

2. Avances en el tratamiento sostenible del agua: Innovación tecnológica, competitividad económica e impacto ambiental*



JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL**

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL***

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.02>

Resumen

Este artículo analiza los avances en el tratamiento sostenible del agua considerando la innovación tecnológica, la competitividad económica y el impacto ambiental, debido a la creciente importancia del tratamiento eficiente del agua, a la escasez de recursos hídricos, al rápido crecimiento de la población mundial y los crecientes problemas ambientales. Para ello, se realiza una búsqueda sistemática de la literatura en la cual la parte teórica ilustra los principios del análisis del ciclo de vida, la economía circular, la química verde que guían la innovación, y la perspectiva histórica detalla que la evolución va desde sistemas químicos a membranas avanzadas y sistemas biológicos. Los hallazgos indican a través del análisis temático que la filtración por membrana, los procesos de oxidación avanzada y los tratamientos basados en nanotecnología tienen altas eficiencias de eliminación, pero enfrentan desafíos por el costo, la energía y problemas de

* Derivado del proyecto SIP 20240598: "Responsabilidad social empresarial y sostenibilidad en el abastecimiento de agua".

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; correo electrónico: jasilva@ipn.mx

*** Doctora en Administración Pública. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

**** Doctora en Política Pública. Profesora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

ensuciamiento. Incorporar estrategias de recuperación de recursos en los modelos de negocios crea oportunidades para mejorar la viabilidad económica, al reducir los costos operativos. Los estudios destacan la importancia de las métricas de sostenibilidad, como la huella de carbono o las evaluaciones del ciclo de vida en la orientación de decisiones sobre adopción de tecnología. Nuevas tendencias están surgiendo aplicaciones de IA para la optimización en tiempo real, sistemas descentralizados y pilotos que demuestran la viabilidad en el mundo real. Pero las métricas inconsistentes, los datos limitados a largo plazo y las políticas siguen siendo lagunas urgentes de resolver. El análisis finaliza con un llamamiento a la investigación interdisciplinaria, metodologías adaptadas a las necesidades y regulaciones propicias para promover estos estudios disruptivos y lograr una seguridad hídrica equitativa.

Palabras clave: *competitividad, economía circular, filtración por membrana, procesos de oxidación avanzada, tratamiento sostenible del agua.*

Introducción

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático subraya que la escasez mundial de agua se está volviendo más grave debido a una combinación de crecimiento demográfico, industrialización y cambio climático (Dolan et al., 2021). El aumento de las temperaturas y el clima extremo empeoran la escasez de agua, especialmente en áreas ya estresadas (Huang et al., 2021) y aumentan la disparidad entre la demanda y la oferta de agua.

La importancia crítica de este tema ha llevado a un cambio de paradigma en la industria del tratamiento del agua hacia el desarrollo de métodos de tratamiento económicamente atractivos y ambientalmente benignos. Esto se debe a que, si bien las técnicas tradicionales (por ejemplo, cloración y filtración) producen problemas con el agua (Huang et al., 2021), las técnicas tradicionales han asegurado la calidad del agua, pero las tecnologías avanzadas son sustitución de técnicas tradicionales en el proceso: preocupaciones medioambientales y consumo energético.

La filtración por membrana, la purificación basada en nanotecnología y la desalinización solar se han basado en métodos de tratamiento tradicionales para mejorar tanto los patógenos eliminados como la eficiencia del tratamiento (Fitton et al., 2019), al tiempo que reducen los costos ambientales y económicos para promover la sostenibilidad global, objetivos de sostenibilidad.

Esta revisión busca evaluar la competitividad y el impacto ambiental de las últimas tecnologías de tratamiento de agua sostenible y factores como la preparación política y tecnológica que llevaron a su adopción. Se hace hincapié en la literatura a partir de 2019, con una perspectiva global, priorizando la investigación revisada por pares, pero dejando espacio para otras fuentes cuando éstas proporcionen adecuadamente perspectivas únicas. Al reunir dicha información, se destacan áreas prometedoras para futuras investigaciones e inversiones para abordar los problemas mundiales del agua.

Comprender los conceptos clave es un primer paso esencial para evaluar el uso sostenible del agua y tecnologías de tratamiento. En este contexto, la sostenibilidad se refiere a procesos hídricos que satisfacen los requerimientos actuales sin poner en peligro la disponibilidad futura o el bienestar ecológico (Selvakumar, 2025), destacando la eficiencia de los recursos y el menor daño al medio ambiente.

La competitividad mide el costo, la eficiencia, la escala y la adaptabilidad de los recursos tecnológicos frente a las soluciones existentes. Las tecnologías sostenibles más nuevas incluyen la filtración avanzada por membrana, nanomateriales y desalinización solar. La relación coste-efectividad evalúa la eficiencia financiera relativa de estas tecnologías, al tiempo que se sopesan sus beneficios, como la mejora de la calidad del agua y la reducción de la huella ambiental. Las soluciones de tratamiento son aquellas que minimizan los recursos y el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, y los sistemas competitivos tienen ventajas económicas y de rendimiento que promueven la penetración en el mercado.

La revisión de la literatura está estructurada para facilitar una comprensión clara y completa de los temas. Incluye una sección de métodos que explica los criterios de búsqueda y selección. Se utiliza una sección de marco teórico que proporciona perspectivas fundamentales, una sección de análisis temático que cubre metodologías y hallazgos, y una sección de con-

clusiones que resume los conocimientos y detecta lagunas en la investigación. Esto permite vincular la teoría con los últimos desarrollos, los usos y las perspectivas futuras para un mejor tratamiento sostenible del agua.

Método

Esta revisión sistemática se basó en una estrategia de búsqueda sistemática realizada de acuerdo con las pautas establecidas para identificar publicaciones relacionadas con el tratamiento sostenible del agua. Las búsquedas se realizaron en varias bases de datos, incluidas Web of Science, Scopus, PubMed y Google Scholar, utilizando combinaciones de palabras clave (por ejemplo, tratamiento sostenible del agua, relación coste-eficacia, evaluación económica). Se emplearon operadores booleanos y de truncamiento para refinar la búsqueda, lo que produjo literatura que abarca desde estudios publicados en 2019 hasta casi 2025, un periodo significativo especialmente considerando el aumento de los esfuerzos de investigación centrados en la sostenibilidad.

