



Una revisión sobre las posibilidades de autosuficiencia energética y reutilización de agua en las plantas de tratamiento de agua residual en México

A review of the possibilities of energy self-sufficiency and water reuse in wastewater treatment plants in Mexico

Carmen Cecilia García Castillo^{*1,2}, Hilda R. Guerrero García Rojas², Erandi Maldonado Villalpando³

¹ Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, Tecnológico Nacional de México

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Economía

³ Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM-Campus Morelia

Historial

Manuscrito recibido: 1 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

*Autor para correspondencia

Carmen Cecilia García Castillo

e-mail: carmen.gc@vmorelia.tecnm.mx

ORCID: 0000-0002-0260-2051

Resumen

Las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) municipales en México enfrentarán grandes desafíos en los próximos años, entre ellos la autosuficiencia energética y la reutilización del agua tratada. El objetivo del presente trabajo es presentar una base contextual de la situación de las PTAR y sus posibilidades futuras para transitar a una operación basada en la economía circular. Se encontró que la autosuficiencia energética puede implementarse en el 5.8% de las PTAR del país y que la reutilización del agua tratada en riego e infiltración es apenas cercana al 10%. Estas cifras evidencian la necesidad de generar políticas públicas y marcos regulatorios que propicien sistemas de tratamiento de agua residual sustentables.

Palabras clave: Economía circular, lodos residuales, sustentabilidad hídrica, agua

Abstract

Municipal Wastewater Treatment Plants (WWTP) will face great challenges in the coming years, such as reaching energy self-sufficiency and the reuse of treated water. Therefore, the purpose of this project is to present a contextual basis of the situation of WWTPs and their future possibilities to migrate to a circular economy-based operation. It was found that energy self-sufficiency can be implemented in 5.8% of the country's WWTPs and that the reuse of treated water in irrigation and infiltration is barely close to 10%. These numbers underscore the need for public policies and regulatory schemes that promote sustainable wastewater treatment systems.

Keywords: Circular economy, sewage sludge, water sustainability, water

Introducción

El presente trabajo plantea una visión actual de las posibilidades que tienen las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) en México respecto a la autosuficiencia energética y reutilización del agua tratada. Esta intención se deriva de la problemática económica, ambiental y técnica que mantienen dichas instalaciones. Lo anterior las ha convertido en una carga insostenible para los municipios por los costos de operación y mantenimiento que representan, así como también por el impacto ambiental de los subproductos que generan, como

los residuos sólidos urbanos y los lodos residuales contaminados.

Según la Ley de Aguas Nacionales (2023, p. 2), las aguas residuales se definen como “*las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público, urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas*”. Cuando estas aguas son vertidas sin tratamiento a los cuerpos de agua, generan impactos negativos, entre ellos, la eutrofización y en el peor de los casos, la extinción

de los cuerpos de agua, con el consecuente desequilibrio del ciclo hídrico; también causan problemas de salud en la población cuando se tiene contacto directo con ellas (Mihelcic y Zimmerman, 2011).

En México, los encargados del tratamiento y disposición de las aguas residuales son los Organismos Operadores de Agua o ente similar en los municipios, mismos que, a partir de la descentralización de la gestión del agua en 1980 y con la reforma al artículo 115 Constitucional, se les otorgó toda la responsabilidad de la gestión del agua, desde el servicio de agua potable, drenaje y alcantarillado, hasta el tratamiento y disposición de sus aguas residuales. Lamentablemente, desde entonces y hasta ahora se les ha dejado solos con esa enorme tarea, sin guías claras ni recursos suficientes para cumplir con dicha obligación (Castañeda Villanueva, 2020; Silva, 2015).

En relación a la pertinencia de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), viene al caso mencionar un estudio dirigido por Lahera-Ramón (2010) sobre la infraestructura sustentable en plantas de tratamiento de aguas residuales, en el cual se determina que existe una excesiva mecanización y automatización de los procesos en las depuradoras, complicando su operación y mantenimiento, además de tratarse de procesos con alto consumo energético y con insumos fuera del alcance de muchos municipios, con la subsecuente generación de contaminantes al aire y lodos residuales.

