Revista esprint Investigación

https://rei.esprint.tech
Vol. 5 N° 2, julio-diciembre 2026 (466-478)

ISSN: 2960-8317

Artículo de revisión

Reutilización sostenible de aguas residuales para usos urbanos y agrícolas

Sustainable wastewater reuse for urban and agricultural purposes

Luis Felipe Pacheco Logroño*
Universidad Estatal Amazónica
Puyo - Ecuador
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
pacheco.luisfl@gmail.com
https://orcid.org/0009-0004-2384-6815

Andrés Francisco Pacheco Logroño
Universidad Estatal Amazónica
Puyo - Ecuador
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
pacheco.laf@gmail.com
https://orcid.org/0009-0005-2086-9998

Raúl Alexis Salazar Flores
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
raul.salazar@unach.edu.ec
https://orcid.org/0000-0001-6483-2613

Jennifer Elizabeth Pino Arguello
Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba - Ecuador
jdbpinoq@gmail.com
https://orcid.org/0009-0004-8386-5786

***Correspondencia:**
pacheco.luisfl@gmail.com

Cómo citar este artículo:
Pacheco, L., Pacheco, A., Salazar, R., & Pino, J. (2026). Reutilización sostenible de aguas residuales para usos urbanos y agrícolas. *Esprint Investigación, 5*(2), 466-478. https://doi.org/10.61347/ei.v5i2.384

Recibido: *1 de septiembre de 2026*
Aceptado: *2 de octubre de 2026*
Publicado: *7 de octubre de 2026*

Copyright: Derechos de autor 2026 Luis Felipe Pacheco Logroño, Andrés Francisco Pacheco Logroño, Raúl Alexis Salazar Flores, Jennifer Elizabeth Pino Arguello.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: La creciente demanda de agua y la presión ejercida sobre las fuentes hídricas convencionales han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para su conservación y aprovechamiento. El objetivo de esta revisión fue analizar las principales técnicas, tecnologías y aplicaciones de la reutilización sostenible de aguas residuales en los ámbitos urbano y agrícola, considerando sus beneficios, riesgos y desafíos. Se realizó una revisión de literatura de carácter descriptivo y documental, mediante la consulta de bases de datos científicas y fuentes especializadas relacionadas con el tratamiento y reúso de aguas residuales. Los resultados evidenciaron que tecnologías como los humedales construidos, la fitorremediación, los biorreactores de membrana, los sistemas anaerobios de membrana, la desinfección UV-C, la ósmosis inversa y los sistemas de recuperación de recursos ofrecen distintas posibilidades para mejorar la calidad del efluente y favorecer su aprovechamiento. Las principales aplicaciones identificadas correspondieron al riego agrícola, el mantenimiento de áreas verdes, la descarga de sanitarios, el lavado industrial y otros usos urbanos. Entre los principales desafíos se encontraron la calidad del agua, los riesgos microbiológicos y químicos, los costos de infraestructura, la aceptación social y los requerimientos regulatorios. Se concluye que la reutilización de aguas residuales constituye una estrategia viable para reducir la presión sobre las fuentes convencionales y avanzar hacia una gestión hídrica más eficiente, segura y circular.

Palabras clave: Aguas residuales, economía circular, gestión hídrica, reúso agrícola, reutilización del agua.

Abstract: *The growing demand for water and the pressure exerted on conventional water sources have driven the search for sustainable alternatives for their conservation and use. The objective of this review was to analyze the main techniques, technologies, and applications of sustainable wastewater reuse in urban and agricultural settings, considering their benefits, risks, and challenges. A descriptive and documentary literature review was conducted through consultation of scientific databases and specialized sources related to wastewater treatment and reuse. The results showed that technologies such as constructed wetlands, phytoremediation, membrane bioreactors, anaerobic membrane systems, UV-C disinfection, reverse osmosis, and resource recovery systems offer different possibilities for improving effluent quality and promoting its subsequent use. The main applications identified included agricultural irrigation, maintenance of green areas, toilet flushing, industrial washing, and other urban uses. The principal challenges were related to water quality, microbiological and chemical risks, infrastructure costs, social acceptance, and regulatory requirements. It is concluded that wastewater reuse constitutes a viable strategy for reducing pressure on conventional water sources and advancing toward more efficient, safe, and circular water management.*

Keywords*: Agricultural reuse, circular economy, wastewater, water management, water reuse.*

1. Introducción

El agua constituye un recurso esencial para la vida, la seguridad alimentaria, el desarrollo económico y el mantenimiento de los ecosistemas. Su disponibilidad y calidad condicionan la satisfacción de las necesidades humanas y el desarrollo de actividades agrícolas, industriales y urbanas. Sin embargo, el crecimiento demográfico, la expansión económica y los cambios en los patrones de consumo han intensificado la presión sobre las fuentes de agua dulce, particularmente en territorios con limitada disponibilidad hídrica e infraestructura de saneamiento insuficiente (Mendoza-Retana et al., 2021).

La creciente demanda de agua evidencia la magnitud de esta problemática. Durante los últimos 120 años, el consumo mundial se ha multiplicado considerablemente, mientras que en las últimas décadas la demanda ha mantenido una tendencia sostenida al crecimiento. La agricultura concentra una proporción significativa de las extracciones de agua dulce y continuará requiriendo mayores volúmenes para responder al incremento proyectado de la producción de alimentos. Este escenario plantea la necesidad de mejorar la eficiencia hídrica e incorporar fuentes alternativas para disminuir la presión sobre los recursos convencionales (Ochoa & Jato-Espino, 2025).