Se siguieron las pautas PRISMA 2020 para la inclusión: estudios con la innovación tecnológica, competitividad económica e impacto ambiental en el tratamiento del agua basados en evidencia empírica. En este sentido, se incluyeron publicaciones revisadas por pares. Por otra parte, se excluyeron los estudios que no eran directamente relevantes, no proporcionaban datos empíricos o se publicaban en idiomas distintos del inglés. La selección se realizó en dos etapas, primero con títulos y resúmenes, y segundo con revisiones de texto completo. Se logró un consenso a través de discusión o remitiéndose a un tercer revisor para conciliar discrepancias entre revisores.

Las herramientas utilizadas para la evaluación de la calidad incluyeron la lista de verificación PRISMA 2020 y las listas de verificación de evaluación crítica del Instituto Joanna Briggs para garantizar la confiabilidad. Se excluyeron los estudios que carecían de una metodología rigurosa, mientras que a los estudios con riesgo moderado de sesgo se les asignó una ponderación menor durante síntesis. En concreto, estudios de alta calidad.

Se hizo hincapié en proporcionar una evaluación sólida de las tecnologías innovadoras de tratamiento de agua de última generación, con un en-

foque en el uso de energía, la sostenibilidad ambiental y el costo. Este enfoque exhaustivo ayudó a garantizar que los resultados de la revisión fueran creíbles.

Marco teórico

Teorías y modelos fundacionales

Las tecnologías de tratamiento de agua sostenibles se desarrollan y adoptan debido a una combinación de marcos (ambientales, técnicos y sociotécnicos) que influyen su diseño y aceptación. Una de las herramientas centrales es el análisis del ciclo de vida (ACV) que considera los impactos ambientales de una tecnología desde la extracción de recursos hasta su eliminación (Şahin, 2024).

Este marco de referencia ayuda a identificar áreas de alta energía o carga química, utilizar y encontrar oportunidades para prácticas más sostenibles. A fines de octubre de 2023, las técnicas de ACV recientemente desarrolladas integraron conjuntos de datos localizados con factores de emisión para evaluaciones y productos regionales, revelando perspectivas más específicas sobre las compensaciones ambientales (Şahin, 224).

Los principios de la economía circular introducidos también complementan el ACV, priorizando, entre otros, la recuperación de recursos y la minimización de residuos, permitiendo ver los procesos de tratamiento de agua como oportunidades de recuperación y de subproductos valiosos como biogás y nutrientes (Şahin, 2024). Este enfoque integra el tratamiento del agua con el nexo más amplio agua-energía-alimentos que puede ayudar a lograr beneficios tanto ambientales como económicos.

Asimismo, la química verde destaca la importancia de diseñar los procesos para reducir el uso y generación de sustancias peligrosas y residuos, lo cual conduce a innovaciones como coagulantes ecológicos y disolventes no nocivos en procesos de oxidación avanzada (Şahin, 2024). Comprender la dinámica sociotécnica es fundamental a la adopción de nuevas tecnologías y se guía por marcos que incluyen la Difusión de Innovaciones de Rogers y la Perspectiva Multinivel (MLP).

Estos modelos examinan cómo las ventajas percibidas, la complejidad y los encuentros sociales influyen en la adopción de innovaciones (Şahin, 2024). Las políticas, la cooperación entre las partes interesadas y las herramientas financieras actúan como “facilitadores u obstáculos” para la adopción a gran escala y a largo plazo de innovaciones y métodos sostenibles (Şahin, 2024).

Los enfoques integrados consolidan cada vez más las consideraciones ambientales, económicas y sociales en un concepto común: el proceso de toma de decisiones (Şahin, 2024). La integración de datos de ACV, la economía circular, los objetivos y las contribuciones sociotécnicas permiten a las partes interesadas realizar un análisis integral de costo-beneficio para descubrir las mejores soluciones posibles. Esta perspectiva integral demuestra que el tratamiento sostenible del agua no sólo se trata de innovaciones tecnológicas (Şahin, 2024), sino también de gobernanza, comportamiento y dinámica del mercado. Alineando sus pilares, se puede lograr construir un método de tratamiento para cumplir con los objetivos ambientales, a pesar de los patrones sociales y económicos (Şahin, 2024).

Perspectivas históricas sobre el tratamiento del agua

El tratamiento del agua ha experimentado un desarrollo sustancial y continuo a lo largo del último siglo, se han utilizado desde métodos de reacción simples hasta sistemas complejos de múltiples etapas capaces de cumplir con requisitos de calidad del agua diferentes y más estrictos (Muhammad y Bendeckache, 2024). Los enfoques iniciales, como la desinfección química mediante cloración, desempeñaron un papel crucial en la prevención de infecciones transmitidas por el agua, pero también dieron lugar a subproductos de la desinfección que se convirtieron en motivo de preocupación (Muhammad y Bendeckache, 2024), lo que ha provocado mejoras en las dosis químicas y un interés en alternativas.

Con la introducción de la coagulación y la floculación, la filtración rápida con arena se convirtió en la columna vertebral de tratamiento convencional, eliminando sólidos suspendidos y patógenos (Muhammad y

Bendeckache, 2024). Sin embargo, sus demandas energéticas y químicas son insostenible a largo plazo.

Un avance significativo ocurrió en la década de 1970 con la aparición de tecnologías basadas en membranas (Muhammad y Bendeckache, 2024). Además, procesos como la ósmosis inversa y la nanofiltración comenzaron a eliminar una gama más amplia de contaminantes y resultaron útiles para combatir la escasez de agua facilitando su desalinización, aunque inicialmente fueran difíciles y costosas (Muhammad y Bendeckache, 2024).

A finales del siglo xx, se desarrollaron Procesos de Oxidación Avanzada (POA) para reducir contaminantes persistentes a nivel molecular, pero eran procesos complejos y de alto consumo de energía, lo que restringía su absorción (Muhammad y Bendeckache, 2024). Los métodos de tratamiento biológico, como los humedales construidos y los biofiltros, proporcionaron una opción más sostenible al utilizar microorganismos para disminuir la necesidad de uso de productos químicos (Muhammad y Bendeckache, 2024).

