

16. Aguas residuales y la economía circular: Una revisión



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.16>

SERGIO ALCARAZ-IBARRA¹

GEHOVANA GONZÁLEZ-BLANCO²

ZOE PEÑA-ORTIZ³

ABIGAIL ÁVILA-ANDRADE⁴

JOAQUÍN ROLANDO ROBLES-MUÑOZ⁵

RICARDO BERISTAIN-CARDOSO⁶

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es un eje fundamental para garantizar la salud pública y la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, aún existen grandes desafíos: a nivel mundial, una gran parte del agua residual no se trata adecuadamente, y en México menos del 60% de las plantas operan de forma efectiva. Esto ha impulsado una transición desde un enfoque lineal, centrado en eliminar contaminantes, hacia un modelo de economía circular, que busca recuperar agua, energía y nutrientes. El objetivo del trabajo es presentar una revisión crítica sobre las tendencias tecnológicas emergentes aplicadas al tratamiento de aguas residuales en el contexto de la economía circular, con énfasis en el caso de México. Se analizan estrategias para la recuperación de biogás, nutrientes y el reúso de agua, evaluando su viabilidad técnica y económica. La metodología se basa en una revisión bibliográfica.

¹ Doctor en Ciencias del Agua por el Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2270-5741>

² Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora en la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3818-3458>

³ Licenciada en Biotecnología. Profesora en la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4238-0475>

⁴ Maestrante en Ciencias del Agua en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3704-7142>

⁵ Licenciado en Biotecnología en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3266-4838>

⁶ Doctor en Biotecnología. Profesor-investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1548-7678>

fica, enfocada en literatura científica y técnica reciente. Se abordan casos, como las plantas San Jerónimo (Guanajuato) y Atotonilco (Hidalgo), y se destacan tecnologías emergentes como la digestión anaerobia, la oxidación avanzada, el uso de Inteligencia Artificial, IoT y Big Data, en sistemas descentralizados. Entre los resultados, se resalta que México es el segundo país a nivel mundial en volumen de reúso de agua tratada. No obstante, gran parte del reúso se realiza sin tratamientos avanzados. También se identifican oportunidades desaprovechadas en la generación de energía a partir de biogás. Finalmente, se concluye que avanzar hacia un modelo circular requiere modernizar infraestructura, aplicar tecnologías sostenibles y garantizar su escalabilidad en condiciones reales.

Palabras clave: *aguas residuales; biogás; economía circular; recuperación de nutrientes.*

Introducción

Hoy en día, la gestión de las aguas residuales vive un cambio profundo. Estamos dejando atrás el modelo tradicional, que solo buscaba eliminar contaminantes, para dar paso a un enfoque mucho más inteligente: la economía circular, donde lo que antes era considerado un desecho ahora se ve como un recurso estratégico (WWAP, 2017). Esta transformación no es casual, responde a necesidades reales y urgentes: el impacto del cambio climático, la creciente escasez de agua y el ritmo acelerado de la urbanización nos exigen repensar la forma en que manejamos nuestros recursos.

La economía circular en el manejo del agua busca algo muy sencillo, pero poderoso: cerrar los ciclos de materiales y energía, recuperando el agua, los nutrientes y otros subproductos que antes se desperdiciaban (Verstraete et al., 2009). Gracias a este nuevo enfoque, el tratamiento de aguas residuales ya no es solo una tarea correctiva, sino una pieza clave para construir ciudades más resilientes, capaces de regenerar sus propios recursos y enfrentar los retos del futuro. Actualmente, contamos con biotecnologías y tecnologías avanzadas que permiten limpiar las aguas residuales hasta niveles que las hacen aptas para su reutilización en la agricultura, la indus-

tria, la recarga de acuíferos e incluso, en algunos casos, para consumo humano (Shannon et al., 2008). Además, los lodos generados pueden transformarse en biogás, fertilizantes agrícolas, bioplásticos y otros productos valiosos, mediante procesos como la digestión anaerobia y tratamientos térmicos (Batstone et al., 2015). Así, lo que antes era un desecho se convierte en nuevas oportunidades.

Este enfoque tecnológico complementa el curso natural del ciclo hidrológico, donde el agua circula continuamente en procesos de transporte, purificación y almacenamiento. El tratamiento de aguas residuales se integra a este ciclo al minimizar pérdidas y asegurar un retorno seguro del recurso al medio ambiente (Hernández-Chover et al., 2023). Históricamente, las normativas ambientales han exigido la remoción de compuestos carbonados y nutrientes (nitrógeno y fósforo) para proteger cuerpos receptores. Sin embargo, según Ghimire et al. (2021) la mayoría de las plantas de tratamiento actuales logran estos objetivos mediante procesos energéticamente ineficientes y un alto consumo de productos químicos, situación que resulta insostenible ante el crecimiento poblacional y las presiones urbanas.

En este contexto, surge la necesidad de procesos de tratamiento que vayan más allá de la simple eliminación de contaminantes, integrando la recuperación y reutilización de recursos como estrategias fundamentales (Guerra-Rodríguez et al., 2020; Ghimire et al., 2021). Este enfoque no solo reduce el consumo de materias primas y la generación de residuos, sino que también mejora la eficiencia energética y promueve una economía baja en carbono.