En lo que respecta a los lodos generados en el tratamiento del agua residual, éstos pueden generar contaminación atmosférica, contaminación del suelo y de las aguas nacionales, afectando al ecosistema donde se depositen; por lo que, como se establece en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SE-MARNAT-2002, los lodos deben ser estabilizados con la finalidad de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger la salud humana y el ambiente (SEMARNAT, 2003).

La estabilización anaerobia es una de las alternativas para tratar los lodos. En este proceso se produce biogás, el cual puede ser empleando directamente como gas combustible o para la

producción de electricidad debido a su poder calorífico (21.5 MJ Nm^{-3}); el biogás debe pasar por un tratamiento adecuado para poder transformarlo en energía eléctrica, térmica o mecánica (Mantilla *et al.*, 2017). En lo que se refiere al reuso del agua, según la CONAGUA (2019), se estimó que en 2018 se reusaron directamente cerca de $43.8 \text{ m}^3/\text{s}$ de aguas residuales tratadas, lo que representa el 50.2% respecto de los $87.09 \text{ m}^3/\text{s}$ que fueron tratados en dicho año. Sin embargo, respecto al uso de agua tratada como agua de primer uso, se estimó en $8.1 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, apenas un 9.3%.

Debido al escenario anteriormente descrito, el objetivo de este trabajo es proporcionar una visión actualizada de la situación que guardan las plantas de tratamiento de agua residual en México, considerando dos aspectos fundamentales: la autosuficiencia energética y la reutilización del agua, como tendencias mundiales sostenibles en la operación de los sistemas de depuración. Esta consideración viene dada debido a que en la actualidad se presentan diferentes alternativas basadas en la gestión sustentable del agua, como son: la seguridad hídrica, la economía circular, la innovación social, la agricultura sintrópica y la simbiosis industrial, entre algunas otras, que abonan a la sustentabilidad y pretenden dar opciones para que los sistemas de producción y consumo disminuyan los impactos generados al ambiente.

En este sentido, la sustentabilidad se entiende como un compromiso efectivo de contribuir a la conformación de una nueva etapa civilizatoria, que armonice la vida de los seres humanos y que promueva el desarrollo socioeconómico con equidad y actitud respetuosa al medio ambiente para conservar la vida en el largo plazo (Gil Corrales, 2007; Gutiérrez Garza, 2007).

La sustentabilidad en los recursos hídricos implica lograr un acceso equitativo al agua, mejorar su calidad, mejorar los servicios de saneamiento e implementar tecnologías para su reutilización, tratamiento y reciclaje, para así lograr implementar la gestión integrada y el uso eficiente de los recursos hídricos, como se procura en el objetivo 6 de la Agenda 2030 (ONU, 2022). Hoy en día, la reutilización del agua tratada, así como la

posibilidad de utilizar los lodos residuales obtenidos en el tratamiento de agua para generar biogás y con éste energía para la autosuficiencia energética, son estrategias de la economía circular que pretenden disminuir los impactos económicos y ambientales en el tratamiento de aguas residuales (Smol, Mejia y Howarth, 2023).

El presente trabajo se justifica en dos aspectos. Por un lado, un aspecto teórico que viene dado por la necesidad de conocer de manera integral la información sobre las condiciones de las plantas de tratamiento de agua residual desde la visión de la economía circular; por otro lado, un aspecto social, ya que proporcionará información confiable para la toma de decisiones en los sectores académico, económico y gubernamental.

Materiales y métodos

Se llevó a cabo una investigación de tipo exploratoria-descriptiva basada en métodos cuantitativos. Se inició con una búsqueda general de información documental que contuviera datos sobre la operación de las plantas de tratamiento de agua residual en México. Concretamente esta búsqueda se realizó en los sitios oficiales relacionados con el tema de agua, como son, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y páginas web de organizaciones oficiales reconocidas en el tema, como la Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México A.C. (ANEAS).

Las principales bases de datos tomadas en cuenta para llevar a cabo el presente estudio fueron el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, que contiene información del año 2020, y el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación 2021 de la CONAGUA, así como sus históricos hasta el 2004. Estos inventarios nacionales de plantas de potabilización y tratadoras de agua residual son documentos que se publican anualmente por parte de la CONAGUA y la SEMARNAT, en ellos se resume

de manera general las PTAR y las potabilizadoras por cada Estado de la República Mexicana; incluyen datos sobre el nombre de la planta, caudal tratado, la capacidad instalada, el cuerpo receptor, tipo de reutilización de agua y el organismo responsable de la operación de la planta.

