares de actualidad, relevancia y calidad para la investigación.

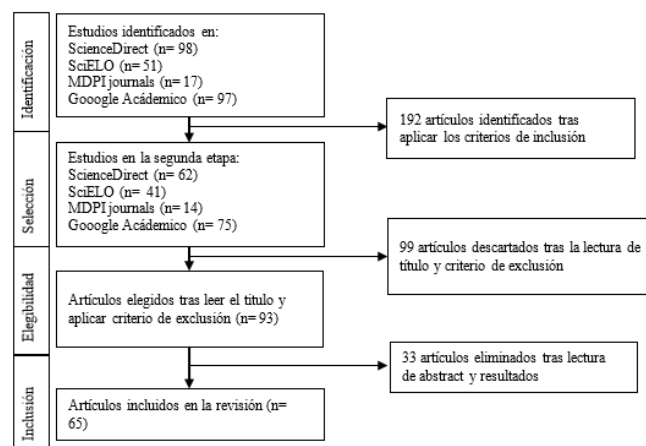


Figura 1. Metodología PRISMA aplicada al estudio.

En la última etapa de la metodología PRISMA aplicada al estudio de tratamientos de AR, se efectuó una síntesis y análisis detallados de los 65 artículos finales. Este proceso implicó un examen minucioso de cada documento, identificando tendencias clave, patrones y avances en el campo. A través de este análisis, se obtuvo una comprensión profunda y actualizada del tratamiento de AR, resaltando tanto el estado del arte como las direcciones futuras para la investigación. Esta fase aportó un valor considerable al cuerpo de conocimiento en este ámbito, iluminando aspectos críticos y potenciales de las tecnologías involucradas.

Resultados y discusión

Análisis de los artículos seleccionados

La evolución de las publicaciones sobre el tratamiento de AR a lo largo de los años reflejó un campo de estudio que ha capturado un interés fluctuante pero progresivo de la comunidad científica. El año 2016 se distinguió como un punto culminante con un total de nueve artículos. Este alto índice fue seguido por una destacada contribución de siete artículos en 2018, sugiriendo una continuidad en el interés y la investigación. Aunque algunos años intermedios, como 2017 y 2020, vieron una disminución en la producción con solo dos artículos, otros años mostraron una presencia más constante de estudios, como en 2012 y 2015, con cuatro artículos cada uno. Recientemente, el año 2023 ha igualado al año 2016 con otros nueve artículos, evidenciando un resurgimiento y una dedicación sostenida hacia la investigación en la materia. Los años 2021 y 2022 también reflejaron una atención continua con cuatro y cinco artículos, respectivamente. Este patrón subrayó la importancia y el interés constante en la mejora de las prácticas de tratamiento de AR, señalando un área de investigación activa y en expansión.

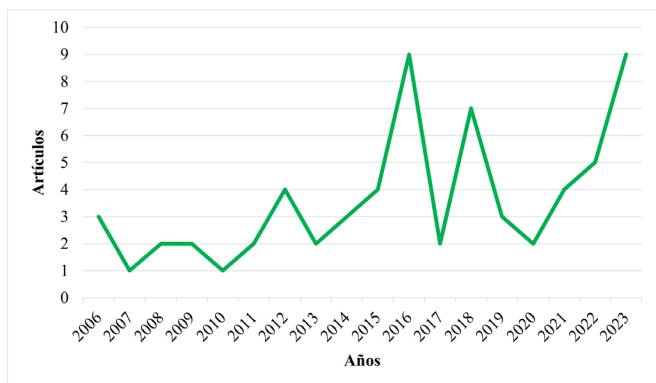


Figura 2. Comportamiento en el tiempo de los artículos seleccionados.

Métodos de tratamiento de aguas residuales

Se refiere al conjunto de acciones dirigidas a tratar las aguas contaminadas, las cuales pudieron originarse en entornos residenciales o industriales como un subproducto. El proceso de tratamiento englobó una serie de procedimientos y mecanismos diseñados para purificar el agua que ha sido contaminada debido a actividades químicas o industriales (Morató et al., 2006). El objetivo principal de los tratamientos fue recuperar y reutilizar el agua, ya sea reintroduciéndola en el ambiente o canalizándola hacia sistemas de alcantarillado sanitario. Es fundamental realizar una evaluación y análisis exhaustivo del agua a tratar antes de iniciar el proceso de pretratamiento, con el propósito de determinar las estrategias de tratamiento específicas requeridas (UNESCO, 2018). La clasificación de los métodos de tratamientos de AR se categorización según su naturaleza y la tecnología (figura 3).

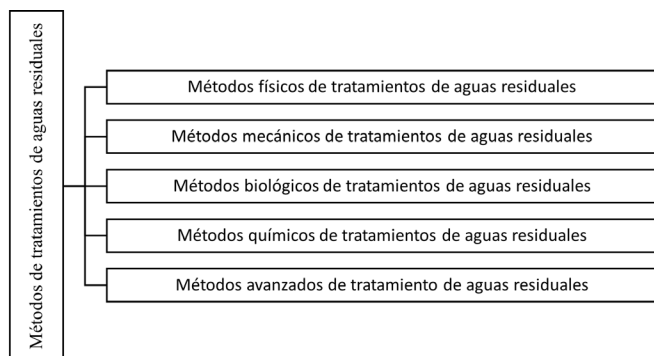


Figura 3. Tipos de tratamientos de AR.

Métodos físicos de tratamiento de aguas residuales

Sedimentación

Es el proceso físico por el cual partículas en suspensión con una densidad superior a la del fluido que las contiene, se depositan por efecto de la gravedad. Este proceso depende de las propiedades de las partículas como tamaño, forma y densidad, así como de las características del fluido como viscosidad y densidad. La sedimentación se utilizó comúnmente para el tratamiento de AR industriales y municipales, con el fin de remover los sólidos sedimentables antes de tratamientos biológicos posteriores. Se llevó a cabo en tanques o clarificadores donde se redujo la velocidad del flujo para permitir la decantación de las partículas por diferencia de densidades entre el fluido y las partículas. El material sedimentado se acumuló en el fondo y fue retirado periódicamente como lodo.

En la tabla 1, Ghanem et al. (2010) estudiaron experimentalmente la velocidad de sedimentación de flóculos de coagulantes químicos, lastrados con diferentes tamaños de micro-arenas mediante pruebas en columna. Mientras Solís et al. (2013) propusieron y evaluaron la sedimentación por 24 horas como pretratamiento de bajo costo para disminuir demanda química de oxígeno (DQO) y color en efluentes textiles de lavanderías. En cambio, Oliva et al. (2008) desarrollaron un sistema óptico para medir velocidad de sedimentación de lodos y comparar con el método de probeta graduada. Finalmente, Arguedas-Zumbado et al. (2016) analizaron un sedimentador industrial, diagnosticaron su bajo rendimiento y propusieron una remodelación para cumplir la normativa de vertidos.

Tabla 1. Estudios de AR con el método de sedimentación.