La economía circular, en su aplicación al sector hídrico, promueve los principios de Reducir, Reutilizar, Reciclar, Restaurar, Recuperar y Regenerar (6R) (Hernández-Chover et al., 2023). Mediante la implementación de estas estrategias, el tratamiento de aguas residuales aporta beneficios económicos y ambientales, tales como: (1) incremento de la disponibilidad de agua mediante su recuperación y reutilización, (2) reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, (3) mejora de la fertilidad de los suelos mediante la producción de fertilizantes orgánicos y (4) generación de valor económico a través de la valorización de subproductos (Mwizerwa et al., 2024; Hernández-Chover et al., 2023). Finalmente, la recuperación de energía y materiales permite mantener los recursos en circulación durante

más tiempo, mejorando la eficiencia global de los procesos y transformando lo que antes era considerado un desecho en un insumo vital para nuevos ciclos productivos (Zajac y Avdiushchenko, 2020; Ghimire et al., 2021).

En la perspectiva futura, la transformación de las aguas residuales se orienta hacia sistemas cada vez más inteligentes y sostenibles. El desarrollo de tratamientos descentralizados inteligentes, basados en el uso de Inteligencia Artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT) y análisis de datos en tiempo real, permitirá optimizar la operación de plantas de tratamiento, anticipar fallos, maximizar la recuperación de recursos y reducir el consumo energético (Kehrein et al., 2020). Simultáneamente, el concepto de economía circular hídrica en ciudades inteligentes impulsa un modelo donde el agua regenerada se integra plenamente en la estructura urbana, abasteciendo múltiples usos antes de retornar al ambiente, fortaleciendo así la resiliencia hídrica frente al cambio climático (Daigger, 2009).

Hacia 2050, se proyecta el avance hacia sistemas de “descarga cero”, donde las aguas residuales son completamente aprovechadas mediante procesos de regeneración avanzada, y el surgimiento del concepto de agua de cuarta generación, caracterizada por su alta eficiencia energética, recuperación integrada de nutrientes y adaptabilidad a usos múltiples (Olsson, 2012). Estas tendencias no solo redefinirán la gestión del agua, sino que transformarán a las aguas residuales en un motor estratégico para la sostenibilidad urbana y la transición hacia un modelo económico y ambiental verdaderamente regenerativo.

Aguas residuales en México: una mirada desde la sostenibilidad y la recuperación de recursos

En México, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) reporta que existen 2 642 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el país. Sin embargo, menos del 60% de ellas se encuentran actualmente en operación, y la mayoría utiliza procesos convencionales como lodos activados, lagunas de estabilización y filtros biológicos, como se muestra en la figura 16.1 (Conagua, 2022). A pesar de estos esfuerzos, el panorama es preocupante: según Nuñez-García et al. (2023), una gran parte de estas plantas están abando-

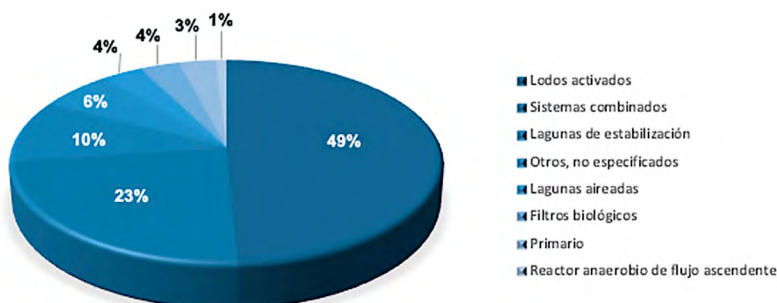
nadas o funcionan en condiciones muy precarias, principalmente por los elevados costos de mantenimiento, energía y operación. Esta situación refleja la urgente necesidad de modernizar y fortalecer la infraestructura de tratamiento de aguas en México.

Aunque los sistemas aerobios, como los lodos activados, han sido durante décadas la opción más utilizada para el tratamiento de aguas residuales, su alta demanda de energía, principalmente para la aireación, plantea importantes desafíos de sostenibilidad. En contraste, los procesos anaerobios ofrecen una alternativa más eficiente desde el punto de vista energético, ya que no requieren oxígeno y, además, generan biogás como subproducto, una fuente de energía renovable. Esta capacidad de tratar aguas residuales con un menor consumo energético y de contribuir a la recuperación de recursos posiciona a los sistemas anaerobios como piezas clave en la transición hacia un tratamiento de aguas más sostenible y circular.

Los procesos anaerobios aún no son una opción común para el tratamiento del agua residual; su uso se ha concentrado principalmente en la línea de tratamiento de lodos. De hecho, solo alrededor del 1% de las plantas de tratamiento opera con sistemas anaerobios, utilizando reactores de flujo ascendente como tecnología principal en la etapa secundaria (Sánchez-Tovar, 2023). A pesar del potencial que tienen estos sistemas, particularmente por la generación de biogás, son pocas las plantas que cuentan con la infraestructura adecuada para aprovechar esta energía, ya sea en forma de calor o para producir electricidad mediante cogeneración. Esto representa una oportunidad desaprovechada en la transición hacia un modelo de tratamiento más sostenible y autosuficiente.