En este contexto, las aguas residuales han adquirido importancia como recurso hídrico no convencional susceptible de tratamiento y aprovechamiento. Estas se originan en actividades domésticas, comerciales, industriales y agrícolas, por lo que su composición puede incluir materia orgánica, microorganismos, nutrientes, productos químicos y otros contaminantes. Cuando son descargadas sin tratamiento adecuado, pueden deteriorar la calidad de los cuerpos receptores y generar riesgos ambientales y sanitarios. Por esta razón, su gestión constituye un componente fundamental de las estrategias contemporáneas de sostenibilidad hídrica (Malavé et al., 2016; García, 2025).

La reutilización de aguas residuales tratadas representa una alternativa para reducir la dependencia de fuentes convencionales y favorecer un aprovechamiento más eficiente del recurso. Su tratamiento comprende procesos físicos, químicos y biológicos orientados a disminuir la carga contaminante hasta alcanzar niveles compatibles con el destino previsto. En ambientes urbanos, el agua regenerada puede utilizarse en riego de áreas verdes, descarga de sanitarios y sistemas de enfriamiento, mientras que en la agricultura constituye una fuente complementaria para el riego cuando se garantiza una calidad apropiada (Bello, 2023; Mendoza-Retana et al., 2021).

El desarrollo tecnológico ha ampliado las posibilidades de tratamiento, recuperación y reutilización de las aguas residuales. Entre las alternativas disponibles se encuentran los humedales construidos, los sistemas de fitorremediación, los procesos biológicos y las tecnologías avanzadas capaces de mejorar la eliminación de contaminantes específicos (Celi et al., 2025; Fernández-Viveros et al., 2025). Paralelamente, la recuperación de energía, nutrientes y otros recursos ha favorecido la transición desde un modelo centrado exclusivamente en la depuración hacia esquemas vinculados con los principios de la economía circular (Alcaraz-Ibarra et al., 2026).

Desde esta perspectiva, las plantas de tratamiento pueden concebirse como sistemas destinados no solamente a reducir la contaminación, sino también a recuperar recursos y favorecer su reincorporación a nuevos ciclos productivos. La planificación de estas infraestructuras requiere integrar criterios técnicos, ambientales, económicos, territoriales y sociales para seleccionar alternativas compatibles con las condiciones de cada contexto. En este sentido, herramientas como los sistemas de información geográfica, el análisis multicriterio y la evaluación del ciclo de vida permiten fortalecer los procesos de decisión asociados con el tratamiento y la reutilización del agua (Arrieta & Rivera, 2026; Ochoa & Jato-Espino, 2025).

A pesar de sus beneficios potenciales, el reúso de aguas residuales todavía enfrenta limitaciones relacionadas con la calidad del efluente, los costos de infraestructura y operación, la presencia de contaminantes, la aceptación social y las exigencias regulatorias. En el ámbito agrícola, además, deben considerarse los posibles efectos derivados de microorganismos patógenos, metales pesados y otros compuestos capaces de afectar el suelo, los cultivos y la salud humana (Cruz et al., 2026; Hernández, 2024). Por tanto, la selección de tecnologías debe responder al origen del agua residual, al nivel de tratamiento requerido y al uso final previsto.

En función de estas consideraciones, resulta necesario sistematizar la evidencia disponible sobre las tecnologías de tratamiento y las alternativas de reutilización sostenible de aguas residuales en diferentes contextos productivos y urbanos. El análisis conjunto de sus aplicaciones, beneficios, riesgos y limitaciones puede aportar criterios para orientar decisiones vinculadas con la gestión eficiente y circular del recurso hídrico. Por ello, el objetivo de esta revisión es analizar las principales tecnologías y aplicaciones de la reutilización sostenible de aguas residuales para usos urbanos y agrícolas, identificando sus aportes a la gestión eficiente del agua y los principales desafíos que condicionan su implementación.

2. Metodología

Se realizó una revisión de literatura de carácter descriptivo y documental, orientada a analizar la reutilización sostenible de aguas residuales en los ámbitos urbano y agrícola. El estudio permitió identificar, organizar y sintetizar información relacionada con las principales alternativas de tratamiento, las tecnologías sostenibles disponibles, las aplicaciones del agua regenerada y los riesgos y desafíos asociados con su reutilización.

La búsqueda de información se efectuó en Scopus, ScienceDirect, SciELO y Google Scholar, complementándose con documentos técnicos de organismos internacionales. Se priorizaron artículos científicos, revisiones de literatura, estudios de caso e informes institucionales relacionados con el tratamiento y reúso de aguas residuales. Para la recuperación de información se emplearon términos en español e inglés vinculados con aguas residuales, reutilización de aguas residuales, agua regenerada, tratamiento de aguas residuales, reúso agrícola, reúso urbano, *wastewater reuse*, *sustainable wastewater management* y *wastewater treatment technologies*.

Como criterios de inclusión, se consideraron publicaciones que abordaran de manera directa el tratamiento, la recuperación o la reutilización de aguas residuales, así como estudios relacionados con aplicaciones agrícolas, urbanas o industriales. También se incluyeron investigaciones sobre tecnologías convencionales, sostenibles o avanzadas de tratamiento y estudios de caso que aportaran evidencia sobre beneficios, eficiencia, riesgos o limitaciones del reúso.

Se priorizaron documentos publicados en años recientes, aunque también se incorporaron referencias anteriores cuando proporcionaban fundamentos conceptuales o antecedentes relevantes para el tema. Se excluyeron registros duplicados, publicaciones sin relación directa con el objetivo de la revisión y fuentes que no aportaran información suficiente sobre el tratamiento, la recuperación o el aprovechamiento de aguas residuales.