Estos métodos estaban en armonía con los paradigmas ambientales, pero necesitaban implementación cuidadosa para garantizar la confiabilidad. En las últimas dos décadas, el panorama de la industria del tratamiento del agua se ha inclinado gradualmente hacia la sostenibilidad, impulsada por regulaciones cada vez más estrictas, limitaciones en los recursos hídricos y avances tecnológicos (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021), se enmarca en términos de contar con sistemas de tratamiento compactos, eficientes y rentables, sistemas posibilitados por los avances en la ciencia de membranas, la nanotecnología y la energía renovable (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Las soluciones sostenibles se están haciendo posibles gracias a las asociaciones público-privadas y a las contribuciones de organizaciones internacionales, financiación y colaboración global en regiones con escasez de recursos. El enfoque incremental refleja una importancia más amplia en los métodos integrados, que se basan en el cambio de misión (que involucra aspectos ecológicos y económicos) (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021). Los avances logrados en el tratamiento del agua son un testimonio de una lucha constante por equilibrar el cumplimiento de requisitos de calidad cada vez más estrictos y la minimización de los impactos

ambientales y responder a las realidades económicas, siendo la sostenibilidad y la competitividad dos aspectos críticos para asegurar el agua para el futuro (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Principales eruditos y escuelas de pensamiento

Una red mundial y activa de investigadores, instituciones y consorcios proporciona la fuerza impulsora detrás de los campos del tratamiento sostenible del agua, impulsando la innovación, debatiendo sus fundamentos teóricos y promoviendo la aplicación de tecnologías emergentes (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023).

Personas pioneras como Menachem Elimelech, Pedro J. J. Álvarez y Bruce E. Logan han tenido un gran impacto en dominios como la desalinización por membranas, las estrategias de nanotecnología y la recuperación de energía de las aguas residuales (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023). Desde la investigación hasta la política y el desarrollo de capacidades, instituciones líderes como Eawag, MIT, la Universidad de Carolina del Norte y consorcios internacionales como la Asociación Internacional del Agua y la Fundación de Investigación del Agua, representan una gran parte de las actividades en muchas regiones (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023).

Aunque hay consenso en cuanto a la necesidad crítica de un tratamiento sostenible y responsable con el medio ambiente del agua, el espacio está plagado de opiniones diferentes sobre qué tecnologías serán viables, escalables y asequibles. Los defensores de soluciones de alta tecnología afirman que existen tecnologías superiores, como los sistemas de membranas, los nanomateriales y la optimización impulsada por IA son más adecuados para abordar problemas complejos del agua (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023). Por el contrario, los defensores de los enfoques de baja tecnología, como los bios y los filtros y la desinfección solar, enfatizan su simplicidad, asequibilidad y facilidad de uso en entornos con recursos limitados (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023).

Se sostiene que los sistemas centralizados son eficientes y permiten economías de escala, mientras que los enfoques descentralizados son flexibles

para comunidades remotas, pero operativamente problemáticos (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022). Aún incluso las consideraciones de costos polarizan el campo: los procesos avanzados tienen el potencial de generar ahorros a largo plazo debido a una mayor durabilidad y eficiencia energética, pero para muchas regiones con fondos insuficientes, los críticos citan su relativa inaccesibilidad (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022). En una línea similar, la tensión entre las guías ambientales, como los principios económicos circulares y de baja energía, y los imperativos económicos, como los de corto plazo. El retorno de la inversión informa tanto las estrategias de investigación como las de implementación (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022).

Estos debates ponen de relieve la tensión actual entre la promesa de una nueva tecnología y su valor final. Enfoques híbridos que equilibran sistemas de alta eficiencia con alcance y facilidad. Han surgido nuevas formas de uso y facilidad de uso para gestionar estas prioridades en pugna (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022). En el futuro, se necesitarán soluciones personalizadas que tengan en cuenta las características locales, ecosistémicas y socioeconómicas. El medio ambiente será esencial para lograr equidad y eficacia en la prestación de la seguridad hídrica mundial para las tecnologías de tratamiento del agua (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022).

Debates o controversias en curso

Los diálogos sobre los costos, la escalabilidad y las implicaciones políticas, y los desafíos para la transferencia de tecnología ya se han reflejado con la diversidad regional en un consenso permanente hacia la adopción global (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Un desafío importante es la viabilidad económica de técnicas más avanzadas, incluidos biorreactores de membrana o tratamientos basados en nanotecnología.

Los partidarios elogian los principales argumentos en favor de estas tecnologías como la mayor calidad del agua que producen y las economías de escala que podrían hacerlas rentables a largo plazo, mientras que los

opositores se preocupan por las elevadas inversiones iniciales y los costes operativos, especialmente en zonas de bajos ingresos (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Esto ha llevado a algunos académicos a pedir soluciones híbridas o de baja tecnología que puedan lograr un equilibrio entre bajo coste y alto rendimiento, pero que deben adaptarse con cuidado a las condiciones locales.

Otro gran obstáculo para escalar las tecnologías basadas en grafeno es tratar de implementarlas en la práctica; mientras que las tecnologías más nuevas, aunque los métodos como las membranas basadas en grafeno o la oxidación electroquímica resultan prometedores a menor escala, es más difícil optimizarlos y utilizarlos en sistemas polares. Sin subsidios o un entorno de políticas que recompense las soluciones respetuosas con el clima, estos problemas (ensuciamiento de las membranas, demanda de energía, complejidad de mantenimiento) a menudo conducen a soluciones tecnológicas que no son rentables (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024), lo que genera inconsistencias en las evaluaciones de preparación tecnológica.

Los diversos marcos regulatorios también complican la adopción, ya que, si bien algunas regiones pueden justificar tratamientos avanzados debido a los estrictos estándares de calidad del agua, las limitaciones socioeconómicas en otras justifican soluciones menos sofisticadas (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Además, las regulaciones que cambian rápidamente, en respuesta a los contaminantes emergentes, aumentan la incertidumbre y plantean un desafío para que las partes interesadas busquen tecnologías específicas sin riesgo de obsolescencia (Abdelfattah y El-Shamy, 2023; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). La variación regional también afecta la implementación, ya que las comunidades rurales y remotas enfrentando barreras para acceder al equipo, habilidades y apoyo institucional necesarios para la implementación de sistemas de alta tecnología.

Esto destaca la necesidad de enfoques sensibles al contexto que adapten las tecnologías a los entornos socioeconómicos y ambientales locales, lo que permite un acceso equitativo al agua limpia (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Estos desafíos se ven agravados por los hallazgos inconsistentes en varios estudios, con tecnolo-

gías avanzadas como los sistemas de membranas y los procesos de oxidación que muestran diferentes niveles de eficiencia y la creación de subproductos no deseados que dependen de lo que se haga en el experimento y las características de la calidad del agua local (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024).