Residuo por sedimentar	Lugar de estudio	Parámetros de sedimentación	Autor
Flóculos lastrados con microarenas	Venezuela	Velocidad de sedimentación en función de la dosis y el tamaño de grano del agente lastrante. Rangos de velocidad de 145 a 225 m·h ⁻¹	(Ghanem et al., 2010)
Lodos de AR textiles	México	Sedimentación por 24 h como pretratamiento. Remoción de DQO de 35 a 67%. Remoción de color visible. Fitotoxicidad del agua pretratada.	(Solís et al., 2013)
Lodos de AR	Yucatán, México	Velocidad de sedimentación medida con sistema óptico y probeta graduada. Sedimentación zonal de lodos. Lámina de lodo sedimentada.	(Oliva et al., 2008)
Lodos de agua residual industrial	Costa Rica	Concentración de sólidos suspendidos totales (SST) a la entrada y salida del sedimentador. Tiempo de retención. Rendimiento de remoción de SST del sistema.	(Arguedas-Zumbado et al., 2016)

En el estudio de Ghanem et al. (2010) se observó que la velocidad de sedimentación aumentó con la dosis de agente lastrante, mostrando una relación lineal, pero sin una tendencia clara con respecto al tamaño de la microarena. Por otro lado, Oliva et al. (2008) demostraron que su sistema óptico para medir la velocidad de sedimentación ofreció mayor precisión en comparación con los métodos convencionales. Estos hallazgos resaltaron la relevancia de las técnicas avanzadas en la medición y control de procesos de sedimentación, indicando un progreso significativo hacia métodos más eficientes y precisos en el tratamiento de AR.

En el estudio de Arguedas-Zumbado et al. (2016) se observaron mejoras significativas en la concentración de sólidos suspendidos totales tras la remodelación del sedimentador, con una reducción de 296 a 40 mg·L⁻¹, situándose por debajo del límite permitido de 50 mg·L⁻¹. Por otro lado, Solís et al. (2013) reportaron una eficiente reducción de DQO en los efluentes textiles, alcanzando hasta un 70% en el proceso de sedimentación. Estos datos específicos demostraron la eficacia de las mejoras en los procesos de sedimentación y el impacto positivo en la calidad del agua tratada.

Aireación

Es un proceso de lodos activados que consiste en bombear aire a un tanque, lo que promueve el crecimiento microbiano en las AR. Los microbios se alimentan de la materia orgánica y forman bandadas que pueden asentarse fácilmente. Después de sedimentarse en un tanque de sedimentación separado, las bacterias que forman los “lodos activados” se recirculan continuamente de regreso al tanque de aireación para aumentar la velocidad de descomposición (figura 4). Los diseños más comunes utilizaron reactores de tanque agitado convencionales, de aireación por etapas y de flujo continuo (Ahmmed et al., 2016). En el uso industrial, el método de aireación más común fue la aireación por caída de agua, mediante el uso de boquillas pulverizadoras. También se encontró el método de aireación por difusión de aire, en el que el aire se difundió en un recipiente receptor que contuvo agua que fluyó a contracorriente (Teixeira Correia et al., 2013).

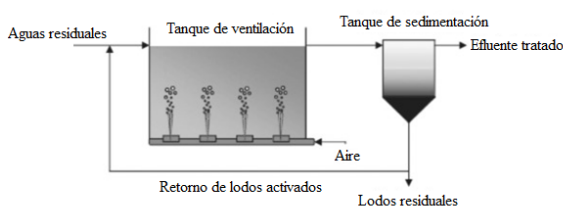


Figura 4. Proceso de lodos activados.

Fuente: Ahmmed y Sreekrishnan (2016).

Autores como Teixeira et al. (2013) y Uggetti et al. (2016) evaluaron la eficiencia de remoción de fósforo en AR, el primero en reactores de lecho fluidizado trifásico y el segundo en humedales construidos de flujo subsuperficial (tabla 2). Ambos

estudios analizaron parámetros como concentración inicial y final, eficiencia de remoción, efecto de factores como tiempo de retención hidráulica y concentración de medio soporte. Teixeira et al. (2013) obtuvieron remociones de fósforo total de 32,7% con tiempos de retención muy cortos (0,19 horas), mientras que Uggetti et al. (2016) alcanzaron hasta 38,4% de remoción de fósforo reactivo con tiempos mayores (3 horas). Si bien los procesos difirieron, los resultados mostraron el potencial de procesos biológicos para la remoción de fósforo si se operó bajo condiciones controladas.

Tabla 2. Estudios respecto a AR usando el método de aireación.

Residuo	Lugar de estudio	Parámetros de estudio	Autor
Fósforo	Brasil	Eficiencia de remoción de fósforo reactivo y fósforo total en reactores aerobios de lecho fluidizado trifásico	(Teixeira et al., 2013)
Fósforo	España	Eficiencia de remoción de fósforo reactivo mediante aireación intermitente en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal	(Uggetti et al., 2016)

Métodos mecánicos de tratamiento de aguas residuales

Las membranas cerámicas presentaron grandes ventajas en el campo de la separación. Su función de separación se basa en la teoría del “cribado”. Para sustancias permeables con diferentes permeabilidades, la diferencia de presión se utilizó como fuerza impulsora para permitir que las sustancias moleculares pequeñas pasaran e interceptaran sustancias moleculares grandes para lograr la separación (Zhang et al., 2023). Estas membranas están elaboradas de materiales inorgánicos como alúmina, carburo de silicio, óxido de titanio y zeolitas, que les confieren una serie de propiedades deseables para el tratamiento de AR, como alta estabilidad química, resistencia a altas temperaturas, alta resistencia mecánica, y una larga vida útil. Además, fueron capaces de resistir ambientes químicos agresivos y condiciones de operación severas que las membranas poliméricas no pudieron soportar (Lin et al., 2018).

En cuanto a la clasificación de las membranas cerámicas según Qiu et al. (2018) se clasificaron en función del tamaño de poro (tabla 3). Estas clasificaciones se basaron en el tamaño de los poros de las membranas, lo que determinó su capacidad para separar diferentes tipos de contaminantes. Por ejemplo, las membranas de microfiltración fueron capaces de retener bacterias y partículas grandes, mientras que las de ósmosis inversa pueden retener iones y moléculas pequeñas.

Tabla 3. Clasificación de las membranas según el tamaño del poro.

Tipo de membrana	Tamaño de poros
Microfiltración (MF)	0,1 a 10 micrómetros
Ultrafiltración (UF)	0,01 a 0,1 micrómetros
Nanofiltración (NF)	1 a 10 nanómetros
Ósmosis inversa (RO)	0,1 a 1 nanómetros

Fuente: Qiu et al. (2018).

En la tabla 4 los tres estudios evaluaron el uso de membranas para el tratamiento de AR de diferentes industrias. Ayala et al. (2006) alcanzaron una eficiencia superior al 97% en la remoción del colorante amarillo ácido 23 mediante nanofiltración, destacando la eficacia de esta técnica para compuestos específicos en la industria textil. En contraste, Salazar et al. (2009) demostraron que el biorreactor de membrana superó al sistema de lodos activados, con un rango de remoción de DQO entre 82-92% y un 95% en sólidos suspendidos, resaltando su mayor eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos y partículas. Por su parte, Escobar-Jiménez et al. (2012) obtuvieron los mejores resultados en la recuperación de agua para la industria de cereales con membranas de 15 y 13 kDa, siendo la de 13 kDa más eficiente en términos de flujo de agua.

Tabla 4. Estudios de AR usando el método de membrana cerámica.