La información seleccionada se organizó y sintetizó de acuerdo con cuatro ejes temáticos: tecnologías para el tratamiento y regeneración del agua, aplicaciones de reutilización, beneficios y aportes a la sostenibilidad, y retos y riesgos asociados. Posteriormente, los resultados de los estudios se compararon de manera cualitativa, considerando las características de cada tecnología, el uso previsto del agua tratada, sus principales ventajas y las condiciones necesarias para garantizar un reúso seguro.

A partir de este proceso, la revisión permitió integrar la evidencia disponible y establecer una visión general sobre el potencial de las aguas residuales como fuente hídrica no convencional dentro de una gestión sostenible del recurso. El análisis se centró en identificar patrones, coincidencias y diferencias entre los estudios seleccionados, con énfasis en su aplicabilidad en contextos urbanos y agrícolas y en las condiciones que favorecieron o limitaron su implementación.

3. Resultados

Técnicas y tecnologías sostenibles para el tratamiento y recuperación de aguas residuales

La evidencia analizada mostró que la reutilización de aguas residuales se ha consolidado como una estrategia orientada a ampliar la disponibilidad hídrica y disminuir la presión sobre las fuentes convencionales. Aunque su aprovechamiento posee antecedentes históricos, su incorporación dentro de los sistemas modernos de gestión del agua adquirió mayor relevancia a partir del desarrollo de tecnologías capaces de mejorar la calidad de los efluentes y permitir su utilización posterior en diferentes actividades productivas (Melián-Navarro & Fernández-Zamudio, 2016).

Los estudios revisados evidenciaron una transición desde modelos centrados exclusivamente en la eliminación de contaminantes hacia enfoques vinculados con la economía circular. Bajo esta perspectiva, el tratamiento de las aguas residuales incorporó principios de reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de recursos, permitiendo aprovechar agua, nutrientes y energía. La selección tecnológica dependió principalmente de la composición del efluente, el uso final previsto, los costos operativos y las condiciones ambientales y territoriales de cada contexto (García, 2025; Alcaraz-Ibarra et al., 2026).

Entre las tecnologías basadas en procesos naturales destacaron los humedales construidos, los cuales integraron mecanismos físicos, químicos y biológicos mediante la interacción entre vegetación, microorganismos y sustratos filtrantes. Estos sistemas presentaron bajos requerimientos energéticos y operativos, por lo que fueron especialmente apropiados para zonas rurales o espacios con disponibilidad de terreno. Se identificaron configuraciones de flujo superficial y subsuperficial, estas últimas con circulación horizontal o vertical según el diseño empleado (Morató et al., 2006; Fernández-Viveros et al., 2025).

La fitorremediación constituyó otra alternativa sostenible basada en la capacidad de determinadas plantas y microorganismos asociados a sus raíces para absorber, inmovilizar o transformar contaminantes. Los estudios reportaron su aplicación para reducir nutrientes, materia orgánica, metales y otros compuestos presentes en aguas residuales. Sus principales ventajas estuvieron relacionadas con el reducido consumo energético, la menor complejidad operativa y la posibilidad de implementarse en sistemas de tratamiento de bajo costo (Celi et al., 2025; Fallain et al., 2025).

Entre las tecnologías avanzadas se identificaron los biorreactores de membrana (MBR), que combinaron procesos biológicos con sistemas de filtración para producir efluentes de elevada calidad. Su capacidad para retener sólidos, microorganismos y otros contaminantes favoreció su aplicación cuando se requirió agua regenerada con características controladas. No obstante, su implementación estuvo condicionada por mayores requerimientos tecnológicos, operativos y económicos en comparación con los sistemas naturales o convencionales (García, 2025).

Los biorreactores anaerobios de membrana (AnMBR) integraron la degradación anaerobia de la materia orgánica con sistemas de separación por membranas, proporcionando simultáneamente tratamiento y recuperación energética. La producción de biogás representó una de sus principales ventajas, junto con la reducción de lodos y la conservación parcial de nutrientes como nitrógeno y

fósforo. Estas características incrementaron su potencial para aplicaciones agrícolas mediante fertirrigación y para esquemas de recuperación de recursos vinculados con la economía circular (Monsalvo, 2024).

Los tratamientos terciarios incorporaron tecnologías como la radiación UV-C y la ósmosis inversa, utilizadas cuando el destino del agua regenerada requirió mayores niveles de calidad microbiológica y fisicoquímica. La radiación ultravioleta permitió disminuir la presencia de microorganismos, mientras que la ósmosis inversa facilitó la separación de sustancias disueltas y otros contaminantes. Su aplicación resultó especialmente relevante en sistemas urbanos, industriales y agrícolas sometidos a requisitos sanitarios más estrictos (Bello, 2023; Arrieta & Rivera, 2026).

Las lagunas de estabilización representaron una alternativa de tratamiento natural caracterizada por su bajo consumo energético y costos operativos relativamente reducidos. Estos sistemas aprovecharon procesos de sedimentación, actividad microbiana y acción de algas para disminuir sólidos, materia orgánica y determinados microorganismos. Aunque mostraron ventajas para comunidades rurales y pequeñas poblaciones, su principal limitación estuvo relacionada con la necesidad de disponer de superficies extensas para su implementación (Malavé et al., 2016).