Con respecto al Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, es el séptimo programa estadístico desarrollado por el INEGI de este tipo y tiene por objetivo generar información estadística de la gestión y desempeño de las Instituciones Públicas Municipales con relación a temas como seguridad pública, saneamiento, residuos sólidos, entre otros (INEGI, 2021).

La información contenida en el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México y en los Inventarios Nacionales de PTAR fue analizada por medio de estadística descriptiva para obtener tendencias y comportamientos respecto a la reutilización de agua y tipos de tratamiento de los lodos residuales. Se tomaron en cuenta los tabulados básicos correspondientes al tema del tratamiento del agua y las plantas de tratamiento. Por último, respecto a la información bibliográfica obtenida en la búsqueda, a partir de palabras clave como “autosuficiencia energética” y “la reutilización del agua” en plantas de tratamiento de agua residual en México, se identificó la información más relevante que contribuyera a comprender el contexto de dichos temas en la actualidad.

Resultados

Con respecto a la búsqueda de información relacionada con la operación de plantas de tratamiento de agua residual en México, se observó que los informes gubernamentales más recientes como “Situación del medio ambiente en México 2018” y las “Estadísticas del Agua en México 2019” proporcionan información general sobre el tratamiento de agua, principalmente promedios nacionales y estatales del agua tratada. Respecto a la búsqueda de datos con relación a la generación de lodos y el destino de éstos, se encontró que no se aborda información al respecto en dichos informes; y la información refe-

rente a datos sobre la reutilización de agua tratada o destino de ésta, es insuficiente.

Los datos para este estudio se obtuvieron de los Inventarios Nacionales de Plantas de Potabilización y Tratamiento de Agua Residual, así como del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México. A continuación, se describen los principales resultados encontrados.

Número de PTAR en operación

Según el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Agua Residual 2021, en México se tenían registradas 2,872 plantas municipales en operación con una cobertura del 67.5% de tratamiento de agua residual y un caudal tratado de 145,341.0 L/s (CONAGUA, 2021). Se observó un crecimiento lineal en el número de plantas de tratamiento de agua instaladas en el país, a partir del dato más antiguo que es del año 1992, donde se contaba con 394 plantas en operación y un caudal tratado de 30,554 L/s; esto significa que hubo

un crecimiento aproximado en la instalación de PTAR de 25% anual durante un período de 29 años (CONAGUA, 2004). En la **Figura 1** se muestra este incremento en el número de plantas en operación a través del tiempo.

Procesos empleados en las PTAR

Un aspecto importante en la operación de las plantas de tratamiento de agua residual municipal es el tipo de proceso que emplean para el tratamiento biológico. En ese aspecto, los principales procesos biológicos empleados en México en el año 2021 son lagunas de estabilización con 843 plantas, correspondiente al 29.3%; lodos activados con 818 plantas, correspondiente al 28.4%; reactores anaerobios de flujo ascendente con 390 plantas, correspondiente al 13.5%; humedales artificiales con 230 plantas, correspondiente al 8% y tanque séptico con 143 plantas, correspondiente a un 4.9%.