Tipo de agua residual	Residuo por eliminar	País	Parámetros de operación y tamaño de membrana	Autor
Textil	Colorante amarillo ácido 23	Colombia	Membrana de nanofiltración NF90SR de FILMETC, diámetro de 2,5", longitud de 40", configuración en espiral. Presión transmembranal de 200 psig. Relación de caudales de 15% en el permeado. Planta piloto de biorreactor de membrana	(Ayala et al., 2006)
Textil	Colorantes azul brillante y tartrazina	España	con membranas de ultrafiltración UFS3 y UFS2 y microfiltración MFS de polysulfona. Modo de filtración y modo de lavado.	(Salazar Gámez et al., 2009)
Cereales	Colorantes azul brillante y tartrazina, DQO y conductividad	México	Membranas cerámicas de 150 y 15 kDa, y membranas poliméricas de fibra hueca de 50 y 13 kDa. Presión transmembranal de 3-5 bar. Velocidad de flujo de 2,5-3 m·s ⁻¹ para membranas poliméricas y 3 m·s ⁻¹ para membranas cerámicas.	(Escobar-Jiménez et al., 2012)

La eficacia de la nanofiltración para capturar moléculas específicas, como en el estudio de Ayala et al. (2006) sugirió su utilidad en industrias con desechos químicos específicos,

como farmacéutica o química fina, donde la precisión en la eliminación de contaminantes fue crucial. La capacidad del biorreactor de Salazar et al. (2009) para manejar altas cargas orgánicas lo posicionó como una solución prometedora para industrias alimentarias o agrícolas, donde los efluentes solían ser ricos en materia orgánica. En el caso de Escobar-Jiménez et al. (2012) la búsqueda de un equilibrio entre eficiencia y calidad del agua reflejó la necesidad de soluciones versátiles, como en la gestión de efluentes municipales o en sectores donde se reutilizó agua, como en la agricultura o en la industria de bebidas. Estas tendencias indicaron una evolución hacia tecnologías especializadas adaptadas a necesidades sectoriales específicas.

Método biológico de tratamiento de aguas residuales

Este método utilizó microorganismos para descomponer la materia orgánica contaminante, reduciendo así la carga de contaminantes de manera efectiva antes de que el agua fuera liberada al ambiente o reutilizada. En estos sistemas, que podrían ser aerobios, anaerobios o anóxicos, los microorganismos como bacterias, hongos y protozoos metabolizaron los contaminantes y los transformaron en masa celular, agua, dióxido de carbono y otros gases (Menéndez et al., 2018). Los procesos aerobios, como el de lodos activados, fueron muy comunes y flexibles, pudiendo adaptarse a distintos tipos de AR y podrían ser eficientes en la eliminación de materia orgánica y nutrientes. Aun ante la diversidad de diseños y operaciones, todos comparten factores críticos como la biomasa, la carga orgánica, el tiempo de retención y las condiciones ambientales que deben ser óptimas para el tratamiento efectivo. Además, se debe prestar atención al manejo del lodo generado para evitar impactos ambientales adversos (Vargas et al., 2020).

En la tabla 5 los estudios analizados se enfocaron en el tratamiento biológico de AR domésticas y de embotelladoras utilizando reactores con microorganismos aerobios y anaerobios. Torres et al. (2011) evaluaron diferentes configuraciones de lodos activados y biodiscos para tratar aguas residuales domésticas en Colombia, reportando eficiencias de remoción de DQO mayores al 80%. Linares et al. (2021) también obtuvieron altas eficiencias de remoción de DQO (88,73%) en agua residual de embotelladora en Venezuela, utilizando reactores aerobios por carga secuencial. Por su parte, Duque-Sarango et al. (2018) trataron agua residual urbana en Ecuador con contactores biológicos rotatorios aerobios en cuatro etapas, alcanzando una eficiencia de 86% en DQO. Finalmente, Sánchez-Balseca et al. (2019) probaron un reactor anaerobio de biopelícula para desnitrificación de agua residual en Ecuador, reportando una eficiencia de 97,58% en nitratos. Los estudios demostraron la efectividad de procesos biológicos para el tratamiento de contaminantes en AR, ya sea utilizando

reactores aerobios para remover materia orgánica o anaerobios para desnitrificación.

Tabla 5. Estudios de AR usando métodos biológicos.

Tipo de agua residual	Contaminante por eliminar	País	Parámetros de tratamiento	de Microorganismo y condición	Autor
Agua residual doméstica	Materia orgánica	Colombia	Lodos activados: convencional (TRH 4-8 h), extendido (TRH 30-8 h), estabilización por contacto (TRH total 13.1-2.5 h). Biodiscos (TRH 22-0.8 h)	Bacterias heterótrofas aerobias	(Torres et al., 2011)
			Reactores por carga secuencial (SBR) operados en condiciones aerobias y anaerobias	Bacterias heterótrofas y autótrofas	(Linares et al., 2021)
			Contactores biológicos rotatorios (CBR) de cuatro etapas	Bacterias heterótrofas aerobias	(Duque-Sarango et al., 2018)
			Reactor de biopelícula	Bacterias desnitrificantes anaerobias	(Sánchez-Balseca et al., 2019)
Agua residual de embotelladora	DQO, Coliformes	Venezuela			
Agua residual urbana	Materia orgánica	Ecuador			
Agua residual doméstica	Nitratos	Ecuador			

En cuanto a los parámetros de tratamiento, Torres et al. (2011) y Duque-Sarango et al. (2018) utilizaron reactores aerobios de biomasa en suspensión (lodos activados) y biopelículas (biodiscos) respectivamente, para remover materia orgánica, mientras que Linares et al. (2021) probaron tanto condiciones aerobias como anaerobias en reactores por carga secuencial para reducir DQO y coliformes. Sánchez-Balseca et al. (2019) fueron los únicos en usar un reactor anaerobio de biopelícula para desnitrificación. En relación a los microorganismos, todos emplearon bacterias heterótrofas aerobias excepto Sánchez-Balseca et al., (2019) que usaron bacterias anaerobias desnitrificantes.

La heterogeneidad de los tratamientos biológicos reflejada en los estudios de la tabla 6 indicaron que la personalización en la eliminación de distintos contaminantes fue clave. Por ejemplo, sistemas aerobios fueron idóneos para DQO en AR con alta carga orgánica, como las industriales, mientras que los procesos anaerobios se mostraron prometedores en la eliminación de nitratos, lo que fue crucial en zonas agrícolas afectadas por la escorrentía rica en fertilizantes. Estos avances sugirieron una tendencia hacia la especialización de los tratamientos biológicos para atender necesidades particulares de descontaminación según el origen del efluente.

Además, los métodos biológicos comprendieron el compostaje a partir de AR, fue así, que analizando la información literaria se encontraron diversos artículos respecto a la temática. Torres et al. (2007) realizaron un estudio experimental con el objetivo de evaluar el efecto de la incorporación de materiales de soporte y enmienda en el compostaje de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de AR Cañaveralejo en Cali, Colombia (tabla 6). Utilizaron residuos de poda y viruta de madera como materiales

de soporte y cachaza y residuos orgánicos como enmienda. En cambio Íñiguez et al. (2006) evaluaron el compostaje de material de descarte y AR de una curtiduría en México en dos etapas: una de 239 días en pilas estáticas y otra de 204 días con volteos y riego con agua residual. Mientras Vicencio-De La Rosa et al. (2011) produjeron composta y vermicomposta a partir de lodos de una planta de tratamiento de AR de un rastro en México.