Los procesos de sedimentación y aireación continuaron desempeñando una función relevante dentro de los sistemas convencionales de tratamiento. La sedimentación permitió separar sólidos suspendidos mediante decantación, mientras que la aireación favoreció la actividad microbiana responsable de degradar la materia orgánica. Ambas tecnologías fueron utilizadas como etapas preliminares o intermedias antes de tratamientos avanzados destinados a mejorar la calidad del efluente y ampliar sus posibilidades de reutilización (Pérez et al., 2020; Torres & Lozano, 2017).

La recuperación de recursos también adquirió importancia dentro de los sistemas modernos de depuración, particularmente mediante procesos que permitieron transformar la materia orgánica en energía y recuperar nutrientes presentes en las aguas residuales. Estas estrategias modificaron la concepción tradicional de las plantas de tratamiento, orientándolas hacia sistemas de valorización capaces de producir biogás, recuperar compuestos útiles y reducir la dependencia de recursos externos (Alcaraz-Ibarra et al., 2026; Tang et al., 2019).

Por otra parte, la acuaponía urbana integró la acuicultura y la hidroponía mediante sistemas de recirculación en los que los residuos metabólicos de los peces aportaron nutrientes para el desarrollo vegetal. Esta alternativa permitió utilizar el agua de manera continua, disminuir la necesidad de fertilizantes y favorecer la producción alimentaria en espacios urbanos reducidos. Su implementación mostró potencial para fortalecer modelos productivos sostenibles basados en el aprovechamiento eficiente del agua y los nutrientes (Guarnizo & Contreras, 2023).

Finalmente, las tecnologías electroquímicas mostraron aplicaciones relevantes en procesos avanzados de tratamiento debido a su capacidad para remover contaminantes mediante reacciones inducidas eléctricamente. Entre estas alternativas se encontraron la electrooxidación, la electrocoagulación y la electroflotación, empleadas para degradar, separar o remover diferentes sustancias presentes en el agua. Su utilización amplió las posibilidades de tratamiento avanzado, aunque estuvo asociada con requerimientos energéticos y tecnológicos específicos (Tang et al., 2019).

Aplicaciones de la reutilización del agua en entornos urbanos y agrícolas

Los estudios analizados identificaron diversas aplicaciones de las aguas residuales tratadas en los sectores agrícola, urbano e industrial. La viabilidad de cada alternativa dependió principalmente de la

calidad alcanzada por el efluente, del tipo de tratamiento empleado y de los requerimientos sanitarios asociados con el uso final. Las aplicaciones encontradas abarcaron desde el riego agrícola y de áreas verdes hasta usos industriales, sanitarios, sistemas contra incendios y actividades vinculadas con la recuperación de nutrientes.

La tabla 1 sintetiza las principales aplicaciones identificadas en la literatura, especificando la estrategia de reutilización, el uso sostenible propuesto, los beneficios potenciales y las principales limitaciones para su implementación. Esta comparación permitió observar que los beneficios se concentraron en la reducción del consumo de agua convencional, la recuperación de recursos y la disminución de la presión hídrica, mientras que las principales restricciones estuvieron asociadas con la calidad del agua, los costos, los contaminantes y los requerimientos sanitarios.

Tabla 1

Principales aplicaciones de la reutilización de aguas residuales tratadas en entornos urbanos y agrícolas

Estrategia	Aplicación sostenible	Beneficios principales	Limitaciones
Saneamiento ecológico y recuperación de nutrientes en origen (Chamat, 2024)	Separación, tratamiento y aprovechamiento de excretas humanas para producir fertilizantes y abonos orgánicos o utilizarlos mediante fertirrigación.	Favorece la recuperación de nitrógeno y fósforo, disminuye la carga contaminante y reduce el consumo de fertilizantes sintéticos.	Puede existir presencia de residuos farmacéuticos, microorganismos y contaminantes emergentes; requiere tratamiento adecuado y aceptación social.
Recuperación de recursos procedentes de lodos (Monsalvo, 2024)	Recuperación de sales de hierro y aluminio para su reutilización en tratamiento, precipitación de fósforo y limpieza de biogás.	Reduce la disposición de lodos, recupera materiales y disminuye el consumo de nuevos reactivos.	Requiere procesos adicionales de filtración, acidificación y control de calidad.
Tratamiento natural de aguas grises (Chamat, 2024)	Empleo de humedales construidos, techos verdes y sistemas vegetales para tratar agua procedente de actividades domésticas.	Reduce el consumo energético, permite reutilizar agua y favorece la conservación de fuentes convencionales.	Requiere infraestructura específica, mantenimiento periódico y espacio disponible.
Reúso para riego agrícola (Alcaraz-Ibarra et al., 2026)	Utilización de aguas residuales tratadas para el riego de cultivos.	Proporciona una fuente alternativa de agua y disminuye la presión sobre las fuentes convencionales.	Exige tratamientos que garanticen calidad microbiológica y química compatible con el cultivo y el sistema de riego.
Riego de áreas verdes (Veliz et al., 2009)	Uso de agua regenerada en parques, jardines públicos y campos deportivos.	Sustituye parcialmente el agua potable y aprovecha el efluente tratado en espacios urbanos.	Requiere baja turbiedad, control de sólidos y medidas sanitarias cuando existe exposición humana.
Actividades industriales (Veliz et al., 2009)	Utilización en torres de enfriamiento, alimentación de calderas y determinados procesos industriales.	Reduce el consumo de agua convencional dentro de las operaciones industriales.	La calidad necesaria varía según el proceso y puede requerir tratamientos avanzados.
Descarga de sanitarios (Bello, 2023)	Uso de agua regenerada en inodoros y urinarios.	Reduce la demanda de agua potable en edificios y favorece la gestión circular del recurso.	Requiere tratamiento apropiado y redes independientes que eviten conexiones con el agua potable.
Sistemas contra incendios (Trapote-Jaume, 2016)	Abastecimiento de redes destinadas a protección contra incendios.	Reduce el empleo de agua potable en actividades que demandan grandes volúmenes.	Deben controlarse características que puedan producir corrosión, obstrucciones o deterioro de equipos.