Caudal tratado

El caudal tratado es un dato que permite conocer el

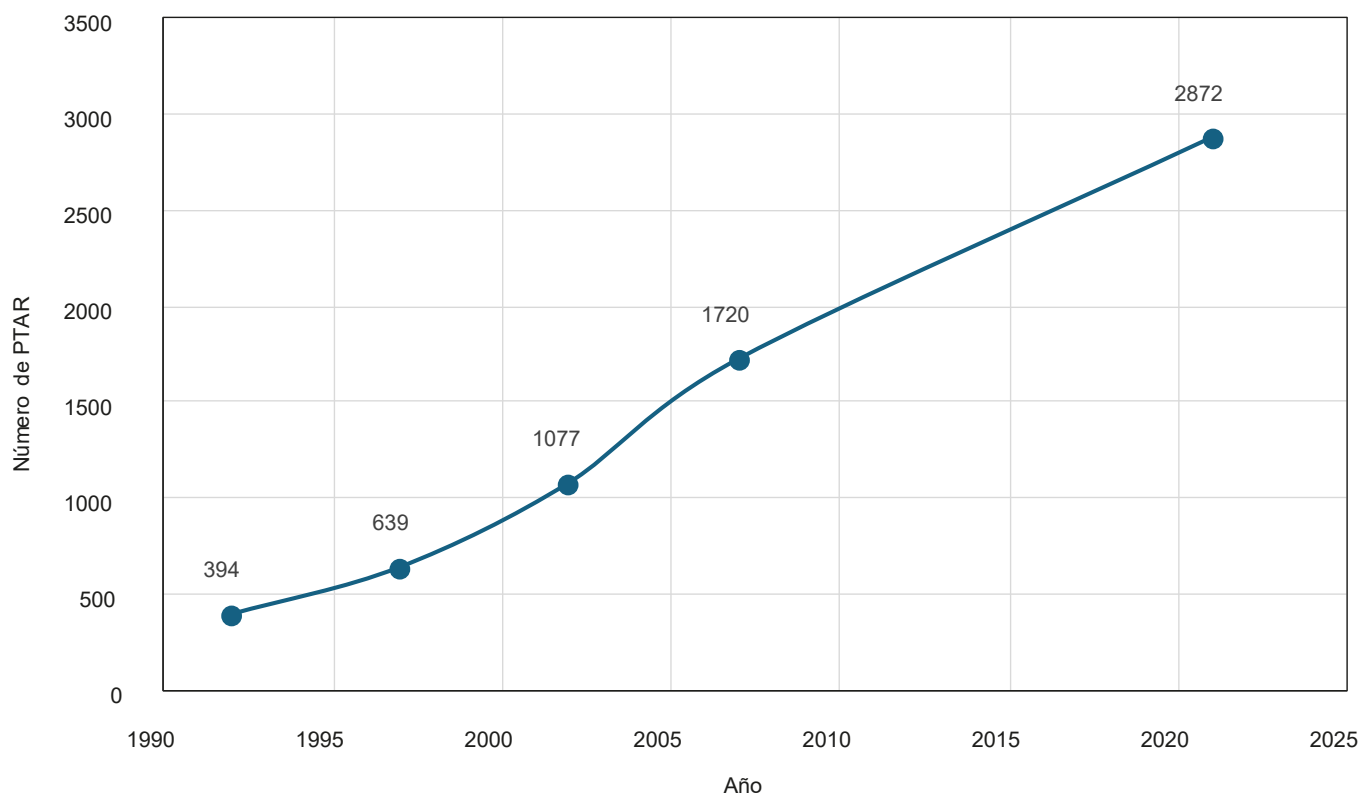


Figura 1. Comportamiento del número de plantas de tratamiento de agua residual en operación en México. Fuente: Elaboración propia con base en los Inventarios Nacionales de Plantas de Tratamiento de Agua Residual de la CONAGUA.

tamaño de la planta de tratamiento. En este sentido, los datos analizados se separaron en dos rangos: caudal tratado mayor de 200 L/s y caudal tratado menor a 199 L/s. Se encontró que en México el 5.8% de las plantas trabaja con un caudal mayor a 200 L/s, es decir, sólo 166 plantas, mientras que el 94.2% restante son plantas pequeñas que operan con caudales menores a 199 L/s (CONAGUA, 2021).

Tratamiento de lodos residuales generados en las PTAR

De acuerdo con el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI, de las 2505 plantas en operación en el año 2020, un total de 565 plantas dan tratamiento a los lodos generados, lo que corresponde al 22.5%, mientras que el resto no da tratamiento o reporta que no aplica. Con respecto a los principales tratamientos aplicados a los lodos residuales generados en el tratamiento del agua, 493 plantas emplean la deshidratación, 143 plantas emplean el espesamiento de lodos y únicamente 15 plantas emplean la cogeneración de energía eléctrica, como se muestra en la **Figura 2**.

Destino del agua tratada

Respecto al destino del agua residual, el Censo contempla plantas que reutilizan una fracción del agua y plantas que no reutilizan; en este sentido, en lo que respecta a las plantas que reutilizan una fracción del agua, de las 2505 plantas en operación en el año 2020, los dos principales destinos son descarga directa al río o arroyo, con 219 plantas, y descarga directa al suelo, con 26 plantas; en el caso de las plantas que no reutilizan el agua, se observan tres principales destinos: 960 plantas descargan directo a río o arroyo, 142 plantas al suelo y 265 refieren otro destino, sin especificar el tipo de destino que se aplica, tal como se muestra en la **Figura 3**.