Los procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales no se encuentran dentro de los más comunes para la línea de agua residual, sino que son empleados principalmente en la línea de tratamiento de lodos. En la figura 16.1 se puede observar que apenas el 1% de las PTAR operan bajo el esquema de tratamiento anaerobio, por medio de reactores anaerobios de flujo ascendente, como principal tratamiento secundario del agua residual (Sánchez-Tovar, 2023). Sin embargo, pocos son los sistemas anaerobios que poseen la infraestructura necesaria para el aprovechamiento del biogás que se genera, ya sea para la producción de calor y/o de energía eléctrica por medio de cogeneradores.

Figura 16.1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales



Fuente: elaboración propia con base en datos de Conagua (2022).

En los últimos años, han comenzado a incorporarse tecnologías innovadoras, especialmente en la etapa de tratamiento secundario, con el objetivo de ir más allá de solo limpiar el agua. Estas nuevas soluciones buscan recuperar nutrientes y aprovechar los subproductos del tratamiento, por ejemplo, para la producción de composta o la mejora de suelos (Nuñez-García et al., 2023). La idea es transformar las plantas de tratamiento de aguas residuales en verdaderas plantas de proceso: lugares donde, además de obtener un efluente de buena calidad, también se generen recursos valiosos que contribuyan a hacer más rentable y sostenible su operación.

Tecnologías de tratamiento de las aguas residuales

A nivel mundial, el tratamiento de aguas residuales se ha vuelto clave para lograr un desarrollo más justo y sostenible, especialmente en lo relacionado con el acceso al agua limpia. Sin embargo, mientras algunos países ya han avanzado en esta tarea, en muchas regiones aún se descarga la mayor parte de las aguas residuales sin tratar, lo que pone en riesgo tanto la salud de las personas como la de los ecosistemas.

En México, el reto también es grande. Aunque se han construido numerosas plantas de tratamiento, solo un poco más de la mitad del agua residual recibe el tratamiento adecuado. La situación es particularmente crí-

tica en zonas rurales, donde el acceso a estos servicios es muy limitado. Además, muchas instalaciones existentes necesitan ser modernizadas, ya que operan con tecnología obsoleta o sin el mantenimiento adecuado. A pesar de estos desafíos, el país tiene una gran oportunidad: transformar el tratamiento de aguas en una estrategia de sostenibilidad. Más allá de limpiar el agua, hoy se busca también recuperar energía, nutrientes y otros recursos valiosos. Así, el tratamiento de aguas residuales deja de ser solo una obligación ambiental, y se convierte en una herramienta poderosa para cuidar nuestro futuro y el del planeta.

Para responder a estos desafíos y garantizar una gestión efectiva de las aguas residuales, se ha desarrollado una secuencia estructurada de procesos que permiten eliminar distintos tipos de contaminantes en función de su naturaleza y complejidad. Esta secuencia, adoptada en el ámbito internacional y nacional, constituye la base del diseño y operación de las plantas de tratamiento modernas. A continuación, se describen las principales etapas que conforman este proceso integral o tren de tratamiento (Zagklis y Bampas, 2022; Akbar et al., 2023).

Tratamiento primario: emplea principalmente procesos físicos y químicos para eliminar sólidos gruesos, suspendidos, así como grasas y aceites.

Tratamiento secundario: se basa en tecnologías biológicas que utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica disuelta.

Tratamiento terciario: incorpora procesos físicos, químicos y biológicos avanzados para eliminar nutrientes, carga microbiana patógena y contaminantes persistentes que no fueron eliminados en las etapas anteriores.

En los últimos diez años, se ha puesto especial atención en el desarrollo de procesos de oxidación avanzada (POA) para el tratamiento de aguas residuales. Estos métodos buscan eliminar contaminantes difíciles de degradar, que suelen resistirse a los tratamientos convencionales. Entre ellos se encuentran tecnologías como la oxidación electroquímica, el proceso Fenton, el foto-Fenton, la electrocoagulación, entre otros. El objetivo principal es claro: lograr una limpieza más profunda del agua para que pueda ser reutilizada de forma segura, cuidando así tanto la salud pública como el medio ambiente (Lucas et al., 2021; Ugrina y Milojković, 2024).

Para comprender mejor cómo se estructura el tratamiento de aguas residuales, es útil conocer las principales técnicas y métodos utilizados en

cada etapa. A continuación, en la tabla 16.1, se resumen los procesos más representativos, desde los tratamientos primarios hasta las tecnologías avanzadas, que permiten no solo la degradación de contaminantes convencionales, sino también la degradación de compuestos persistentes y la recuperación de recursos.