Lavado industrial de vehículos (Trapote-Jaume, 2016)	Uso de agua regenerada para lavado de vehículos, maquinaria y equipos.	Reduce el consumo de agua fresca en actividades de limpieza.	Requiere control de sólidos, olores y sustancias capaces de afectar los equipos.
Riego de pastos para alimentación animal (Trapote-Jaume, 2016)	Riego de pastizales destinados a ganado productor de carne o leche.	Reduce el uso de fuentes convencionales y favorece el aprovechamiento agrícola del efluente.	Requiere control microbiológico y químico por el riesgo de transferencia de contaminantes a la cadena alimentaria.

Ejemplos internacionales de reutilización y aprovechamiento de aguas residuales

Los casos internacionales identificados mostraron que las estrategias de reutilización se adaptaron a las características hídricas, territoriales y productivas de cada país. En México se documentaron experiencias relacionadas con humedales construidos y recuperación de biogás, mientras que en Colombia se identificaron aplicaciones vinculadas con la acuaponía. Por su parte, Túnez presentó experiencias consolidadas de reutilización planificada de aguas residuales tratadas para diferentes actividades agrícolas y urbanas.

En México, el humedal construido del Instituto Tecnológico de Boca del Río estuvo conformado por siete celdas de tratamiento y presentó una capacidad aproximada de 31,5 m^3/día. Los resultados del monitoreo indicaron que el sistema permitió alcanzar condiciones compatibles con los estándares nacionales aplicables al reúso agrícola. Este caso evidenció la factibilidad de utilizar humedales construidos como alternativas de tratamiento de bajo requerimiento energético y potencial aplicación en contextos con disponibilidad de espacio (Fernández-Viveros et al., 2025).

También en México, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Metropolitana San Jerónimo, localizada en Guanajuato, incorporó digestión anaerobia para transformar los lodos generados durante el tratamiento en biogás. Posteriormente, este recurso fue utilizado para generar electricidad, permitiendo cubrir aproximadamente el 10 % de la demanda energética de la instalación. El caso mostró el potencial de integrar tratamiento y recuperación energética dentro de modelos de economía circular aplicados a las aguas residuales (Alcaraz-Ibarra et al., 2026).

En Colombia, un sistema acuapónico piloto desarrollado en la región Caribe integró la producción de tilapia roja con diferentes especies vegetales durante un periodo de 150 días. La experiencia reportó una producción de 84,2 kg de biomasa, una supervivencia del 92,8 % y un peso promedio de 302 ± 92 g. Estos resultados evidenciaron el potencial de la acuaponía para aprovechar eficientemente el agua y el espacio, aunque también mostraron la necesidad de optimizar la densidad de cultivo y la competencia por alimento (Guarnizo & Contreras, 2023).

Túnez constituyó otro referente de reutilización planificada, debido a que una proporción aproximada de entre el 30 % y el 43 % de las aguas residuales tratadas se destinó al riego de cerca de 8100 ha de cultivos y áreas verdes. El país incorporó el reúso dentro de su planificación hídrica desde la década de 1980 y posteriormente amplió su aplicación hacia campos de golf, actividades industriales, recarga de acuíferos y riego forestal, mostrando una estrategia diversificada de aprovechamiento del recurso (Winpenny et al., 2013).

Retos, riesgos y perspectivas de la reutilización sostenible del agua

Los estudios analizados evidenciaron que la reutilización de aguas residuales presenta beneficios importantes, pero también riesgos y limitaciones que condicionan su implementación. En el ámbito

agrícola, el principal desafío correspondió a garantizar que el agua utilizada haya recibido un tratamiento adecuado, debido a que el empleo directo de efluentes insuficientemente tratados puede favorecer la acumulación progresiva de contaminantes en los suelos y afectar posteriormente a los cultivos y consumidores (Mendoza-Retana et al., 2021).

Los factores económicos constituyeron otra limitación relevante, debido a que los sistemas de reúso requieren infraestructura para tratamiento, almacenamiento, distribución y transporte del agua regenerada. A ello se añadieron diferencias en la respuesta de los cultivos, requerimientos particulares según el tipo de aplicación y posibles dificultades derivadas de la mezcla del agua regenerada con otras fuentes. Estas condiciones evidenciaron que la viabilidad de los proyectos dependió tanto de criterios técnicos como de factores económicos y territoriales (Melián-Navarro & Fernández-Zamudio, 2016).

La gestión institucional y los marcos regulatorios también influyeron en la aplicación de estos sistemas. La reutilización puede implicar relaciones entre agricultores, municipios, prestadores de servicios y otros usuarios, especialmente cuando existen derechos previamente establecidos sobre las fuentes hídricas. En consecuencia, los estudios destacaron la necesidad de establecer normativas claras respecto a la calidad del agua, los derechos de utilización, los mecanismos de transferencia y las responsabilidades asociadas con el tratamiento y distribución del recurso (Winpenny et al., 2013).

Desde la perspectiva ambiental, la presencia de metales pesados, como cadmio, plomo y cromo, representó uno de los riesgos más relevantes cuando el tratamiento resultó insuficiente. Estos elementos pueden acumularse en los suelos, ser absorbidos por los cultivos e incorporarse posteriormente a la cadena alimentaria. La exposición prolongada ha sido relacionada con diferentes efectos adversos sobre la salud, lo que refuerza la necesidad de implementar procesos de tratamiento y monitoreo acordes con el destino final del agua regenerada (Cruz et al., 2026).