Estas inconsistencias fragmentan el conocimiento disponible para los responsables de las políticas y los profesionales, lo que dificulta las decisiones sobre su uso a gran escala (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Para superar estas brechas, los investigadores apoyan el trabajo interdisciplinario, uniendo los aspectos técnicos, económicos y de políticas que utilizan herramientas como el cálculo del costo del ciclo de vida y el modelado de sistemas (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Estos enfoques holísticos buscan encontrar soluciones viables que se ajusten a las condiciones locales y alineen las regulaciones para fomentar la innovación sin agregar altos costos. Descifrar este debate es esencial para desarrollar tecnologías de tratamiento del agua que sean ambientalmente sostenibles y socialmente equitativos (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024).

Metodologías y enfoques tecnológicos

Métodos de tratamiento convencionales y avanzados

Al igual que estas bacterias dañinas, las tecnologías de tratamiento del agua también han progresado, desde métodos de tratamiento, como la cloración y coagulación-floculación, hasta tecnologías avanzadas, como membranas, fotocátalisis y nanotecnología (Shoshaa et al., 2023). Históricamente, el uso de métodos tempranos (por ejemplo, coagulación, floculación, sedimentación y desinfección) ha sido eficaz para la desinfección de patógenos y la eliminación de turbidez, pero ha generado inquietudes sobre la desinfección por producto, el uso de químicos y los altos volúmenes de lodos, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sustentables (Shoshaa et al., 2023).

Las tecnologías de filtración por membrana, incluidas la ultrafiltración y la ósmosis inversa, proporcionan una mejor protección contra patógenos y rechazo de contaminantes frente a métodos convencionales, con menores insumos químicos (Chaukura, 2020). Los altos requerimientos energéticos y el ensuciamiento son dos de los principales desafíos para estos sistemas, que aumentan tanto los costos como las emisiones de huellas de carbono (Chaukura, 2020). Sin embargo, las mejoras en la recuperación de energía y los materiales antiincrustantes se han orientado a mitigar estos problemas, pero su eficacia depende en gran medida del contexto operativo específico (Chaukura, 2020).

La fotocatalisis impulsada por energía solar que utiliza materiales como el dióxido de titanio ha demostrado su potencial para la desinfección y la lucha contra contaminantes emergentes descomposición, incluidos productos farmacéuticos y pesticidas (Muscetta et al., 2024). Aunque es ambientalmente atractivo, la implementación a gran escala tendría desafíos en cuanto a catalizadores eficientes, diseños ideales de reactores y exposición continua a la luz solar, por lo que su relación costo-beneficio sigue siendo objeto de un escrutinio poco activo (Muscetta et al., 2024).

Tratamientos basados en nanotecnología, empleando materiales como el óxido de grafeno y los nanotubos de carbono, muestran una eficacia significativa en la eliminación de metales pesados, microplásticos y otros contaminantes complejos (Liu et al., 2021). A pesar de sus ventajas, la adopción a gran escala se ha visto obstaculizada por preocupaciones sobre la estabilidad, la toxicidad y las implicaciones ecológicas, los altos costos y la complejidad de la fabricación (Liu et al., 2021). Se necesitan evaluaciones rigurosas del ciclo de vida y regulaciones más transparentes para guiar su desarrollo y aplicación (Liu et al., 2021).

Eficiencia, costo y el impacto ambiental se suele tener en cuenta al evaluar las tecnologías de tratamiento del agua (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). Aunque son bien conocidos por su eficiencia en la eliminación de contaminantes, los sistemas de membranas enfrentan desafíos para controlar los costos operativos, mientras que la fotocatalisis impulsada por energía solar es respetuosa con el medio ambiente y es seguro para que lo utilicen los humanos, pero carece de escalabilidad (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). Los enfoques convencionales más eficaces pueden proporcionar be-

neficios a corto plazo, pero no necesariamente se traducen en sostenibilidad a largo plazo (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). La selección de tecnología ideal debe ser económicamente comparativa según la calidad del agua local, la red o la región (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). La perspectiva contextualizada que informa diseños y asociaciones específicos conduce rápidamente a avances incrementales en campos relacionados en todo el mundo basados en la competitividad en precio, rendimiento y sostenibilidad (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021).

Innovaciones en la recuperación de recursos y la gestión circular del agua

La recuperación de recursos y la gestión circular del agua han surgido como principios duales centrales para el tratamiento sostenible del agua, redefiniendo las aguas residuales como una reserva fértil de materiales y energía valiosos. Actualmente, hay nuevos desarrollos haciendo hincapié en la recuperación y reutilización de nutrientes (por ejemplo, fósforo y nitrógeno) esenciales para la agronomía (Faragó et al., 2021; Preisner et al., 2022). Por ejemplo, las técnicas de precipitación de estruvita recuperan estos nutrientes para su uso como fertilizantes y los procesos biológicos como el anamox permiten la recuperación de nitrógeno con bajos requerimientos de energía (Faragó et al., 2021; Preisner et al., 2022).

En el ámbito industrial, los metales se pueden recuperar de las aguas residuales industriales, como metales pesados y preciosos, mediante procesos como la recuperación electroquímica y la biosorción. Aunque es eficaz, la escalabilidad de estas tecnologías requerirá inversiones significativas, regulaciones sólidas y sistemas seguros de gestión de residuos (Faragó et al., 2021; Preisner et al., 2022).

La recuperación energética también ha avanzado, incluyendo ahora la digestión anaeróbica de lodos de depuradora para producir biogás para ayudar a satisfacer las necesidades energéticas de la planta de tratamiento. Mejoras como la codigestión con restos de comida ha aumentado las emisiones de metano (Adeloju, 2024; Gautam et al., 2023). Los sistemas bioelectroquímicos, como las células de combustible microbianas, con-

vierten los desechos orgánicos en electricidad o gas hidrógeno. Aunque son prometedores, estos sistemas implican desafíos en términos de su complejidad operativa y escalabilidad; se necesita más investigación para integrarlos de manera efectiva a la infraestructura existente (Adeloju, 2024; Gautam et al., 2023).