Ahora bien, en un análisis de la evolución del destino del agua tratada en las plantas en México, se revisaron los datos históricos disponibles de los Inventarios Nacionales de Plantas de Tratamiento de Agua Residual, se tomó en consideración el inventario más antiguo correspondiente al año 2004 y el más reciente disponible, correspondiente al año 2021. En la **Tabla 1** se muestra la comparativa del destino del agua tratada para ambos años. Se puede observar que a pesar de que el número de plantas

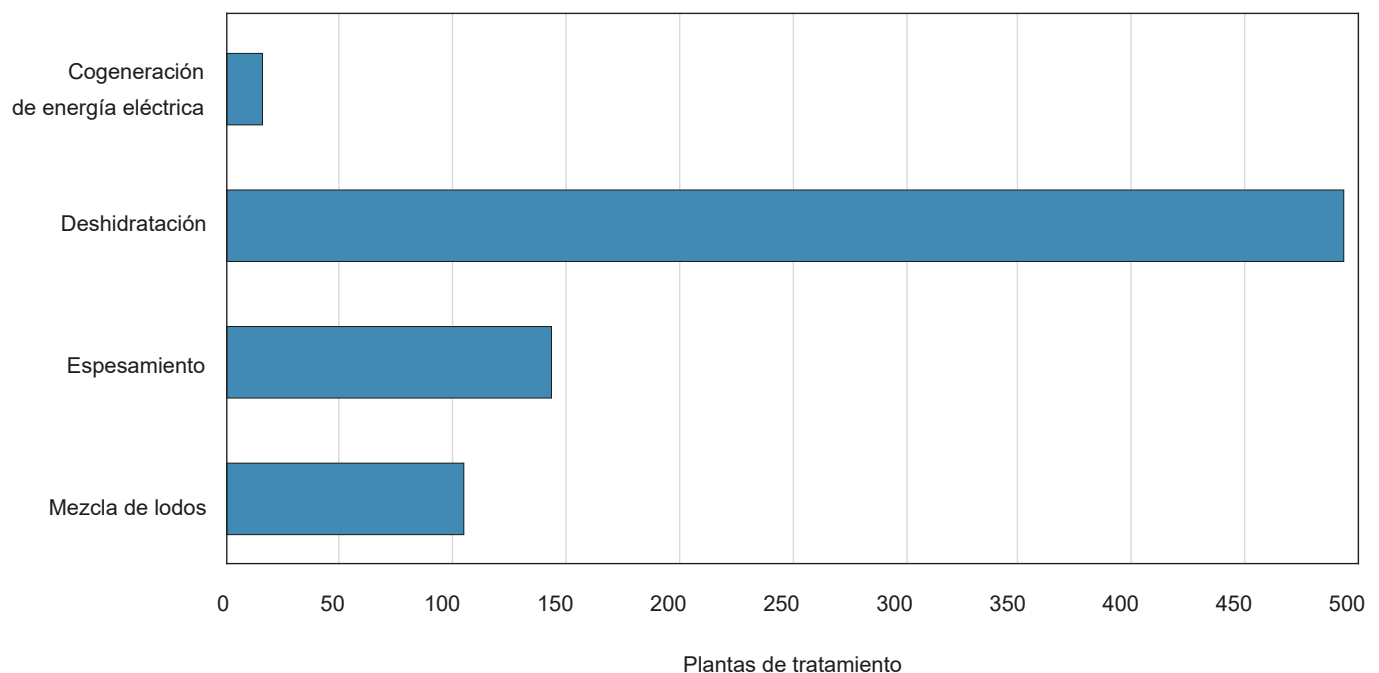


Figura 2. Tipo de tratamiento aplicado a los lodos residuales en plantas de tratamiento de agua municipal. Datos tomados del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI.