La contaminación microbiológica constituyó igualmente un factor determinante para la seguridad del reúso. Las aguas residuales pueden contener bacterias, virus y protozoos capaces de permanecer en los efluentes cuando los procesos de tratamiento o desinfección resultan insuficientes. Por esta razón, la evaluación microbiológica y el control de microorganismos indicadores constituyeron elementos fundamentales para reducir los riesgos sanitarios, especialmente cuando el agua regenerada se destinó al riego agrícola o a usos urbanos con posibilidad de contacto humano (Hernández, 2024; Malavé et al., 2016).

En conjunto, los resultados mostraron que el futuro de la reutilización sostenible dependerá de combinar tecnologías adecuadas, sistemas de monitoreo, regulación efectiva e infraestructura adaptada a las condiciones locales. La evidencia revisada indicó que las aguas residuales pueden constituir una fuente hídrica complementaria y, simultáneamente, un recurso para recuperar nutrientes y energía. Sin embargo, su aprovechamiento sostenible requiere garantizar la calidad del efluente, controlar los riesgos sanitarios y ambientales y asegurar la viabilidad técnica y económica de los sistemas.

4. Discusión

La creciente demanda de agua, asociada con el crecimiento poblacional, la expansión agrícola y el desarrollo industrial, incrementa la presión sobre los recursos hídricos disponibles. La agricultura mantiene una elevada dependencia de fuentes superficiales y subterráneas, cuya explotación intensiva puede reducir las reservas y favorecer procesos de contaminación y salinización. En este escenario, los resultados obtenidos respaldan la necesidad de diversificar las fuentes de abastecimiento mediante alternativas que reduzcan la dependencia de los recursos convencionales. Esta necesidad adquiere

mayor relevancia frente al cambio climático, cuyos efectos sobre las sequías, la evaporación y los patrones de precipitación pueden intensificar la vulnerabilidad hídrica (Curbelo et al., 2022).

La reutilización de aguas residuales tratadas surge, por tanto, como una alternativa cuya conveniencia depende del equilibrio entre los beneficios ambientales, económicos y sociales y los costos asociados con el tratamiento y la infraestructura. Los hallazgos de esta revisión muestran que su valor no radica únicamente en sustituir parcialmente el agua convencional, sino también en evitar descargas contaminantes y reincorporar el recurso dentro de ciclos productivos. Esta interpretación coincide con Melián-Navarro y Fernández-Zamudio (2016), quienes señalan que el reúso puede generar beneficios a mediano y largo plazo; sin embargo, su viabilidad debe evaluarse según las condiciones territoriales, tecnológicas y económicas de cada aplicación.

En el ámbito agrícola, el agua regenerada puede fortalecer la seguridad hídrica al proporcionar una fuente relativamente estable durante el año y reducir la dependencia de recursos sometidos a variaciones estacionales. Su contenido de nutrientes también puede disminuir parcialmente los requerimientos de fertilización, mientras que la sustitución de agua subterránea puede reducir los costos derivados del bombeo (Winpenny et al., 2013). No obstante, estos beneficios no son automáticos, debido a que dependen de la calidad del efluente, del tipo de cultivo y de la relación entre los costos de tratamiento y el valor económico de la producción. En consecuencia, el reúso agrícola debe analizarse como una estrategia condicionada por factores técnicos y económicos, y no únicamente como una solución frente a la escasez.

La calidad del agua constituye uno de los principales criterios para determinar la seguridad y viabilidad de la reutilización. La evaluación de parámetros físicos, químicos y microbiológicos permite identificar contaminantes y establecer el nivel de tratamiento requerido según el destino del agua regenerada. Devia (2026) destaca que la gestión sostenible del recurso requiere ajustar las alternativas tecnológicas a las necesidades específicas de cada sistema, lo que coincide con los resultados de esta revisión sobre la necesidad de diferenciar los requerimientos del reúso agrícola, urbano e industrial. Además, la presencia de metales pesados, microorganismos u otros contaminantes evidencia que incrementar la disponibilidad hídrica mediante reúso debe acompañarse de sistemas permanentes de control y monitoreo (Cruz et al., 2026; Hernández, 2024).

Esta exigencia de calidad explica por qué las tecnologías identificadas no deben interpretarse como alternativas equivalentes, sino como opciones complementarias cuya pertinencia depende de las características del efluente y del uso previsto. Los humedales construidos y la fitorremediación presentan ventajas relacionadas con un menor consumo energético y una operación relativamente sencilla, mientras que los tratamientos con membranas y los procesos avanzados permiten alcanzar niveles superiores de depuración cuando existen mayores exigencias sanitarias (Celi et al., 2025; Fernández-Viveros et al., 2025). Por ello, la selección tecnológica requiere equilibrar eficiencia de remoción, costos, disponibilidad de espacio, capacidad operativa y calidad final requerida.

Otro aspecto relevante derivado de los resultados es la transición desde un enfoque centrado exclusivamente en la depuración hacia un modelo de recuperación de recursos. La obtención de biogás, el aprovechamiento de nutrientes y la reincorporación del agua tratada a actividades productivas permiten vincular la gestión de aguas residuales con los principios de la economía circular. Alcaraz-Ibarra et al. (2026) señalan que esta transformación puede convertir las plantas de tratamiento en sistemas de recuperación de agua, energía y nutrientes. Sin embargo, la expansión de estos modelos depende de superar limitaciones relacionadas con infraestructura, escalabilidad tecnológica, inversión y capacidad institucional para garantizar su funcionamiento a largo plazo.