La gestión circular del agua adopta un enfoque de sistema integral, implementando tecnologías complementarias, incluida la filtración por membrana, la digestión anaeróbica y la recuperación de nutrientes para formar sistemas de circuito cerrado. Este modelo es coherente con la economía circular y prácticas que implican la conversión de subproductos como los biosólidos en insumos agrícolas y, al mismo tiempo, la reutilización de los efluentes tratados para el riego (Czuba et al., 2021; Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Esto se ejemplifica en el nexo agua-energía-alimentos (WEF) que está proporcionando el impulso para los vínculos intersectoriales entre las instalaciones de tratamiento de agua, la agricultura y la industria para reciclar recursos y aumentar la sostenibilidad (Czuba et al., 2021; Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Aprovechando el agua, los nutrientes y la energía recuperados, los proyectos del WEF ayudan a mejorar la eficiencia de los recursos, reducir los costos y los impactos ambientales, en un contexto de políticas e incentivos propicios (Czuba et al., 2021; Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

La adopción de dichas tecnologías, especialmente en las regiones en desarrollo, es limitada debido a los altos costos de capital, la necesidad de conocimientos técnicos y diversos obstáculos regulatorios (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). La aceptación pública de los productos recuperados también es un problema, ya que los consumidores pueden considerar productos contaminados o desagradables. Y el creciente apoyo a través de marcos de políticas y proyectos piloto indican un buen terreno para el consumo masivo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). A medida que estos métodos se validan mediante investigaciones y asociaciones con empresas fuera de nuestro sector de crecimiento, las aguas residuales se reconocen cada vez más como un vector para el desarrollo sostenible (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Competitividad económica

La relación coste-eficacia es fundamental para la adopción de nuevas tecnologías de tratamiento del agua, especialmente en mercados con escasez de datos o con una alta demanda de consumo que exigen rendimientos mensurables (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Se emplean enfoques de análisis de costes, como las evaluaciones del coste del ciclo de vida (LCCA) y las métricas de retorno de la inversión (ROI), para evaluar la viabilidad de los tratamientos convencionales (por ejemplo, coagulación-floculación y cloración), así como de los sistemas avanzados (por ejemplo, filtración por membranas, nanotecnología y estrategias de recuperación de recursos) (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Estos análisis se realizan teniendo en cuenta factores como los gastos de capital (CAPEX), los gastos operativos (OPEX), los requisitos de mantenimiento y los ingresos que pueden resultar de la recuperación de cualquier recurso o energía producida y, de ese modo, proporcionan una visión general de la viabilidad a largo plazo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Los métodos de tratamiento más escalables, como la ósmosis inversa y los tratamientos basados en nanomateriales, pueden ser más eficaces para eliminar contaminantes que los métodos tradicionales, ya que ofrecen opciones que utilizan menos productos químicos en general, lo que reduce el costo a lo largo del tiempo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Pero estos ahorros pueden verse anulados por sus altos costos iniciales y las necesidades de mantenimiento especializado, a menos que existan condiciones propicias para su uso (como economías de escala, regulación favorable o proximidad a industrias que necesitan agua tratada) (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Por otra parte, las soluciones híbridas o de baja tecnología más asequibles, como la filtración de arena mejorada acompañada de digestión anaeróbica, pueden resultar menos rentables como inversión inicial y es posible que no se adapten al riguroso marco regulatorio o a la cambiante calidad del agua (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). En consecuencia, las opciones de adopción dependen en gran medida del contexto y están determinadas por el costo económico local de la energía,

las condiciones laborales y los marcos de gobernanza (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Existen factores que impulsan la reducción de costos en las tecnologías de tratamiento del agua. Esto crea economías de escala para implementaciones a gran escala, con costos unitarios más bajos para sistemas basados en membranas o nanotecnología (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). De hecho, la investigación y los avances tecnológicos, incluidos los recubrimientos antiincrustantes y los métodos de desalinización de bajo consumo energético, han reducido los requisitos energéticos y la vida útil de los equipos (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Recuperación integrada de recursos: combinar el tratamiento de aguas residuales con la bioenergía o la recuperación de nutrientes puede compensar los costos mediante la generación de ingresos. Los gobiernos también participan en la implementación de tecnologías más costosas mediante asociaciones público-privadas, subsidios y beneficios fiscales (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Cada solución de tratamiento de agua es específica para cada caso y no existe una solución universal, ya que las soluciones rentables dependen de las características locales del agua, los requisitos reglamentarios y las condiciones socioeconómicas (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Es fundamental realizar un análisis integral de costo-beneficio, considerando las evaluaciones del ciclo de vida y los factores “externos” (por ejemplo, los beneficios para la salud o las emisiones de carbono) para determinar las inversiones más responsables desde el punto de vista económico y ambiental en función de las condiciones específicas de los contextos rurales de Etiopía (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Impacto ambiental y métricas de sostenibilidad

El impacto ambiental de las tecnologías de tratamiento del agua es cada vez más importante para la toma de decisiones, y la sostenibilidad ahora abarca no sólo la calidad del agua, sino también el consumo de energía, las emisiones de carbono, el uso de productos químicos y la recuperación de recursos (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Métricas como la

huella de carbono, la demanda de energía y la generación de desechos son clave para evaluar el desempeño ambiental y ofrecen información sobre las compensaciones tanto ecológicas como económicas (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Las evaluaciones de la huella de carbono rastrean las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida de los sistemas de tratamiento, desde la construcción hasta el desmantelamiento (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Los métodos avanzados como la filtración por membrana a menudo reducen el uso de productos químicos, pero pueden aumentar las demandas de energía, lo que eleva las emisiones de carbono. Por el contrario, los enfoques de recuperación de recursos como la digestión anaeróbica pueden compensar las emisiones generando biogás renovable (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

De manera similar, el uso de energía varía según las tecnologías: los sistemas de alta presión, como la ósmosis inversa, son eficientes, pero consumen mucha energía. La investigación sobre dispositivos de recuperación de energía y materiales avanzados busca mitigar estos desafíos (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). La generación de desechos influye aún más en la sostenibilidad, ya que los procesos tradicionales producen lodos que requieren una eliminación cuidadosa, mientras que los sistemas avanzados pueden generar salmueras o catalizadores residuales que también exigen atención (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Los marcos de referencia como los índices de sostenibilidad y las directrices de la Global Reporting Initiative (GRI) ofrecen formas estructuradas de evaluar los sistemas de tratamiento de agua en sus dimensiones ambientales, económicas y sociales (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Los índices de sostenibilidad combinan métricas como el uso de energía, las emisiones y el potencial de recuperación de recursos para facilitar las comparaciones de tecnologías, mientras que los estándares GRI alientan a las empresas de servicios públicos a divulgar sus impactos ambientales y sociales (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Las evaluaciones del ciclo de vida (LCA) proporcionan evaluaciones detalladas de los impactos ambientales desde el principio hasta el fin y pueden integrarse con análisis tecnoeconómicos para realizar evaluaciones integrales de la sostenibilidad (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021).