Tabla 6. Estudios de AR usando el método de compostaje.

Tipo de agua residual	País de estudio	Parámetros de operación	Características del compostaje obtenido	Autor
Biosólidos de PTAR	Colombia	Mezcla de 72% biosólido con materiales de soporte y enmienda.	Mejora en características físicas y químicas del compost.	(Torres et al., 2007)
Residuos sólidos y líquidos de curtiduría	México	239 días en pilas estáticas sin volteo. 204 días con volteos semanales y riego con agua residual.	Temperatura máxima de 65 °C. Alto contenido de sales en el producto final.	(Íñiguez et al., 2006)
Lodos residuales de rastro	México	150 días de composteo en pilas con volteos. 210 días de vermicomposteo.	10.9 toneladas de composta. 12.5 toneladas de vermicomposta. Mayor calidad nutricional de la composta.	(Vicencio-De La Rosa et al., 2011)

Torres et al. (2007) encontraron que la adición de biosólido, residuos de poda y cachaza mejoró las características físicas y químicas del compost, acelerando la fase termófila, manteniendo mayores temperaturas y mejorando la relación C/N. La mejor combinación fue 72% biosólido, 10% residuos de poda y 18% cachaza (tabla 6). Mientras que Íñiguez et al. (2006) utilizaron un periodo prolongado de pilas estáticas seguido de volteos, y Vicencio-De La Rosa et al. (2011) emplearon volteos desde el inicio. Estas diferencias influyeron en los resultados; por ejemplo, Íñiguez et al. (2006) obtuvieron compost con alto contenido de sales debido al riego con agua residual durante el proceso. En cuanto a características del compostaje, Torres et al. (2007) y Vicencio-De La Rosa et al. (2011) lograron mejoras en propiedades físicas y químicas del compost, mientras que el producto de Íñiguez et al. (2006) tuvo limitaciones por su composición.

Estos métodos mostraron potencial para la mejora de la calidad del suelo y la agricultura sostenible, al tiempo que enfrentaron retos como el alto contenido salino, que requirió soluciones innovadoras para evitar impactos negativos en el suelo. La adaptación de estos procesos a los diferentes tipos de residuos y condiciones ambientales será crucial para su éxito y sostenibilidad a largo plazo.

Métodos químicos de tratamiento de aguas residuales

Neutralización

La neutralización de AR ácidas es un proceso químico que se utiliza para elevar el pH de efluentes industriales ácidos a niveles neutros, generalmente entre 6 y 9. Esto se logra mediante la adición de sustancias alcalinas que neutralizan la acidez (Nazuwatussya et al., 2023). Las AR ácidas se generan comúnmente en procesos industriales como la minería, refinación de metales, producción de acero, entre otros. Estas aguas suelen contener ácidos como el sulfúrico o clorhídrico, así como metales pesados disueltos. Si se vierten directamente, pueden dañar infraestructura, suelos y ecosistemas acuáticos (Arbona et al., 2023).

Las sustancias neutralizantes más utilizadas son la cal viva (CaO), cal hidratada (Ca(OH)_2), carbonato de sodio (Na_2CO_3), hidróxido de sodio (NaOH) y carbonato de calcio (CaCO_3). Al añadirlas, reaccionan con los ácidos del agua residual generando sales y agua, incrementando el pH. El proceso se realiza en tanques de neutralización con agitación (Lochyński et al., 2021).

Jarnerud et al., (2021) presentaron un estudio experimental sobre el uso de residuos de las industrias de pasta y papel que contenían CaO , como cenizas volantes y lodo calcinado, para neutralizar AR ácidas de procesos de decapado en la producción de acero (tabla 7). En cambio, Forsido et al. (2019) reportaron un estudio sobre el uso de escoria de horno de arco eléctrico, en combinación con cal, para neutralizar efluentes ácidos y remover metales de una industria siderúrgica. Finalmente Zvimba et al. (2017) presentaron un estudio experimental y de modelado sobre el uso de escoria de horno de oxígeno básico para la neutralización pasiva de drenaje ácido de minas.

Tabla 7. Estudios de AR usando el método de neutralización.

Tipo de agua residual	País de estudio	Sustancias neutralizantes	Parámetros de operación	Autor
AR ácidas de decapado en producción de acero	Suecia	Cenizas volantes y lodo calcinado de industrias de pasta y papel	Adición de 9,5-52 g·L ⁻¹ de cenizas o 4-19 g·L ⁻¹ de lodo; agitación a 500 RPM; tiempo de neutralización de 30 min	(Jarnerud et al., 2021)
Efluentes ácidos de industria siderúrgica	Sudáfrica	Escoria de horno de arco eléctrico y cal	Adición de 54 g·L ⁻¹ de escoria y 0,7 g·L ⁻¹ de cal; agitación a 380 RPM; tiempo de neutralización de 1-96 horas	(Forsido et al., 2019)
Drenaje ácido de minas	Sudáfrica	Escoria de horno de oxígeno básico	Sistema de neutralización pasiva; tiempo de neutralización de 1-90 días	(Zvimba et al., 2017)

Los parámetros de operación variaron desde procesos activos de agitación y adición directa de reactivos, hasta sistemas pasivos con tiempos de retención más prolongados. Sin embargo, en todos los casos se logró una neutralización exitosa, alcanzando el rango de pH deseado entre 6-9 y removiendo metales por precipitación. En términos de resultados, si bien las cinéticas

de neutralización dependieron del proceso específico, todos los estudios señalaron porcentajes de remoción de acidez y metales superiores al 90%. Incluso el proceso pasivo de Zvimba et al. (2017) alcanzó estos niveles en periodos relativamente cortos (10 días).

La investigación de la tabla 7 demostró un crecimiento en el uso de residuos industriales para el tratamiento de AR, marcando un paso hacia la sostenibilidad ambiental. Estos estudios mostraron cómo los subproductos, como las cenizas y la escoria, pueden ser reciclados eficientemente para corregir la acidez del agua, lo que redujo la necesidad de neutralizantes químicos y aprovechó los materiales que de otro modo se desecharían. Este enfoque no solo ofreció soluciones de tratamiento más ecológicas, sino que también impulsó la economía circular, alineándose con los desafíos contemporáneos de la gestión de residuos y la conservación de recursos.

Adsorción

Es una técnica clave en el tratamiento de AR ácidas, este método usa materiales adsorbentes para eliminar contaminantes como metales pesados y compuestos orgánicos. El proceso se fundamenta en la afinidad química y física entre el adsorbente y los contaminantes, siendo su eficacia dependiente de la naturaleza del adsorbente y las condiciones del medio, como el pH. Materiales como carbón activado y zeolitas fueron frecuentemente seleccionados por su capacidad para capturar una gama de contaminantes (Jagadeesh et al., 2023). Además de ser eficiente en la remoción de sustancias tóxicas, la adsorción es valorada por su simplicidad operativa y su potencial para cumplir con estándares ambientales estrictos, lo que la hace una opción atractiva en comparación con métodos convencionales, especialmente como tratamiento terciario para pulir el agua residual antes de su descarga o reutilización (Paccha Rufasto et al., 2023).