La dimensión social e institucional también condiciona la implementación del reúso, debido a que la disponibilidad de tecnología no garantiza por sí misma su adopción. La aceptación de los usuarios, la percepción del riesgo, la existencia de normativas específicas y la definición de responsabilidades sobre la calidad y distribución del agua regenerada influyen directamente en la sostenibilidad de los proyectos. En este sentido, Winpenny et al. (2013) advierten que los sistemas de reutilización requieren estructuras regulatorias y de gobernanza capaces de articular a agricultores, autoridades, prestadores de servicios y demás usuarios. Esto demuestra que el reúso debe abordarse como un problema multidimensional y no exclusivamente tecnológico.

En conjunto, la evidencia analizada permite sostener que la reutilización sostenible de aguas residuales puede contribuir simultáneamente a la seguridad hídrica, la disminución de descargas contaminantes y la recuperación de recursos, siempre que su implementación responda a criterios de calidad, viabilidad económica y protección sanitaria y ambiental. Esta perspectiva resulta coherente con la necesidad de gestionar el agua considerando su disponibilidad, consumo, contaminación y destino posterior a su utilización (Poblete et al., 2023). Por consiguiente, el principal desafío no consiste únicamente en ampliar el volumen de agua reutilizada, sino en desarrollar sistemas técnicamente adecuados, económicamente viables y ambientalmente seguros que permitan integrar el reúso dentro de una gestión circular y sostenible del recurso hídrico.

5. Conclusiones

La reutilización sostenible de aguas residuales adquiere especial relevancia frente al crecimiento de la demanda hídrica y la presión ejercida sobre las fuentes convencionales. La agricultura, las actividades urbanas y la industria requieren volúmenes crecientes de agua, mientras que la sobreexplotación de acuíferos y los efectos del cambio climático comprometen su disponibilidad. En este contexto, el reúso de aguas previamente tratadas constituye una estrategia complementaria para ampliar la disponibilidad del recurso, reducir el desperdicio y disminuir la presión sobre las fuentes naturales.

Las tecnologías analizadas evidenciaron que el tratamiento de aguas residuales puede adaptarse a diferentes condiciones ambientales, económicas y operativas. Los humedales construidos y la fitorremediación ofrecen alternativas de menor complejidad tecnológica, mientras que los biorreactores de membrana, los sistemas anaerobios y las tecnologías electroquímicas permiten alcanzar mayores niveles de depuración y recuperación de recursos. Por tanto, la selección tecnológica debe responder al origen y composición del agua residual, al nivel de calidad requerido, a la disponibilidad de infraestructura y al uso final del agua regenerada.

Las aplicaciones identificadas confirmaron que el agua tratada puede reincorporarse a actividades agrícolas, urbanas e industriales, entre ellas el riego de cultivos y áreas verdes, la descarga de sanitarios, el lavado de vehículos y determinados procesos productivos. Estos usos demuestran que las aguas residuales pueden trascender su condición de desecho y convertirse en una fuente hídrica alternativa dentro de esquemas de economía circular. Su aprovechamiento adecuado permite mejorar la eficiencia del recurso y favorecer una gestión más sostenible del agua.

No obstante, la reutilización segura depende del control de factores que pueden limitar su implementación, entre ellos los riesgos microbiológicos, la presencia de metales pesados y otros contaminantes, los costos de tratamiento, la infraestructura disponible, la aceptación social y el marco regulatorio. En consecuencia, el monitoreo de la calidad del efluente y la correspondencia entre el tratamiento aplicado y el uso previsto son condiciones indispensables para reducir riesgos y proteger la salud humana, los cultivos y los ecosistemas.

En conjunto, la evidencia revisada permite concluir que la reutilización sostenible de aguas residuales constituye una alternativa viable para fortalecer la seguridad hídrica, mejorar la eficiencia en el uso del agua y promover la recuperación de recursos, siempre que su implementación responda a criterios técnicos, económicos, sanitarios y ambientales. Más que incrementar la disponibilidad del recurso de manera aislada, el reto consiste en integrar el reúso dentro de modelos de gestión circular que garanticen calidad, seguridad y sostenibilidad a largo plazo.

Referencias

Alcaraz-Ibarra, S., González-Blanco, G., Peña-Ortiz, Z., Ávila-Andrade, A., Robles-Muñoz, J., & Beristain-Cardoso, R. (2026). Aguas residuales y la economía circular: Una revisión. En M. C. Martínez Rodríguez, H. G. Ramírez Escamilla, & D. Domínguez Solís (Coords.), *Economía circular mexicana* (Vol. 2, pp. 359–376). Comunicación Científica. https://doi.org/10.52501/cc.365.16

Arrieta, C., & Rivera, E. (2026). *Estado del arte sobre metodologías para la evaluación y localización óptima de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en entornos urbanos* [Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena]. https://hdl.handle.net/11227/22245

Bello, M. (2023). *Reacondicionamiento de edificios de oficinas mediante la integración de la agricultura y la reutilización de agua: Hacia una construcción sostenible y autosuficiente* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. https://doi.org/10.7764/tesisUC/ARQ/75134

Celi, R., Morales, E., & Andrade, C. (2025). Aplicación de la fitorremediación con macrófitas. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay, 30*(2), 103–113. https://doi.org/10.32480/rscp.2025.30.2.103113

Chamat, K. (2024). Saneamiento ecológico en áreas urbanas. Enfrentando el cambio climático con soluciones basadas en la naturaleza. *Bitácora Urbano Territorial, 34*(2), 114–125. https://doi.org/10.15446/bitacora.v34n2.113545