La estandarización de estas evaluaciones sigue siendo un desafío. Las variaciones en las metodologías, las unidades y los supuestos dificultan las comparaciones directas entre estudios (Ayach et al., 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021). Las tecnologías emergentes, que a menudo se evalúan utilizando datos a escala piloto, introducen más incertidumbres y complican las decisiones de inversión y políticas (Ayach et al., 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021). La transparencia de los informes y los marcos coherentes son esenciales para captar con precisión las implicaciones ambientales, económicas y sociales de las diferentes opciones de tratamiento del agua (Ayach et al., 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021).

A medida que mejoran las métricas y los marcos de sustentabilidad, se vuelven cada vez más influyentes en la configuración de las inversiones en infraestructura, las políticas regulatorias y la aceptación pública (Ayach et al., 2024; Tarpeh y Chen, 2021). Al integrar medidas sólidas de desempeño ambiental con herramientas integrales de toma de decisiones, las partes interesadas pueden priorizar soluciones de tratamiento de agua escalables, rentables y ecológicamente responsables, abordando los desafíos hídricos globales de manera más efectiva (Ayach et al., 2024; Tarpeh y Chen, 2021).

Tendencias emergentes y debates

Debido al aumento en las demandas mundiales de agua, se están realizando investigaciones para hacer el proceso más eficiente, tener un menor impacto ambiental, además de tener acceso a agua potable. Tratamiento de agua: nuevos desarrollos (Abdelfattah y El-Shamy, 2024) y las innovaciones en nanomateriales y membranas avanzadas están transformando el tratamiento del agua. El óxido de grafeno, los nanotubos de carbono y otros materiales porosos son buenos candidatos para eliminar contaminantes persistentes (metales pesados y/o productos farmacéuticos), gracias a su gran área superficial y propiedades ajustables (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021).

Membranas de próxima generación, como las de película fina, los composites y diseños bioinspirados también proporcionan una alta permeabilidad y una excelente resistencia al ensuciamiento (Abdelfattah y El-Shamy,

2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021). Las membranas híbridas que incorporen capacidades fotocatalíticas y/o adsorptivas facilitan no sólo la filtración, también la degradación de contaminantes, pero persisten desafíos relacionados con la escalabilidad y el impacto ambiental (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021).

El aprendizaje automático (ML) es conocido por restaurar datos a partir de hechos históricos. *Big data* y los modelos de aprendizaje automático permiten el monitoreo en tiempo real y el mantenimiento predictivo de los caudales, la dosificación de productos químicos y la limpieza de membranas para minimizar el consumo de energía y disminuir los costos operativos. Las empresas de servicios públicos utilizan sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en IA con sensores de IoT para responder a los cambios en la calidad del agua e identificar opciones de tratamiento rentables (Maniam et al., 2022; Obiuto et al., 2024). Pero, a medida que estas tecnologías se integran (Maniam et al., 2022; Obiuto et al., 2024), las preocupaciones sobre la ciberseguridad y la gestión de datos están aumentando.

Los sistemas de tratamiento descentralizados se están volviendo populares en áreas remotas o áreas desatendidas. Por ejemplo, biorreactores de membrana o energía solar. Las unidades de desinfección son sistemas modulares que pueden suministrar agua limpia *in situ*, eliminando así la necesidad de una costosa infraestructura de distribución (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Los proyectos piloto en áreas con menor acceso a agua limpia, como África subsahariana y Asia rural, muestran cómo las preferencias locales y los contextos culturales pueden detectar la descentralización (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Sin embargo, la sostenibilidad de estas iniciativas depende en gran medida del apoyo técnico y la financiación continuos, lo que hace necesario el desarrollo de capacidades para una integración exitosa a largo plazo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Estas líneas de investigación significan un progreso vital hacia la solución de los problemas mundiales del agua, al tiempo que se garantiza también la sostenibilidad, la asequibilidad y la disponibilidad.

Barreras de implementación y consideraciones de política

A pesar de la promesa de nuevas tecnologías de tratamiento del agua, existen muchas barreras para su uso. Existe un uso generalizado, impulsado por factores regulatorios, sociales y económicos (Issaoui et al., 2022; Shehata et al., 2023). Los estándares de calidad del agua en las distintas jurisdicciones generan restricciones regulatorias, ya que obstaculizan la viabilidad de la comercialización global para los desarrolladores de tecnología (Issaoui et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Las definiciones de contaminantes y los límites aceptables varían entre países industrializados, lo que dificulta aún más la implementación internacional. La puntualidad en la implementación es sensible al escepticismo público, especialmente para sistemas nuevos como los tratamientos basados en IA o nanotecnología, lo que revela las implicaciones para la transparencia en la comunicación y la disponibilidad de datos de desempeño significativos (Issaoui et al., 2022; Shehata et al., 2023).

En las regiones en desarrollo, la adopción se ve obstaculizada por desafíos en materia de creación de capacidad. El uso de estas tecnologías avanzadas requiere conocimientos especializados; sin embargo, la capacitación existente es inadecuada y existe una alta rotación de personal (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022). Además, la infraestructura puede ser un factor limitante: una red de energía variable o una cadena de suministro inestable pueden dificultar la implementación y el mantenimiento de sistemas modulares o de alto consumo energético (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022). La financiación difícil agrava estos problemas porque la financiación continua es crucial para sostenibilidad operativa a largo plazo (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022).