Analizando la literatura disponible de la temática de adsorción en AR, autores como Tejada-Tovar et al. (2015) presentó un análisis sobre el uso de materiales biológicos como adsorbentes de metales pesados en tratamiento de AR. Además, describe fundamentos de la adsorción, biomateriales utilizados, sus modificaciones y factores que influyen en la adsorción de iones metálicos (tabla 8). En cambio García-Rojas et al. (2012) analizó la adsorción como tratamiento terciario o de pulimento de AR, presentando conceptos básicos, tipos de adsorción, descripción del proceso experimental y modelación con isothermas de adsorción. Por último, Cascaret-Carmenaty et al. (2014) estudió la adsorción de cromo (VI) por biomasa bacteriana, describiendo la selección de cepas, efecto del pH, modelación cinética y aplicación en una matriz real de agua residual.

Tabla 8. Estudios de AR empleando el método de adsorción.

Tipo de agua residual	País de estudio	Tipo de adsorbente	Parámetros de operación	Autor
AR industriales con metales pesados	Colombia	Cáscara de tamarindo, cáscara de naranja, cáscara de plátano, hojas de maíz, cáscara de mani, quitosano, residuos de tallos de uva	pH, tamaño de partícula, temperatura, concentración de metal	Tejada-Tovar et al. (2015)
AR con metales pesados	México	Biomasa	pH, tiempo de contacto, concentración inicial	(García-Rojas et al., 2012)
Agua residual galvánica con cromo (VI)	Cuba	Biomasa de cepas bacterianas aisladas del residuo galvánico	pH, concentración de biomasa	(Cascaret-Carmenaty et al., 2014)

Tejada-Tovar et al. (2015) presentó un análisis amplio de adsorbentes de origen biológico para aguas industriales, mientras García-Rojas et al. (2012) se enfocaron en fundamentos de la adsorción con biomasa. En cambio Cascaret-Carmenaty et al. (2014) estudiaron un caso específico de biomasa bacteriana para agua residual galvánica con cromo (VI). Estos estudios subrayaron el potencial de la biomasa, desde residuos agrícolas hasta cepas bacterianas especializadas, para eliminar metales pesados y otros compuestos nocivos (tabla 9). En cuanto a condiciones operacionales, los tres estudios coincidieron en la importancia del pH como parámetro clave, pero difirieron en otros factores como concentración de biomasa, tiempo de contacto y temperatura. Se evidenció que la investigación en la adsorción para tratamiento de aguas debe optimizarse según el tipo de contaminante y las características del adsorbente a utilizar.

Precipitación

Se emplearon compuestos químicos en las AR para que cambiaran el estado físico de los sólidos suspendidos o disueltos y luego se separaron mediante sedimentación. Cuantitativamente, la separación de la solución se volvió más completa, dependiendo de la insolubilidad del compuesto formado (Barat et al., 2009). Es así, que la precipitación química, a diferencia de otros métodos químicos de tratamiento de AR, se consideró un proceso de purificación primario o principal ya que permitió obtener agua casi libre de sólidos en suspensión. Además, se ha puesto especial atención en la eliminación del fósforo y otros compuestos orgánicos (Hualpa-Cutipa et al., 2022).

Respecto a la temática Zhang et al. (2020) analizaron la preparación de hidroxycarbonato de magnesio a partir de magnesita de bajo grado, y su uso como agente precipitante de metales pesados (VO^{2+} , Cr^{3+} y Fe^{3+}) en AR industriales en el estudio se logró reducir las concentraciones de estos metales por debajo de los límites de descarga en China (tabla 9). En cambio Barat et al. (2009) presentó un estudio de caso sobre los

problemas de precipitación en la planta de tratamiento de AR Murcia Este en España; se realizó un análisis de balance de masas para identificar las fuentes de precipitación, encontrando que ocurre principalmente en los digestores anaeróbicos. Mientras Córdova et al. (2014) compararon la precipitación química de cromo en efluentes de procesos de curtido de cuero tradicionales y alternativos; los procesos alternativos requirieron menor dosis de hidróxido de sodio debido al uso de agentes complejantes de cromo.

Tabla 9. Estudios de AR empleando el método de precipitación.

Tipo de agua residual	Compuesto precipitante	Sustancia precipitada	Parámetros de operación	Autor
AR de curtiembre	Hidróxido de magnesio carbonatado sintético	VO^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+}	pH 7,1, 0,3 g·L ⁻¹ de $\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_x$, agitación durante 20 min a temperatura ambiente	(Zhang & Duan 2020)
AR urbanas	Hidróxido de sodio	Estruvita, hidroxiapatita	pH 7,5 en digestor anaeróbico, aumento de concentración de NH_4^+ de 139 a 922 mg·L ⁻¹ , digestión anaerobia con TRS de 38% y carga orgánica de 1,9 gD-QO/L·día ⁻¹	(Barat et al., 2009)
AR de curtiembre tradicional y alternativa	Hidróxido de sodio	Cr^{3+}	pH óptimo entre 7,4-10 mediante adición de 0,5-5,5 g·L ⁻¹ de NaOH, agitación a temperatura ambiente	(Córdova Bravo et al., 2014)

Los estudios analizados obtuvieron altas eficiencias de remoción de las sustancias objetivo ajustando el pH entre 7,1 y 10, mediante la adición de los compuestos precipitantes en rangos de 0,3 a 5,5 g·L⁻¹, durante tiempos de reacción de 20 min a temperatura ambiente, en procesos por agitación. Se requiere mayor investigación para determinar la cinética de las reacciones y evaluar la aplicabilidad de estos métodos a mayor escala. Estos estudios enfatizaron la relevancia de ajustar el pH y la dosificación de precipitantes para alcanzar altas eficiencias de remoción, y sugirieron que investigaciones futuras deberían profundizar en la cinética de reacción y la escalabilidad de estas soluciones.

Desinfección

Es un método ampliamente empleado, Casierra-Martínez et al. (2016) evaluaron la combinación de un proceso fotocatalítico solar con peróxido de hidrógeno y un sistema de humedales construidos para la desinfección de AR domésticas y su reúso en riego (tabla 10). Por otro lado, Zurita et al. (2015) compararon la eficiencia de tres sistemas piloto de humedales construidos híbridos de dos etapas para la remoción de coliformes totales y *Escherichia coli* de AR domésticas. En cambio, Noriega-Treviño et al. (2012) presentaron un estudio comparativo de la efectividad antibacteriana de nanopartículas metálicas en aguas con diferente composición química, como una alternativa para la desinfección de aguas, y propusieron el uso de membranas compuestas con nanopartículas para osmosis inversa y nanofiltración.

Tabla 10. Estudios de AR empleando el método de desinfección.