Tabla 16.1. *Técnicas y métodos de tratamiento de aguas residuales*

Tratamiento	Técnica y métodos
Primario	Filtración, sedimentación, coagulación-floculación.
Secundario	<i>Aerobios</i> : lodos activados, filtros percoladores, MBBR, MBR. <i>Anaerobios</i> : filtros biológicos, UASB, EGSB. <i>Sistemas combinados</i> : Aerobios/Anaerobios
Terciario	Cloración, irradiación ultravioleta, filtración por membranas, humedales construidos, cultivo de microalgas, ozonización.
Avanzados	Oxidación electroquímica, coagulación combinada con radiación ultra violeta y ozono (UV/O ₃), sistemas de radiación y peróxido (UV/H ₂ O ₂), catálisis heterogénea.

Fuente: elaboración propia.

Es importante comprender que no existe una única tecnología para tratar las aguas residuales y que, dependiendo de la calidad final requerida, se pueden adoptar diferentes configuraciones de tratamiento.

Reutilización de las aguas residuales

En lugar de desechar las aguas tratadas directamente en cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado, se pueden convertir en una valiosa fuente alternativa: un recurso hídrico no convencional. Su reutilización abarca una amplia variedad de usos, desde el riego agrícola y actividades industriales, hasta aplicaciones urbanas, recreativas e incluso, en algunos casos, el consumo humano (Guerra-Rodríguez et al., 2020). Para ello, han surgido las llamadas plantas de regeneración, que incorporan tratamientos terciarios avanzados. Estas plantas utilizan distintos procesos y tecnologías, adaptados a los niveles de calidad del agua requeridos por la normativa vigente, dependiendo del destino final y del país en el que se implementen (Salgot y Folch, 2018). Así, la recuperación de aguas residuales no solo representa una estrategia para enfrentar la escasez hídrica, sino también una oportu-

nidad para aprovechar un recurso que, hasta hace poco, simplemente se consideraba un desecho.

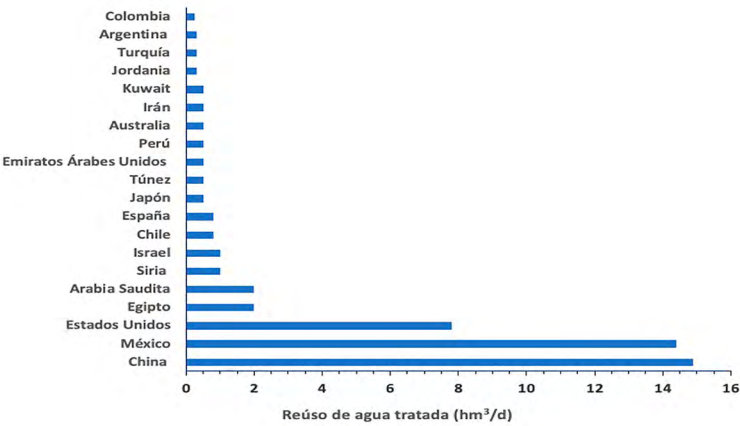
La reutilización de aguas residuales tratadas puede darse de forma indirecta, cuando el efluente se vierte a cuerpos de agua antes de ser usado nuevamente o de forma directa, cuando se reutiliza sin pasar por el ambiente natural (Kazner et al., 2012; Guerra-Rodríguez et al., 2020). Esta práctica ha cobrado especial importancia en países que enfrentan estrés hídrico, como México, que en 2018 se posicionó como el segundo mayor reutilizador de aguas residuales a nivel mundial (Guerra-Rodríguez et al., 2020) (figura 16.2). Con aproximadamente 14 hm³/día, México supera ampliamente a países como Estados Unidos, Egipto, Arabia Saudita e Israel, este último reconocido históricamente como referente en gestión hídrica eficiente. Este alto volumen de reúso refleja la importancia que ha cobrado esta práctica en el país, especialmente frente al estrés hídrico que afecta a amplias regiones del territorio nacional. Sin embargo, como se ha señalado en estudios recientes, gran parte de esta agua reutilizada no recibe tratamientos terciarios o avanzados, lo que representa un área crítica a mejorar en términos de salud pública y seguridad ambiental.

Diversos estudios han alertado sobre la presencia de contaminantes persistentes en estos efluentes, como patógenos, microcontaminantes, genes de resistencia a antibióticos, productos farmacéuticos y subproductos de desinfección (Kulkarni et al., 2018; Čelić et al., 2019). Por ello, avanzar hacia un reúso seguro requiere no solo normativas más estrictas, sino también tecnologías que garanticen una calidad adecuada del agua para cada tipo de uso.

La posición destacada de México en la gráfica no necesariamente implica liderazgo tecnológico, sino más bien una necesidad estructural de recurrir al reúso frente a la escasez. Esto plantea una gran oportunidad: fortalecer la infraestructura de tratamiento y modernizar las plantas existentes, incorporando tecnologías que garanticen una calidad del agua adecuada según su uso final.