Las asociaciones e iniciativas desempeñan un papel fundamental a la hora de abordar estas barreras. Las Asociaciones Público-Privadas (APP) contribuyen a la puesta en común de recursos y en compartir riesgos, lo que hace posible proyectos piloto y soluciones escalables (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Los costos de entrada que enfrentan las empresas emergentes se minimizan mediante incentivos gubernamentales, como subsidios y subvenciones, mientras que la financiación basada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU incentivará la inversión en infraestruc-

tura hídrica equitativa y sostenible, desempeñando un papel importante para ayudar a la inversión (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Los consorcios de estudios científicos regionales fomentan el intercambio de conocimientos y la estandarización de las mejores prácticas, lo que genera mejor trabajo conjunto en desafíos compartidos en materia de agua (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021).

El vínculo entre el cambio tecnológico y la realidad técnica resaltan la importancia de la formulación de políticas sólidas, la participación de diferentes partes interesadas y el desarrollo continuo de capacidades (Ramírez-Agudelo et al., 2021). Abordar estos obstáculos es esencial para abrir caminos hacia soluciones de tratamiento del agua a escala mundial que tengan un impacto en diferentes contextos socioeconómicos (Ramírez-Agudelo et al., 2021).

Comparación y crítica de estudios

Las tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua están cambiando rápidamente, aunque se trata de un campo relativamente fragmentado con una diversidad de metodologías y resultados y diferentes contextos de aplicación (Chen et al., 2021; Colella et al., 2021). Los estudios experimentales y a escala piloto/de campo tienen sus respectivas fortalezas: los estudios de laboratorio tienen la ventaja de condiciones controladas para probar variables específicas, mientras que los ensayos piloto y a gran escala demuestran desafíos (por ejemplo, suciedad, escalabilidad, mantenimiento) en condiciones del mundo real (Chen et al., 2021; Colella et al., 2021). Las diferencias en los protocolos de monitoreo y las condiciones ambientales contribuyen a reducir la generalización de los hallazgos (Chen et al., 2021; Colella et al., 2021).

Las evaluaciones del ciclo de vida (LCA) y los análisis de costo-beneficio son útiles para comprender desempeño ambiental y capacidad económica, respectivamente. Los análisis del ciclo de vida (ACV) iluminan el consumo de energía, las emisiones de carbono emisiones y producción de desechos, mientras que los análisis de costo-beneficio informan la viabilidad económica (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022).

Si bien estas metodologías son útiles, las disparidades metodológicas (por ejemplo, los diferentes límites del sistema o la falta de consideración de las externalidades) limitan comparabilidad entre estudios. En cambio, los enfoques multidisciplinarios que captan las dimensiones técnicas, económicas y sociales a menudo proporcionan resultados más significativos en el contexto. Pero las colaboraciones interdisciplinarias siguen estando poco explotadas (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022).

Los sistemas de membrana retienen contaminantes, pero pueden verse obstaculizados por la suciedad y el consumo de energía asociado con el bombeo. Aunque se han utilizado métodos para degradar contaminantes basados en oxidación avanzada y nanotecnología, sus escalas de implementación y contaminantes objetivo varían considerablemente (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Las opciones de recuperación de recursos han demostrado tener potencial económico a través de la compensación de los costos operativos, pero los plazos para alcanzar el punto de equilibrio varían, dependiendo de las condiciones locales, como los precios de la energía y los incentivos de las políticas (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Las soluciones de baja tecnología son rentables al principio; sin embargo, no son tan robustos en condiciones cambiantes (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Los contextos en los que se introducen estas tecnologías determinan su éxito o fracaso (Sikarwar et al., 2025). La gobernanza y el seguimiento frecuente, así como la aceptación pública, son factores clave para la adopción, mientras que la calidad de la infraestructura respalda la viabilidad junto con el clima (Sikarwar et al., 2025). Los sistemas energéticamente exigentes lo más probable es que se produzcan en zonas con redes eléctricas estables, mientras que los esfuerzos que demandan pocos recursos, probablemente se sitúen en regiones de recursos limitados (Sikarwar et al., 2025).

Las diferencias en la calidad del agua, las condiciones operativas y las estrategias de investigación conducen a hallazgos muy variables (Moradi, 2023; Rai, 2024), que pueden beneficiarse de métricas de desempeño estandarizadas para mejorar comparabilidad y confiabilidad. Las evaluaciones ofrecen información realista sobre variables del mundo real, como la bioincrustación y la aceptabilidad pública, pero requieren un mayor rigor metodológico para lograr una validez más amplia (Moradi, 2023; Rai, 2024). Es

necesario adaptar soluciones de otros entornos para entornos rurales o con recursos limitados, teniendo en cuenta elementos sociopolíticos como los impulsores de políticas y aceptación cultural antes de determinar la transferibilidad (Moradi, 2023; Rai, 2024).

En general, la literatura destaca las compensaciones entre la alta eficiencia de eliminación y los costos operativos, complejidad que ilustra simultáneamente los beneficios ambientales y económicos de nuevos enfoques de tratamiento como la recuperación de recursos (Romeiro, 2022; Sikarwar et al., 2025). Las influencias contextuales y las inconsistencias metodológicas resaltan la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la implementación de métricas estandarizadas, así como diseños específicos para un determinado entorno (Romeiro, 2022; Sikarwar et al., 2025).

Estos esfuerzos no sólo fortalecerán la base de evidencia, sino que también dan forma al desarrollo de soluciones de tratamiento de agua sostenibles que puedan aplicarse a escala, sean rentables y “aptas para el propósito” en términos de desafíos globales locales (Romeiro, 2022; Sikarwar et al., 2025).

Conclusión

Esta revisión presenta los avances recientes en el tratamiento sostenible del agua con un enfoque en la interacción entre la innovación tecnológica, la competitividad económica y el impacto ambiental. Algunas de las técnicas líderes incluyen tecnologías de membrana avanzadas, adsorbentes basados en nanotecnología, recuperación de recursos (digestión anaeróbica y recuperación de nutrientes), etcétera.

Estas tecnologías son prometedoras para lograr una alta eliminación y control de contaminantes, pero están sujetos al contexto regional de regulación, infraestructura y financiamiento. Los más prometedores son los sistemas híbridos que combinan múltiples tecnologías de tratamiento, junto con la economía circular, enfoque basado en condiciones centralizadas, descentralizadas o con recursos limitados.