Tipo de agua residual	País de estudio	Compuesto desinfectante	Microorganismo	Parámetros de operación	Autor
Doméstica	Colombia	UV/H ₂ O ₂ solar + humedales construidos	Coliformes totales y fecales	5 h en fotorreactor solar, 3 días en humedal. Dosis H ₂ O ₂ : 3, 30 y 300 mg·L ⁻¹	(Casierra-Martínez et al., 2016)
Doméstica	México	Humedales construidos híbridos	Coliformes totales y <i>E. coli</i>	1 año de operación, 4 meses de estabilización, 8 meses de monitoreo.	(Zurita Martínez et al., 2015)
Sintética	México	Nanopartículas metálicas	<i>E. coli</i> y <i>E. faecalis</i>	CMI y CMB de nanopartículas metálicas. Matrices de agua sintética.	(Noriega-Treviño et al., 2012)

De acuerdo a los estudios revisados, se observó que Zurita et al. (2015) y Casierra-Martínez et al. (2016) utilizaron sistemas de tratamientos biológicos (humedales construidos) para la desinfección de AR domésticas y la remoción de coliformes totales, fecales y *E. coli*. Ambos estudios se realizaron en países de América Latina (Colombia y México), lo cual reflejó la importancia de encontrar métodos de bajo costo para el tratamiento de aguas en esta región. Sin embargo, Casierra-Martínez et al. (2016) complementaron el sistema biológico con una etapa de oxidación avanzada (UV/H₂O₂ solar), logrando altas eficiencias en la desinfección del agua residual. Por otro lado, Noriega-Treviño et al. (2012) evaluaron la aplicación de nanopartículas metálicas, específicamente de plata, como alternativa para la desinfección de agua, probando su efectividad antibacteriana contra *E. coli* y *E. faecalis* en el laboratorio. A diferencia de los otros estudios, este se realizó con agua sintética y midiendo parámetros como la concentración mínima inhibitoria y bactericida. Se encontró que las nanopartículas de plata de menor tamaño presentaron mayor actividad antibacteriana.

En cuanto a los parámetros de operación, los tiempos de retención hidráulica fueron mayores en los sistemas biológicos (días o meses) en comparación con las horas requeridas en el sistema UV/H₂O₂ solar. Además, los estudios enfatizaron la relevancia de ajustar el pH y la dosificación de precipitantes para alcanzar altas eficiencias de remoción, y sugirieron que investigaciones futuras deberían profundizar en la cinética de reacción y la escalabilidad de estas soluciones.

Métodos avanzados de tratamiento de aguas residuales

Debido a los avances tecnológicos, se han descubierto varios métodos únicos de tratamiento de agua. Estos son algunos de los métodos avanzados de tratamiento de AR que se han descubierto.

Tecnología de irradiación ultravioleta

Es un método de desinfección para inactivar microorganismos patógenos. Este proceso no utilizó productos químicos, lo que lo hizo más ecológico comparado con los métodos de desinfección convencionales como la cloración (Beck et al., 2015). La luz UV actúa dañando el ADN o ARN de los microorganismos, impidiendo su reproducción y, por ende, su capacidad de causar enfermedades. Este método es efectivo contra una amplia gama de patógenos, incluyendo bacterias, virus y protozoos (Song et al., 2016). Además, el tratamiento UV es una técnica de rápido accionar y puede ser ajustado para manejar diferentes cargas de contaminación, lo que lo hace adecuado para su integración en sistemas de tratamiento de AR existentes y futuros (Zhang et al., 2019).

Respecto a la irradiación ultravioleta se identificó estudios como por ejemplo; Malato et al. (2016) investigaron la descontaminación y desinfección del agua mediante fotocatalisis solar, utilizando dióxido de titanio (TiO₂) y experimentación en la Plataforma Solar de Almería. La investigación se enfocó en la eficiencia de este proceso para eliminar contaminantes y patógenos del agua (tabla 11). En cambio, González et al. (2023) realizaron la desinfección UV de AR, abordando la reactivación microbiana post-tratamiento. Propusieron estrategias para mejorar la eficiencia de la desinfección, incluyendo la combinación con procesos de oxidación avanzada, con el objetivo de lograr un tratamiento más efectivo y seguro. Finalmente, Zhang et al. (2017) analizaron los efectos de la desinfección ultravioleta (UV) en *E. coli* resistente a antibióticos, proveniente de AR. Se evaluó cómo la desinfección UV afectó los perfiles de resistencia a los antibióticos y los genes de resistencia a los antibióticos (ARGs) de estas bacterias.

Tabla 11. Estudios de AR empleando el método radiación ultravioleta.

Tipo de agua residual	País de estudio	Compuesto desinfectante	Parámetros de operación	Autor
AR	España	TiO ₂ /UV	Concentración de TiO ₂ , intensidad de la luz UV, pH del agua	(Malato et al., 2016)
AR urbanas	Chile	UV	Intensidad de la luz UV, tiempo de contacto	(González et al., 2023)
AR	China	UV	Intensidad de la luz UV, tiempo de contacto, niveles de resistencia a antibióticos	(Zhang et al., 2017)

Los estudios revisados mostraron la luz UV como un agente desinfectante eficaz, donde el trabajo de González et al. (2023) reportaron una reducción de 99,9% en las poblaciones de *E. coli* en AR urbanas con una dosis de UV de 30 mJ·cm⁻².

Comparativamente, el estudio de Zhang et al. (2017) destacaron la necesidad de incrementar la dosis de UV a 60 mJ·cm⁻² para lograr una inactivación comparable en cepas de *E. coli* resistentes a antibióticos, sugiriendo un umbral más alto para patógenos más robustos. Este dato puso de relieve la variabilidad de la eficacia de UV frente a microorganismos con diferentes perfiles de resistencia. Por otro lado, el estudio de Malato et al. (2016) introdujeron la fotocatalisis solar con TiO₂, mostrando una degradación de contaminantes orgánicos de hasta un 80% en pruebas piloto, además de indicar un potencial para la producción de hidrógeno, lo cual no solo tuvo implicaciones en la sostenibilidad del tratamiento de agua sino también en la generación de energía renovable.

Estos resultados apuntaron hacia un futuro donde la desinfección del agua puede ser más sostenible y multifuncional. La tendencia indicó que las tecnologías basadas en UV y fotocatalisis podrían adaptarse para satisfacer necesidades específicas, como la inactivación de patógenos resistentes y la degradación de contaminantes emergentes. Las futuras investigaciones podrían centrarse en la integración de la fotocatalisis con otros métodos de tratamiento para formar sistemas híbridos que puedan abordar una gama más amplia de desafíos en el tratamiento de AR.

Conclusión

Existe una amplia variedad de tecnologías para el tratamiento de AR que van desde métodos convencionales como sedimentación, neutralización y desinfección, hasta tecnologías más avanzadas como membranas, procesos de oxidación avanzada y tratamientos biológicos especializados. Los métodos biológicos como los lodos activados y humedales construidos son muy efectivos para remover materia orgánica, se han reportado eficiencias de remoción de DQO mayores al 80% en aguas domésticas y de hasta 88% en efluentes industriales. Mientras, que los procesos físico-químicos como sedimentación, adsorción y oxidación avanzada son útiles para eliminar compuestos específicos.

Los estudios analizados revelan que no existe una solución única aplicable a todos los casos, sino que se requiere una combinación de tecnologías en sistemas híbridos para lograr un tratamiento integral. Las tecnologías de membrana, en particular la nanofiltración y ultrafiltración, están surgiendo como alternativas prometedoras para la eliminación selectiva de contaminantes específicos. Asimismo, se observa una evolución hacia el uso de procesos sostenibles, ya sea empleando residuos como materiales de tratamiento, generando subproductos aprovechables o minimizando el consumo energético.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés en la presente publicación en ninguna de sus fases.