En un contexto donde la sostenibilidad se ha convertido en una prioridad para todos los sectores, incluido el tratamiento de aguas residuales, aplicar tratamientos adicionales muchas veces no resulta viable debido a su alto costo en relación con los beneficios obtenidos. Ante este reto, la

Figura 16.2. *Reutilización global de aguas residuales tratadas*



Fuente: elaboración propia con base en datos de Guerra-Rodríguez et al. (2020).

atención se ha enfocado en valorizar el recurso en lugar de desecharlo. Hoy en día, se busca aprovechar las aguas residuales no solo como un desecho a tratar, sino como una fuente útil para recuperar energía —a través de la producción de biogás— y generar productos como fertilizantes. Además, las tecnologías emergentes están explorando la recuperación de metales y nutrientes, lo que abre nuevas oportunidades para hacer más eficientes y sostenibles estos sistemas. Esta visión ha comenzado a transformar las plantas de tratamiento en verdaderos centros de recuperación de recursos, capaces de ofrecer productos con valor agregado (Ghimire et al., 2021; Hernández-Chover et al., 2023).

Considerando que en la actualidad existe una creciente preocupación por garantizar una mayor sostenibilidad de los procesos industriales, incluido el sector del tratamiento de aguas residuales, tratamientos adicionales, son considerados no tan viables, por el costo-beneficio. Bajo este contexto, lo que se ha buscado es la valorización de las aguas residuales, a través de la recuperación de energía, mediante la producción de biogás, fertilizantes, mientras que tecnologías emergentes enfocadas en la recuperación de metales y nutrientes buscan mejorar la eficiencia y sostenibilidad. Esto ha llevado a redefinir las plantas de tratamiento como centros de recuperación de recursos con productos de valor agregado (Ghimire et al., 2021; Hernández-Chover et al., 2023).

Tendencias emergentes en el tratamiento de aguas residuales: digitalización y descentralización

En México, el tratamiento de aguas residuales sigue enfrentando retos importantes: muchas plantas operan por debajo de su capacidad o carecen del mantenimiento necesario, especialmente en zonas rurales y urbanas marginadas. Frente a esta realidad, están surgiendo nuevas alternativas que integran tecnologías digitales para hacer más eficiente, accesible y sostenible el tratamiento del agua.

Una de las principales tendencias emergentes es la implementación de sistemas descentralizados inteligentes, que permiten tratar las aguas residuales cerca del punto donde se generan. Esto no solo reduce los costos asociados al transporte del agua, sino que también facilita su reúso local, una práctica cada vez más relevante ante el estrés hídrico que vive el país (Guerra-Rodríguez et al., 2020). Estos sistemas se apoyan en tecnologías como el internet de las cosas, que permite monitorear parámetros clave en tiempo real; la Inteligencia Artificial, que ayuda a optimizar procesos y anticipar fallos; y el Big Data, que recopila y analiza grandes volúmenes de datos para una mejor toma de decisiones (Ghimire et al., 2021).

Este enfoque no solo representa una mejora operativa, sino también un cambio de paradigma: pasar de ver el agua residual como un desecho a considerarla una fuente de recursos. Así, la digitalización y descentralización abren la puerta a un tratamiento más resiliente, autónomo y adaptado a las necesidades locales (Hernández-Chover et al., 2023).

Casos exitosos en la recuperación y aprovechamiento de biogás

En México ha crecido el interés por aprovechar al máximo los recursos contenidos en las aguas residuales, impulsando así una visión más sostenible del tratamiento. Un ejemplo claro de esta tendencia es la incorporación de sistemas anaerobios en plantas de tratamiento, los cuales permiten generar biogás a partir de los procesos realizados tanto en la línea de agua

como en la línea de lodos de purga. Uno de los casos más destacados es el de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Metropolitana San Jerónimo, ubicada en San Francisco del Rincón, Guanajuato. Esta planta inició operaciones en 2013 y hoy es un referente nacional en economía circular. Su sistema incluye un digestor anaerobio que transforma los lodos en biogás, el cual se utiliza para producir energía eléctrica mediante un equipo de cogeneración instalado en 2015 (SITRATA, 2019). Gracias a esta tecnología, cerca del 10% de la energía que consume la PTAR se genera internamente, lo que reduce costos operativos y la dependencia de fuentes externas de energía.

Otro caso emblemático en México es la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco, considerada la más grande del país. Fue diseñada específicamente para tratar las aguas residuales generadas en el Valle de México, una de las regiones más pobladas. Con un caudal de diseño de 35 m³/s (Núñez-García et al., 2023). Esta PTAR no solo destaca por su capacidad hidráulica, sino también por su apuesta por la generación de energía limpia. La PTAR cuenta con una capacidad autorizada de cogeneración de 32.6 MW, y se estimó una producción anual de 200.6 millones de Wh (GIZ México, 2018). Gracias a su sistema de digestión anaerobia y cogeneración, en su mejor momento logró cubrir hasta el 62% de su propia demanda energética (GIZ México, 2018), un logro significativo en términos de eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, el proyecto no ha estado exento de desafíos, por ejemplo, conflictos sociales vinculados al manejo del agua residual (García-Salazar, 2019), así como el rechazo al uso agrícola de los lodos estabilizados mediante digestión anaerobia (Hayashida Carrillo et al., 2023) han limitado el aprovechamiento completo de su potencial energético. A pesar de ello, la PTAR sigue siendo un referente técnico y una muestra del potencial que existe en México para combinar tratamiento de aguas y generación de energía en un mismo sistema. Este tipo de experiencias demuestra que la valorización de las aguas residuales no solo es posible, sino que también representa una oportunidad real para construir sistemas de tratamiento más autosuficientes, eficientes y alineados con los principios de sostenibilidad.