La revisión destaca importantes lagunas en la investigación existente ya que hay pocos estudios de campo sobre tecnologías emergentes, como tra-

tamientos basados en nanomateriales y membranas de próxima generación, especialmente en lo que respecta a durabilidad en el campo. Los proyectos piloto normalmente no incluyen métricas detalladas sobre escalabilidad, lo que significa que a menudo no están seguros de la energía necesaria, el mantenimiento que implica y si se adaptará bien a otras infraestructuras en proporciones mayores. Complicaciones metodológicas, como métricas inconsistentes y escasez de estudios comparativos en diversos contextos geográficos también complican el campo.

Los hallazgos resaltan la necesidad de una mayor interdisciplinariedad: colaboración con ingenieros, científicos y responsables de políticas, para abordar las posibles disparidades mediante protocolos de prueba estandarizados y diseños con información cultural. Las mejores evaluaciones del ciclo de vida (ECV) deberían incorporar parámetros sociales y económicos (aceptación pública, creación de empleo, por ejemplo), así como impactos ambientales y estudios orientados a políticas. Asimismo, se requieren pruebas de campo a largo plazo para evaluar las implicaciones regulatorias y la sostenibilidad operativa. Además, los modelos a nivel de sistemas y los marcos de implementación adaptativos pueden optimizar conjuntamente el despliegue de tecnología para tener en cuenta las compensaciones hidrológicas, socioeconómicas y ambientales.

Si se abordan estos desafíos, el sector de tratamiento del agua debería poder pasar de innovaciones experimentales a aplicaciones escalables en el mundo real que contribuirán a lograr soluciones efectivas, soluciones de seguridad hídrica ambientalmente sostenibles y socialmente equitativas.

Referencias

- Abdelfattah, I. y El-Shamy, A. M. (2024). Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. *Journal of Environmental Management*, 351, 119614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119614>
- Ahmad, A. L., Chin, J. Y., Harun, M. H. Z. M. y Low, S. C. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553>

- Bijekar, S., Padariya, H. D. yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A., Awwad, N. S., ... y Jeon, B. H. (2022). The state of the art and emerging trends in the wastewater treatment in developing nations. *Water*, 14(16), 2537. <https://doi.org/10.3390/w14162537>
- Chaukura, N., Marais, S. S., Moyo, W., Mbali, N., Thakalekoala, L. C., Ingwani, T., ... y Nkambule, T. T. (2020). Contemporary issues on the occurrence and removal of disinfection byproducts in drinking water-a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103659. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103659>
- Dolan, F., Lamontagne, J., Link, R., Hejazi, M., Reed, P. y Edmonds, J. (2021). Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications*, 12(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22194-0>
- Egbemhenghe, A. U., Ojeyemi, T., Iwuozor, K. O., Emenike, E. C., Ogunsanya, T. I., Anidiobi, S. U. y Adeniyi, A. G. (2023). Revolutionizing water treatment, conservation, and management: Harnessing the power of AI-driven ChatGPT solutions. *Environmental Challenges*, 13, 100782. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100782>
- Ehalt Macedo, H., Lehner, B., Nicell, J., Grill, G., Li, J., Limtong, A. y Shakya, R. (2022). Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. *Earth System Science Data*, 14(2), 559-577. <https://doi.org/10.5194/essd-14-559-2022>
- Fitton, N., Alexander, P., Arnell, N., Bajzelj, B., Calvin, K., Doelman, J., ... y Smith, P. (2019). The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. *Global Environmental Change*, 58, 101944. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101944>
- Hamel, P. y Tan, L. (2022). Blue-green infrastructure for flood and water quality management in Southeast Asia: Evidence and knowledge gaps. *Environmental Management*, 69, 699-718. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01467-w>
- He, M., Xu, Z., Hou, D., Gao, B., Cao, X., Ok, Y. S., ... y Tsang, D. C. (2022). Waste-derived biochar for water pollution control and sustainable development. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(7), 444-460. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00306-8>
- Huang, Z. yuan, X. y Liu, X. (2021). The key drivers for the changes in global water scarcity: Water withdrawal versus water availability. *Journal of Hydrology*, 601, 126658. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126658>
- Jan, F., Min-Allah, N. y Düşteğör, D. (2021). IoT-based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends, and challenges for domestic applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/10.3390/w13131729>
- Liu, Y., Zeng, X., Hu, X., Xia, Y. y Zhang, X. (2021). Solar-driven photocatalytic disinfection over 2D semiconductors: The generation and effects of reactive oxygen species. *Solar RRL*, 5(6), 2000594. <https://doi.org/10.1002/solr.202000594>
- Mao, G., Hu, H., Liu, X., Crittenden, J. y Huang, N. (2021). A bibliometric analysis of industrial wastewater treatments from 1998 to 2019. *Environmental Pollution*, 275, 115785. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115785>
- Mishra, P. y Singh, G. (2023). Energy management systems in sustainable smart cities based on the internet of energy: A technical review. *Energies*, 16(19), 6903. <https://doi.org/10.3390/en16196903>

- Muhammad, D. y Bendeche, M. (2024). Unveiling the black box: A systematic review of explainable artificial intelligence in medical image analysis. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 24, 542-560. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.08.005>
- Muscetta, M., Ganguly, P. y Clarizia, L. (2024). Solar-powered photocatalysis in water purification: Applications and commercialization challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 113073. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113073>
- Nwokediegwu, Z. Q. S., Ugwuanyi, E. D., Dada, M. A., Majemite, M. T. y Obaigbena, A. (2024). Urban water management: A review of sustainable practices in the USA. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(2), 517-530. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.829>
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S. y Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDG) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Şahin, E., Arslan, N. N. y Özdemir, D. (2024). Unlocking the black box: An in-depth review on interpretability, explainability, and reliability in deep learning. *Neural Computing and Applications*, 37, 859-965. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10437-2>
- Selvakumar, P. (2025). Emerging trends in water treatment and purification techniques. En *Emerging trends and technologies in water management and conservation* (pp. 121-148). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6920-3.ch004>
- Singh, B. J., Chakraborty, A. y Sehgal, R. (2023). A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Journal of Environmental Management*, 348, 119230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>
- Shoshaa, R., Ashfaq, M. Y. y Al-Ghouti, M. A. (2023). Recent developments in ultrafiltration membrane technology for the removal of potentially toxic elements and enhanced antifouling performance: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103162. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103162>
- Zhang, X., Wang, G., Xue, B., Zhang, M. y Tan, Z. (2021). Dynamic landscapes and the driving forces in the Yellow River Delta wetland region in the past four decades. *Science of the Total Environment*, 787, 147644. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147644>