Referencias bibliográficas

Ahammad, S. Z. and Sreekrishnan, T. R. (2016). *Energy from wastewater treatment*. Chapter 20, Elsevier, p. 523-536. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802830-8.00020-4>

- Arbona Cabrera, M., Cabrera Estrada, I., O'Farril Pie, M. E. y Fabelo Falcón, J. A. (2023). Determinación de la influencia de variables de operación en la neutralización de las aguas residuales textiles con CO₂. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 80(599), 187-192. <https://doi.org/10.55815/417974>
- Arguedas-Zumbado, N., Vetrani-Chavarria, K., Murrell-Blanco, M. y Bermúdez-Hidalgo, L. (2016). Propuesta de remodelación del sistema de sedimentación del quebrador de materiales de la empresa CONCREPAL, Barranca, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 50(1), 53-74. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665070585004>
- Ayala, M. E., Peñuela Mesa, G. y Montoya, J. L. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 38, 53-63. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43003805>
- Barat, R., Bouzas, A., Martí, N., Ferrer, J. and Seco, A. (2009). Precipitation assessment in wastewater treatment plants operated for biological nutrient removal: a case study in Murcia, Spain. *Environ Manage*, 90(2), 850-857. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.02.001>
- Beck, S. E., Wright, H. B., Hargy, T. M., Larason, T. C. and Linden, K. G. (2015). Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems. *Water Research*, 70, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.028>
- Cascaret-Carmenaty, D. A., Calzado-Lamela, O. y Pérez-Silva, R. M. (2014). Determinación de la capacidad de adsorción de cromo (VI) por biomasa bacteriana. *Revista Cubana de Química*, XXVII(3), 215-224. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543739005>
- Casierra-Martínez, H., Casalins-Blanco, J., Vargas-Ramírez, X. y Caselles-Osorio, A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(4), 97-111. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353549828006>
- Córdova Bravo, H. M., Vargas Parker, R., Cesare Coral, M. F., Flores del Pino, L. y Visitación Figueroa, L. (2014). Tratamiento de las aguas residuales del proceso de curtido tradicional y alternativo que utiliza acomplejantes de cromo. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3), 183-191. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371937639005>
- Díaz-Cuenca, E., Alavarado-Granados, A. R. y Camacho-Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes



- y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 14(1), 78-97. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894005>
- Duque-Sarango, P. J., Heras-Naranjo, C., Lojano-Criollo, D. y Vilorio, T. (2018). Modelamiento del tratamiento biológico de aguas residuales; estudio en planta piloto de contactores biológicos rotatorios./Modeling of biological wastewater treatment; study in pilot plant of rotating biological contactors. *CIENCIA UNEMI*, 11(28). <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp88-96p>
- Escobar-Jiménez, J., Muro-Urista, C., Esparza-Soto, M., Gómez-Espinoza, R. M., Díaz-Nava, C., García-Gaitán, B., Ortega-Aguilar, R. E. y Zavala-Arce, R. E. (2012). Recuperación de agua de efluentes de una industria de cereales utilizando membranas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, III(3), 65-82. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531978005>
- Ewing, T., Babauta, J. T., Atci, E., Tang, N., Orellana, J., Heo, D. and Beyenal, H. (2014). Self-powered wastewater treatment for the enhanced operation of a facultative lagoon. *Journal of Power Sources*, 269, 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.114>
- Forsido, T., McCrindle, R., Maree, J. and Mpenyana-Monyatsi, L. (2019). Neutralisation of acid effluent from steel manufacturing industry and removal of metals using an integrated electric arc furnace dust slag/lime process. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1649-z>
- García-Rojas, N., Villanueva-Díaz, P., Campos-Medina, E. y Velázquez-Rodríguez, A. (2012). Análisis de la adsorción como método de pulimento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 14(1), 109-129. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894007>
- Ghanem, A., Paulesu, G., Campos, F. y Rodríguez, P. (2010). Comportamiento de la velocidad de sedimentación en flóculos lastrados con diferentes tamaños de microarenas. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 22(1), 70-79. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427739443010>
- González, Y., Gómez, G., Moeller-Chávez, G. E. and Vidal, G. (2023). UV disinfection systems for wastewater treatment: Emphasis on reactivation of microorganisms. *Sustainability*, 15(14)..
- Hualpa-Cutipa, E., Acosta, R. A. S., Sangay-Tucto, S., Beingolea, X. G. M., Gutierrez, G. T. and Zababburú, I. N. (2022). Recent trends for treatment of environmental contaminants in wastewater: An integrated valorization of industrial wastewater. Chapter 15. Elsevier, p. 337-368. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91180-1.00007-7>
- Íñiguez, G., Rodríguez, R. y Virgen, G. (2006). Compostaje de material de descarte y aguas residuales de la industria de curtiduría. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22(3), 113-123. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37022302>
- Jagadeesh, N. and Sundaram, B. (2023). Adsorption of pollutants from wastewater by biochar: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>
- Jarnerud, T., Karasev, A. V. and Jönsson, P. G. (2021). Neutralization of acidic wastewater from a steel plant by using CaO-Containing waste materials from pulp and paper industries. *Materials (Basel)*, 14(10), 23-39. <https://doi.org/10.3390/ma14102653>
- Lee, Y.-G. and Chon, K. (2022). Green technologies for sustainable water and wastewater treatment: Removal of organic and inorganic contaminants. *Separations*, 9(11), 335. <https://doi.org/10.3390/separations9110335>
- Lin, F., Zhang, S., Ma, G., Qiu, L. and Sun, H. (2018). Application of ceramic membrane in water and wastewater treatment. *E3S Web of Conferences*, 53, 1-4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185304032>
- Linares, A., Pire-Sierra, M. G., Lameda-Cuicas, E., Molina-Quintero, L. y Pire-Sierra, M. C. (2021). Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en una embotelladora de bebidas no alcohólicas. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 1(8), 89-107. <https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/3398>
- Lochyński, P., Wiercik, P., Charazińska, S., & Ostrowski, M. (2021). Research on neutralization of wastewater from pickling and electropolishing processes. *Archives of Environmental Protection*, 47, 18-29. <https://doi.org/10.24425/aep.2021.139499>
- Malato, S., Maldonado, M. I., Fernández-Ibáñez, P., Oller, I., Polo, I. and Sánchez-Moreno, R. (2016). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: The pilot plants of the plataforma solar de Almería. *Materials*