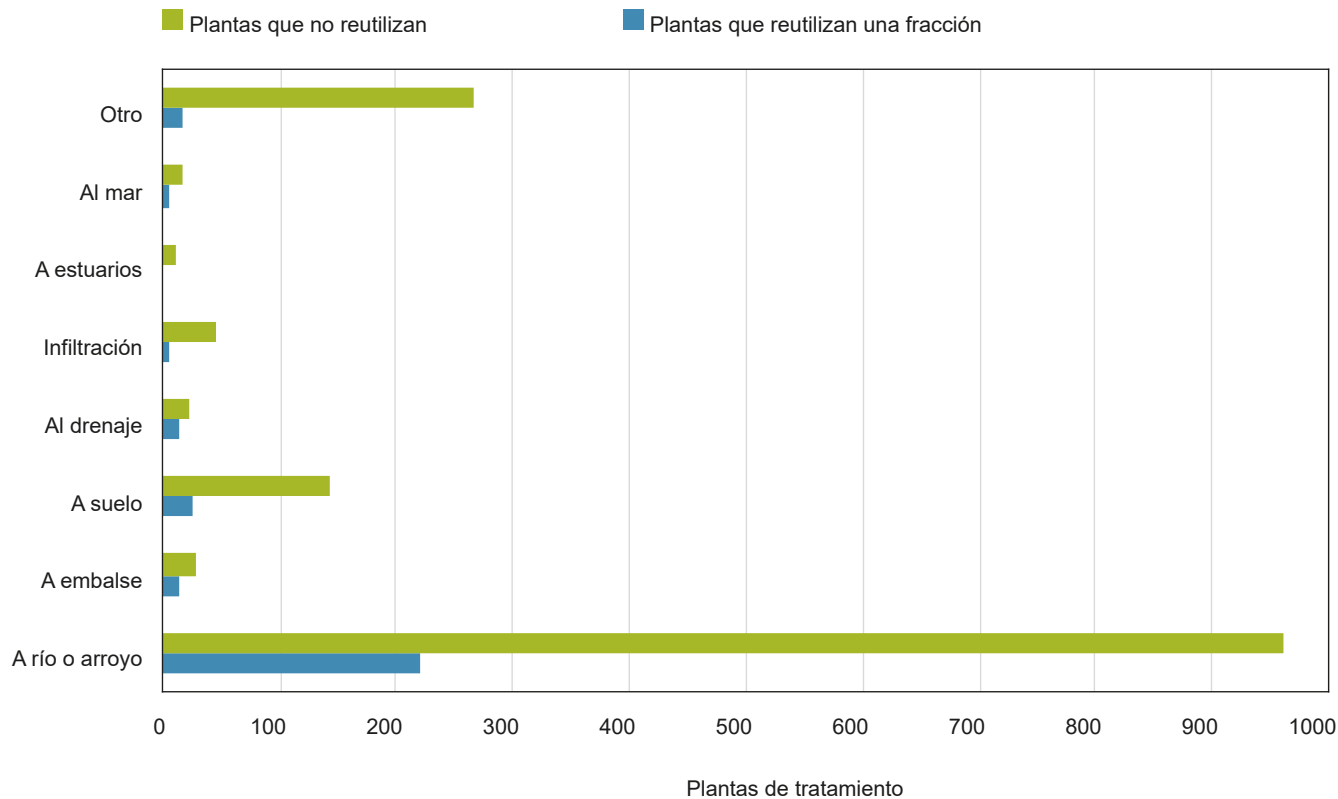


Figura 3. Destino de la descarga de agua tratada en las plantas de tratamiento de agua residual municipal. Fuente: Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 del INEGI.

pasó de 1300 a 2872 en un período de 17 años, los porcentajes de reutilización del agua tratada no aumentaron; por el contrario, para el caso de reutilización para riego e infiltración, disminuyeron, y para el caso de descarga a cuerpo de agua, tuvo un incremento mínimo de 5.7%.

Discusión

Con el análisis realizado sobre el número de plantas instaladas, se pudo constatar que hay un crecimiento positivo en el número de ellas, el cual se calculó cercano a un 25% anual en los últimos 29 años; lo anterior significa que hay una tendencia positiva en el crecimiento de número de plantas instaladas en

el país. Respecto a los procesos empleados en las PTAR en México, se identificaron tres principales: las lagunas de estabilización, que son procesos de tratamiento poco eficientes pero económicos en operación y mantenimiento; los lodos activados, que son procesos que requieren de insumos energéticos y por ello, costos de operación elevados; y por último, los reactores anaerobios, que entre sus características está la generación de biogás, como producto del proceso.