Cabe señalar que, de acuerdo con datos del INEGI, en México solo existen 15 PTAR que utilizan digestión anaerobia de lodos activados de purga

para producir energía eléctrica a partir del biogás (García-Castillo et al., 2024). Entre ellas se encuentran la PTAR Villa de Álvarez (Colima), la PTAR Principal (Coahuila), la PTAR León (Guanajuato), así como las plantas Agua Prieta y El Ahogado (Jalisco) y la PTAR San Pedro Mártir (Querétaro) (Sandoval Yoval et al., 2017). A pesar de que este dato refleja avances importantes en el aprovechamiento de los recursos contenidos en las aguas residuales, la información pública disponible aún es limitada: no se reportan detalles sobre la capacidad instalada de los sistemas de cogeneración ni sobre su producción de electricidad actual. Esto dificulta evaluar el verdadero impacto de estas iniciativas en términos de eficiencia energética y sostenibilidad, y subraya la necesidad de mayor transparencia y monitoreo en los proyectos de recuperación de energía en México.

Soluciones tecnologías para la recuperación de nutrientes

Hoy en día, las prácticas de economía circular aplicadas en las PTAR van más allá de simplemente eliminar contaminantes. El enfoque actual busca recuperar los nutrientes presentes en el agua residual o tratada, especialmente por su alto valor para actividades como la agricultura. Uno de los nutrientes más importantes es el fósforo, un elemento esencial para la vida, pero no renovable. Es clave para el crecimiento de las plantas y participa en numerosas funciones metabólicas en los organismos vivos (Cornel y Schaum, 2009). Su recuperación no solo es estratégica, sino necesaria para garantizar la seguridad alimentaria a largo plazo. Por otro lado, el nitrógeno también juega un papel fundamental. Aunque abundante, su forma reactiva suele liberarse de forma descontrolada al ambiente, tanto por el uso excesivo de fertilizantes sintéticos como por su presencia en detergentes y desechos humanos, como la orina (Sengupta et al., 2015). Por lo que, recuperar estos nutrientes ayuda a reducir la contaminación ambiental y, al mismo tiempo, permite reutilizarlo de forma más eficiente en actividades agrícolas y otras aplicaciones.

La recuperación de nitrógeno y fósforo a partir de aguas residuales es una estrategia cada vez más relevante en el contexto de la sostenibilidad.

Por el ejemplo el nitrógeno y el fósforo se puede precipitar químicamente del agua residual en forma de estruvita, que puede emplearse como fertilizante (Le Corre et al., 2009). Se pueden emplear materiales como zeolitas, resinas o biochar modificados para capturar iones de amonio (NH_4^+) o fosfato (PO_4^{3-}), los cuales se pueden emplear como enmiendas agrícolas (Wu et al., 2016). También se pueden emplear procesos electroquímicos (Du et al., 2023), y la asimilación biológica, que aprovecha la capacidad de ciertos microorganismos para incorporarlos en su metabolismo (Han y Zhou, 2022). Los procesos electroquímicos, en particular, han mostrado un gran potencial para extraer estos compuestos de forma eficiente, y se están convirtiendo en una alternativa atractiva para modernizar las plantas de tratamiento. En la tabla 16.2 se describen algunas de las tecnologías más representativas empleadas para este fin.

Tabla 16.2. *Procesos electroquímicos para recuperación de nutrientes en aguas residuales*

Nitrógeno	Fósforo
Extracción por aireación	Precipitación química y cristalización
Extracción por membranas	Precipitación inducida electroquímicamente
Resinas de intercambio iónico	Adsorción e intercambio iónico
Reactores osmóticos de membrana	
Extracción térmica	
Concentración en membrana	

Fuente: adaptado de Du et al. (2023).

Por otro lado, la asimilación biológica es otra vía importante para recuperar nutrientes del agua residual. Este enfoque utiliza la capacidad natural de los microorganismos para capturar y transformar compuestos como el nitrógeno y el fósforo. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran los reactores de membrana aireada, los sistemas de biopelícula, los sistemas bioelectroquímicos y los procesos de remoción biológica avanzada de fósforo (Du et al., 2023). Recientemente, también se ha resaltado el potencial de los microorganismos fotosintéticos y heterótrofos para asimilar nitrógeno de manera sinérgica. A través del análisis de los flujos de conversión en las redes del ciclo biogeoquímico del nitrógeno, se ha identificado esta estrategia como una opción prometedora no solo para eliminar nitrógeno de las aguas residuales, sino también para recuperarlo

como recurso útil (Han y Zhou, 2022). Este tipo de enfoques integrados están ayudando a transformar el tratamiento de aguas en una herramienta más alineada con la sostenibilidad y la economía circular.