- Science in Semiconductor Processing*, 42, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.017>
- Marín Leal, J. C., Chinga Panta, C. A., Velásquez Ferrín, A. I., González Cabo, P. A. y Zambrano Rodríguez, L. M. (2015). Tratamiento de aguas residuales de una industria procesadora de pescado en reactores anaeróbicos discontinuos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 27-42. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91139263003>
- Menéndez Gutiérrez, C., y Dueñas Moreno, J. (2018). Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39, 97-107. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000300097
- Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A. y Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1), 19-29. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69530105>
- Muga, H. E. and Mihelcic, J. R. (2008). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 88(3), 437-447. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.008>
- Nazuwatussya, D., Ekawati, E., Pradipta, J. and Yulia, E. (2023). Automation system architecture of pH neutralization process in Batik wastewater treatment plant. *Journal of Physics: Conference Series*, 2673(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2673/1/012020>
- Noriega-Treviño, M. E., Quintero González, C. C., Guajardo Pacheco, J. M., Morales Sánchez, J. E., Compeán Jasso, M. E. y Ruiz, F. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, III, 87-100. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531980006>
- Oliva, J., Vallejos, G., & Pérez, M. (2008). Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. *Ingeniería*, 12(2), 17-29. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46712202>
- OMS. (2023). Declaración política de la tercera reunión de alto nivel de la Asamblea General sobre la prevención y el control de las enfermedades no transmisibles, y salud mental. *CONSEJO EJECUTIVO 152.ª reunión. Punto 6 del orden del día provisional*, 1-25. https://apps.who.int/gb/cbwaha/pdf_files/EB152/B152_6-sp.pdf
- Paccha Rufasto, C. A. y Paccha Huamani, P. R. (2023). Capacidad de adsorción de desechos agroindustriales para remover contaminantes de aguas residuales. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51), 1-12. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25258>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P. and Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>
- Peña Barreto, J. A. (2016). Saneamiento ambiental y participación ciudadana. *Revista Científica*, 1(1), 53-71. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=563660226005>
- Peña, S., Mayorga, J. y Montoya, R. (2018). Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador). *Ciencia e Ingeniería*, 39(2), 161-167. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507557606007>
- Qiu, Q., Zhao, B. w. and Qiu, L. P. (2018). Development of flat ceramic membrane technology on municipal wastewater treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 392(2), 2-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/2/022036>
- Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L. y Castañeda, S. A. (2022). Construya y opere su sistema séptico para el tratamiento de las aguas residuales de la vivienda de su finca cafetera. *Cenicafé*, 12, 23-40. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0012>
- Rodríguez Miranda, J. P., García-Ubaque, C. A. y García-Ubaque, J. C. (2016). Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18(5), 738-745. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=422497850004>
- Rojas-Morales, J. L., Gutiérrez-González, E. C. y Colina-Andrade, G. d. J. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(4), 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.005>
- Sáez Huamán, W., Palomino Pastrana, P. A., Dávila Victoria, H. M. y Tito Córdova, L. A. (2022). Aguas residuales en la calidad de agua del río. *GnosisWisdom*, 2(3), 30-36. <https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v2i3.43>
- Salazar Gámez, L., Rosell, M. C. y Salazar, R. (2009). Tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana. *Ingeniería y Desarrollo*, 26, 83-99. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85212233007>
- Sánchez-Balseca, J. J., Muñoz-Rodríguez, I. M. y Aldás-Sandoval, M. B. (2019). Tratamiento biológico de desnitrificación de aguas residuales usando un reactor de biopelícula con cáscara de arroz como fuente de energía.



- Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(2), 78-97. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-02-03>
- Sánchez Proaño, R. G. y García Gualoto, K. J. (2018). Tratamiento de aguas residuales con cargas industriales con oxidación avanzada en sistemas convencionales. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 103-111. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476054842008>
- Semaha, P., Lei, Z., Yuan, T., Zhang, Z. and Shimizu, K. (2023). Transition of biological wastewater treatment from flocculent activated sludge to granular sludge systems towards circular economy. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101294>
- Solís, M., Gil, J. L., Solís, A., Pérez, H. I., Manjarrez, N., & Perdomo, M. (2013). El proceso de sedimentación como una aplicación sencilla para reducir contaminantes en efluentes textiles. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 585-594. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966020>
- Song, K., Mohseni, M. and Taghipour, F. (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Research*, 94, 341-349. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.003>
- Teixeira Correia, G., Sánchez Ortiz, I. A., Gebara, D., Dall'Aglío Sobrinho, M. y Matsumoto, T. (2013). Remoción de fósforo de diferentes aguas residuales en reactores aeróbios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 67, 172-182. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43029146015>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á. y Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18, 109-123. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100010
- Torres Lozada, P., Vasquez, N., Pérez Vidal, A., Madera, C. y Rodriguez, J. (2011). Alternativas de tratamiento biológico aerobio para el agua residual doméstica del municipio de Cali, Colombia *Afinidad -Barcelona-, LXVIII*, 49-55. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/download/268129/355707>
- Torres, P., Pérez, A., Escobar, J. C., Uribe, I. E. y Imery, R. (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Engenharia Agrícola*, 27. <https://www.scielo.br/j/eagri/a/wcTXZFqkXkXhS36V9DKGw/#>
- Uggetti, E., Hughes-Riley, T., Morris, R. H., Newton, M. I., Trabi, C. L., Hawes, P., Puigagut, J. and García, J. (2016). Intermittent aeration to improve wastewater treatment efficiency in pilot-scale constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 559, 212-217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.195>
- UNESCO, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018. (2018). Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua, París. p. 168. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261605_spa
- Vargas, A. K. N., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M. y Núñez, D. A. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28, 315-322. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>
- Velásquez-Chávez, L. D. J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A. y Pámanes-Carrasco, G. A. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, e482. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
- Vicencio-de La Rosa, M. G., Pérez-López, M. E., Medina-Herrera, E. y Martínez-Prado, M. A. (2011). Producción de composta y vericomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(3), 263-270. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020226011>
- Wolf, J., Johnston, R. B., Ambelu, A., Arnold, B. F., Bain, R., Brauer, M. and Brown, J. (2023). Burden of disease attributable to unsafe drinking water, sanitation, and hygiene in domestic settings: a global analysis for selected adverse health outcomes. *Lancet*, 401(10393), 2060-2071. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)00458-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(23)00458-0)
- Zhang, C. M., Xu, L. M., Wang, X. C., Zhuang, K. and Liu, Q. Q. (2017). Effects of ultraviolet disinfection on antibiotic-resistant *Escherichia coli* from wastewater: inactivation, antibiotic resistance profiles and antibiotic resistance genes. *J. Appl. Microbiol.*, 123(1), 295-306. <https://doi.org/10.1111/jam.13480>
- Zhang, Y. and Duan, X. (2020). Chemical precipitation of heavy metals from wastewater by using the synthetical magnesium hydroxy carbonate. *Water Sci. Technol.*, 81(6), 1130-1136. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.208>

- Zhang, Y., Tan, Y., Sun, R. and Zhang, W. (2023). Preparation of ceramic membranes and their application in wastewater and water treatment. *Water*, 15(19), 123-139. <https://doi.org/10.3390/w15193344>
- Zhang, Z., Li, B., Li, N., Sardar, M. F., Song, T., Zhu, C., Lv, X. and Li, H. (2019). Effects of UV disinfection on phenotypes and genotypes of antibiotic-resistant bacteria in secondary effluent from a municipal wastewater treatment plant. *Water Res.*, 157, 546-554. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.079>
- Zurita Martínez, F., Rojas Bravo, D., Carreón Álvarez, A. y Gutiérrez Lomeli, M. (2015). Desinfección de aguas residuales en tres sistemas de humedales construidos híbridos. *Interciencia*, 40(6), 409-415. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33938675008>
- Zvimba, J., Siyakatshana, N., & Mathye, M. (2017). Passive neutralization of acid mine drainage using basic oxygen furnace slag as neutralization material: Experimental and modelling. *Water Science and Technology*, 75, 1014-1024. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.579>

Declaración de contribución a la autoría según CRediT

Fabiola Maribel Jiménez Tamayo: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción-borrador original, redacción, revisión y edición del artículo. **Joana Alexandra Moreno López:** redacción del borrador original del artículo, y redacción, revisión y edición del artículo. **Mónica Cecibel Encalada Zumba:** análisis formal, redacción, revisión y edición del artículo. **Evelyn Alejandra Vargas Peralvo:** curación de datos, análisis formal, y redacción, revisión y edición del artículo.