Cruz, R., Tejada Hinojoza, J., Bendezú, L., Magallanes, J., & Saldívar, J. (2026). Metales pesados en aguas residuales: Dinámica ambiental y riesgos para la salud y la agricultura. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias, 10*(29), 1–11. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i29.493

Curbelo, H., Díaz, D., & Torre, C. (2022). *Reutilización del agua en la agricultura: Una propuesta de solución desde el enfoque de la economía circular* [Trabajo de grado, Universidad de La Laguna]. https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/29137

Devia, Y. (2026). *Modelo de simulación computacional para la recirculación hídrica aplicada al riego agrícola sostenible* [Trabajo de grado, Universidad EAN]. https://hdl.handle.net/10882/19365

Fallain, A., Delgado, M., & Banchón, C. (2025). Islas flotantes como fitorremediación de aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Manabí-Bolívar. *Research, Society and Development, 14*(4), e5114448645. https://doi.org/10.33448/rsd-v14i4.48645

Fernández-Viveros, J., Adame-García, J., Rivera, S., Murillo-Cuevas, F., & Sandoval-Herazo, M. (2025). Los humedales construidos como estrategia de reúso de aguas residuales de cooperativas escolares rurales en agricultura. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad, 4*(3), 140–145. https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.654

García, S. (2025). Economía circular aplicada al agua: Perspectivas para el reciclaje y reutilización. *Sciencevolution, 1*(13), 29–38. https://doi.org/10.61325/ser.v1i13.160

Guarnizo, N., & Contreras, A. (2023). La acuaponía urbana: Fomentando la agricultura sostenible en entornos urbanos. *Revista Nodo, 18*(35), 20–29. https://doi.org/10.54104/nodo.v18n35.1616

Hernández, S. (2024). *Evaluación de los riesgos de un sistema de microalgas para la reutilización de las aguas tratadas para riego agrícola* [Trabajo de fin de máster, Universitat Politècnica de València]. http://hdl.handle.net/10251/206670

Malavé, A., Silva-Acuña, R., Martínez, M., & Barrios, R. (2016). *Riesgos asociados a las aguas residuales tratamiento y reutilización en los sistemas agrícolas*. Editorial Académica Española. https://agriculturaweb.es/wp-content/uploads/2021/04/riegos-aguas-residuales.pdf

Melián-Navarro, A., & Fernández-Zamudio, M. Á. (2016). Reutilización de agua para la agricultura y el medioambiente. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, (8), 80–92. https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3298

Mendoza-Retana, S., Cervantes-Vázquez, M., Valenzuela-Garcia, A., Guzmán-Silos, T., Orona-Castillo, I., & Cervantes-Vázquez, T. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12*(1), 115–126. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2789

Monsalvo, V. (2024). El verdadero valor del agua: Economía circular en el ciclo integral del agua. *Economistas*, (184), 116–129. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9392746

Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación, 3*(1), 19–29. https://hdl.handle.net/2117/185710

Ochoa, I., & Jato-Espino, D. (2025). Más allá del desagüe: Priorización de zonas agrícolas aptas para reutilización de aguas residuales mediante SIG y análisis multicriterio. *Ingeniería del Agua, 29*(4), 245–262. https://doi.org/10.4995/ia.2025.24096

Pérez, A., Espinoza, F., García, N., & Alfaro, K. (2020). Coagulación, floculación y sedimentación para la clarificación de aguas residuales. En *Innovación en biotecnología 2* (pp. 73–82). Red Iberoamericana de Academias de Investigación. https://redibai-myd.org/portal/wp-content/uploads/2021/01/607-8617-86-9.pdf

Poblete, E., Torres, N., & López, E. (2023). Reflexiones teóricas para una intervención de educación ambiental para el cuidado del agua. *Luna Azul*, (57), 67–87. https://doi.org/10.17151/luaz.2023.57.5

Tang, J., Zhang, C., Shi, X., Sun, J., & Cunningham, J. A. (2019). Municipal wastewater treatment plants coupled with electrochemical, biological and bio-electrochemical technologies: Opportunities and challenge toward energy self-sufficiency. *Journal of Environmental Management, 234*, 396–403. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.097

Torres, G., & Lozano, E. (2017). Disminución de sólidos de aguas grises mediante un proceso de aireación. *Ra Ximhai, 13*(3 Especial), 393–404. https://doi.org/10.35197/rx.13.03.2017.23.gt

Trapote-Jaume, A. (2016). Tecnologías de depuración y reutilización: Nuevos enfoques. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, (8), 48–60. https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3295

Veliz, E., Llanes, J., Asela, L., & Bataller , M. (2009). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, *40*(1), 35–44. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181221574007

Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernández, F., & Torricelli, R. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i1629s

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Luis Felipe Pacheco Logroño: Conceptualización, metodología, validación, investigación, gestión de datos, redacción -preparación del borrador original, redacción -revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, supervisión.

Andrés Francisco Pacheco Logroño: Conceptualización, metodología, software, análisis formal, investigación, visualización, redacción -preparación del borrador original, redacción -revisión y edición, financiamiento, recursos.

Raúl Alexis Salazar Flores: Software, validación, análisis formal, gestión de datos, visualización, redacción -preparación del borrador original, redacción -revisión y edición, financiamiento, supervisión.

Jennifer Elizabeth Pino Arguello: Metodología, análisis formal, investigación, redacción -preparación del borrador original, redacción -revisión y edición, financiamiento, recursos.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.