Es importante destacar que la mayoría de los procesos avanzados para la recuperación de nutrientes a partir de aguas residuales, descritos en la literatura científica, se encuentran aún en etapas de laboratorio o escala piloto. Esto se debe a que muchos de estos métodos enfrentan limitaciones significativas, como el alto consumo energético, la dependencia de reactivos químicos, y los problemas generados por interferencias de otros iones o por competencia microbiana durante el proceso. Por esta razón, su aplicación a gran escala en plantas de tratamiento reales todavía está en una fase de evaluación. En otras palabras, el escalamiento industrial de estas tecnologías sigue siendo un reto, ya que requiere estudios más profundos sobre su viabilidad técnica y factibilidad económica. Aun así, representan un camino prometedor hacia un tratamiento de aguas más eficiente, sostenible y alineado con los principios de la economía circular.

Conclusiones

La transición hacia un modelo de economía circular en el tratamiento de aguas residuales es mucho más que una tendencia: es una oportunidad estratégica para avanzar en la sostenibilidad ambiental, energética y económica de México. Aunque ya se han logrado avances importantes como el reúso de agua tratada y la recuperación de biogás en algunas plantas, todavía enfrentamos desafíos considerables. Muchas instalaciones necesitan modernizarse, el uso de tecnologías avanzadas sigue siendo limitado, y gran parte del potencial contenido en el agua residual aún no se aprovecha por completo. Para que este cambio de enfoque sea una realidad, es crucial invertir en infraestructura más eficiente, apostar por sistemas descentralizados e inteligentes, y dar impulso a tecnologías emergentes como la digestión anaerobia y la recuperación de nutrientes. Pero no basta con la tecnología: también se necesita una gobernanza sólida que promueva el reúso seguro del agua y fomente la innovación. Si logramos alinear estos esfuerzos, las

plantas de tratamiento pueden transformarse en centros de recuperación de recursos, clave para enfrentar la crisis hídrica y construir un futuro más sostenible para todos.

Referencias

- Akbar, M. Yaqoob, A., Ahmad, I. y Ahmad, A. (2023). Wastewater treatment: An overview. En A. Ahmad, I. Ahmad, ... y S. Tabassum (Eds.), *Sodium alginate-based nano-materials for wastewater treatment* (pp. 19-34). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823551-5.00006-9>
- Batstone, D. J., Hülsen, T., Pérez, J. y Keller, J. (2015). Downstream impacts of wastewater treatment technology selection: Life cycle assessment of high-rate anaerobic treatment with nutrient recovery. *Water Research*, 77, 32-43.
- Čelić, M., Gros, M., Farré, M., Barceló, D., Petrović, M. (2019). Pharmaceuticals as chemical markers of wastewater contamination in the vulnerable area of the Ebro Delta (Spain). *Science of the Total Environment*, 652, 952-963. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.290>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2022). *Estadísticas del agua en México 2021*. <https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones>
- Cornel, P. y Schaum, C. (2009). Phosphorus recovery from wastewater: Needs, technologies and costs. *Water Science and Technology*, 59(6), 1069-1076. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.045>
- Daigger, G. T. (2009). Evolving urban water and residuals management paradigms: Water reclamation and reuse, decentralization, and resource recovery. *Water Environment Research*, 81(8), 809-823. <https://doi.org/10.2175/106143009X425898>
- Du, J., Waite, T. D., Feng, J., Lei, Y. y Tang, W. (2023). Coupled electrochemical methods for nitrogen and phosphorus recovery from wastewater: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 885-909. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01561-x>
- García-Castillo, C. C., Guerrero García Rojas, H. R. y Maldonado Villalpando, E. (2024). Una revisión sobre las posibilidades de autosuficiencia energética y reutilización de agua en las plantas de tratamiento de agua residual en México. *Ciencia Nicolaita*, (91), 171-180. <https://doi.org/10.35830/cn.vi91.760>
- García-Salazar, E. M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios Sociales: Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29(54). <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>
- Ghimire, U., Sarpong, G. A. y Gude, V. G. (2021). Transitioning to circular economy through resource recovery from wastewater: Prospects and challenges. *Environmental Research*, 201, 111606.
- Ghimire, U., Sarpong, G. y Gude, V. G. (2021). Transitioning wastewater treatment

- plants toward circular economy and energy sustainability. *ACS Omega*, 6(18), 11794-11803. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05827>
- GIZ México. (2018). *Proyectos de aprovechamiento energético a partir de residuos urbanos en México: Plantas de producción de energía en hornos cementeros, biodigestores, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales*.
- Guerra-Rodríguez, S., Oulego, P., Rodríguez, E., Singh, D. N. y Rodríguez-Chueca, J. (2020). Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: Challenges and opportunities. *Water*, 12(5), 1431. <https://doi.org/10.3390/w12051431>
- Guerra-Rodríguez, S., Rodríguez, E. y Gómez-Lavín, S. (2020). Wastewater reuse: An alternative to face water scarcity. *Journal of Environmental Management*, 276, 111310.
- Han, F. y Zhou, W. (2022). Nitrogen recovery from wastewater by microbial assimilation: A review. *Bioresource Technology*, 363, 127933. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127933>
- Hayashida Carrillo, A. H., Rolón Sánchez, J. E. y Onofre Villalba, M. F. (2023). *Estudio de caso: Uso agrícola de biosólidos en planta de tratamiento de aguas residuales, Atotonilco de Tula*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://hdl.handle.net/11324/23088>
- Hernández-Chover, V., Bellver-Domingo, Á. y Escobar-Barragán, J. (2023). Circular economy and resource recovery in wastewater treatment plants. *Sustainable Cities and Society*, 88, 104263.
- Hernández-Chover, V., Castellet-Viciano, L., Fuentes, R. y Hernández-Sancho, F. (2023). Circular economy and efficiency to ensure the sustainability in the wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135563. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135563>
- Kazner, Ch., Wintgens, Th. y Dillon, P. (2012). *Water reclamation technologies for safe managed aquifer recharge* (vol. 11). IWA. <https://doi.org/10.2166/9781780400648>
- Kehrein, P., van Loosdrecht, M. C. M., Osseweijer, P., Garfí, M., Dewulf, J. y Posada, J. (2020). A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants-market supply potentials, technologies and bottlenecks. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(4), 877-910. <https://doi.org/10.1039/c9ew00905a>
- Kulkarni, P., Olson, N. D., Paulson, J. N., Pop, M., Maddox, C., Claye, E., Goldstein, R. E. R., Sharma, M., Gibbs, S., Mongodin, E. F. et al. (2018). Conventional wastewater treatment and reuse site practices modify bacterial community structure but do not eliminate some opportunistic pathogens in reclaimed water. *Science of the Total Environment*, 639, 1126-1137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.178>
- Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P. y Parsons, S.A. (2009). Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(6), 433-477. <https://doi.org/10.1080/10643380701640573>
- Lucas, M. S., Peres, J. A. y Li Puma, G. (2021). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. *Water*, 13(9), 1309. <https://doi.org/10.3390/w13091309>
- Mwizerwa, I. T., Husein, M., Houssini, K., Praise, S. y Kateita, J. (2024). Wastewater treatment, recycling, and reuse-past, present, and future: A circular economy perspec-

- tive. En *Innovative and hybrid technologies for wastewater treatment and recycling* (pp. 326-345). CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003454199-15>
- Núñez-García, U., Navarro-Gómez, H. I., del Refugio González-Sandoval, M. y Flores-Badillo, J. (2023). Tratamiento biológico de aguas residuales con perspectiva de economía circular. *Pädi: Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11, 112-122. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11486>
- Olsson, G. (2012). *Water and energy: Threats and opportunities*. IWA. <https://doi.org/10.2166/9781780400693>
- Salgot, M. y Folch, M. (2018). Tratamento de águas residuais e reutilização de água. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>
- Sánchez-Tovar, S. A. (2023). Sistema combinado anaerobio-humedal de tratamiento de aguas residuales para comunidades de Michoacán, México. *Ambiens Techné et Scientia México*, 11(1), 43-70.
- Sandoval Yoal, L., Mantilla Morales, G., Ramírez Camperos, E., Gasca Álvarez, S., Navarro Franco, J., Hernández Cruz, N., García Rojas, J. L., Esquivel Sotelo, A. y Calderón Mólgora, C. G. (2017). *Potencial de generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de lodos activados* [Ponencia]. XII Congreso Regional para Norteamérica y el Caribe.
- Sengupta, S., Nawaz, T. y Beaudry, J. (2015). Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater. *Current Pollution Reports*, 1, 155-166. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1>
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J. y Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- Sistema Intermunicipal para los Servicios de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales para los Municipios del Rincón (Sitrata). (2019). *Informe de la gestión: PTAR metropolitana San Jerónimo 2016-2019*.
- Ugrina, M. y Milojković, J. (2024). Advances in wastewater treatment, 2024. *Energies*, 17(6), 1400. <https://doi.org/10.3390/en17061400>
- United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). (2017). *The United Nations world water development report 2017: Wastewater, the untapped resource*. UNESCO.
- Verstraete, W., Van de Caveye, P. y Diamantis, V. (2009). Maximum use of resources present in domestic "used water". *Bioresource Technology*, 100(23), 5537-5545. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.047>
- Wu, L., Zhang, J. y Li, B. (2016). Zeolite-based materials for phosphate and ammonium removal from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, 187, 90-104.
- Zagklis, D. P. y Bampos, G. (2022). Tertiary wastewater treatment technologies: A review of technical, economic, and life cycle aspects. *Processes*, 10(11), 2304. <https://doi.org/10.3390/pr10112304>
- Zajac, P. y Avdiushchenko, A. (2020). The impact of converting waste into resources on the regional economy, evidence from Poland. *Ecological Modelling*, 437, 109299. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109299>