El aprovechamiento y valorización de los lodos residuales es una estrategia que cae dentro de la economía circular, en la cual la disposición de estos residuos en el relleno sanitario es la última opción;

Tabla 1. Comparativa de la reutilización del agua en México para el período de 2004 a 2020.

Año	Plantas en operación	Destino del agua tratada		
		Riego (agrícola, área verde)	Infiltración	Cuerpo de agua
2004	1300	11.8%	4.2%	84%
2021	2872	7.8%	2.5%	89.7%

*Datos tomados de los Inventarios Nacionales de Plantas Potabilizadoras y Tratamiento de Agua Residual de la CONAGUA.

por el contrario, se trata de aprovechar su potencial para obtener recursos que permitan satisfacer las necesidades energéticas de la misma planta a través del desarrollo de tecnologías e innovaciones que hacen cada vez más accesible su implementación (Gherghel *et al.*, 2019).

Tal como lo aseguran Tang y colaboradores (2019), las PTAR Municipales enfrentarán grandes desafíos en los próximos años; uno de ellos es encontrar la forma de disminuir el consumo energético y la recuperación de electricidad para llegar a una autosuficiencia energética; esto debido a los cambios que se requieren en la administración pública de las plantas, así como en las políticas gubernamentales enfocadas a la gestión del agua residual.

Ahora bien, tomando en consideración que las plantas que presentan viabilidad financiera para generar energía eléctrica a partir de la digestión anaerobia de los lodos residuales son aquellas plantas que trabajan con un caudal mínimo de 200 L/s (Mantilla *et al.*, 2017; Saravia Matus *et al.*, 2022), se determina que únicamente el 5.8% de las plantas en México, es decir, cerca de 166 plantas, podrían obtener energía eléctrica a partir de la digestión anaerobia de los lodos residuales generados para ser autosuficientes energéticamente; esta información pone de manifiesto la importancia de encontrar alternativas de autosuficiencia energética para el 94% restante de las plantas en México. Además, ya se tienen identificados los tratamientos que parecen ser más prometedores en términos de eficiencia y costos como la digestión anaerobia y la codigestión con otros residuos orgánicos (Volschan *et al.*, 2020).

Es importante resaltar que, en México, al menos 17 plantas que emplean la estabilización anaerobia y generación de biogás han logrado generar energía eléctrica; estas son: la Planta de Villa Álvarez en Colima, La Principal en Coahuila, la Purísima del Rincón y León en Guanajuato, Atotonilco en Hidalgo, Agua Prieta y el Ahogado en Jalisco y San Pedro Mártir en Querétaro, las restantes realizan la combustión del biogás generado (Mantilla *et al.*, 2017). Surge aquí el primer desafío: lograr que todas las plantas que emplean la digestión anaerobia logren aprovechar el biogás y lo utilicen

como fuente de energía eléctrica. El otro desafío será generar las estrategias para aprovechar el potencial de las 166 plantas que están más cerca de transitar a la autosuficiencia energética. Es por ello, que cualquier esfuerzo normativo, técnico, político, económico y ambiental contribuye a superar dichos desafíos y por lo tanto, a mejorar la gestión de las PTAR.

El aspecto más preocupante son las alternativas para el 94% de las plantas en México que, por su tamaño, aún no son viables para generar electricidad a partir de los lodos residuales, por lo que habrá que estudiar y encontrar alternativas para dichas plantas de manera que se encuentren otros caminos por medio de los cuales puedan transitar a la economía circular.

En lo que respecta a la reutilización del agua, pudo identificarse que los usos más comunes son, por un lado, para riego tanto de áreas verdes como agrícola, con un 11.8% en 2004, y 7.8% en 2021; esto puede significar que aunque aumentó el número de plantas de tratamiento de agua residual, no aumentó en la misma proporción las plantas que destinan el agua tratada para riego; y por otro lado, la reutilización como infiltración, de 4.2% de los casos en 2004 y de 2.5% en 2021, indican que aunque han aumentado el número de plantas instaladas, no se ha incrementado la reutilización del agua para infiltración. El principal destino del agua tratada en México es la descarga en ríos, arroyos, canales, lagos, entre otros, esto sin duda beneficia a la conservación de los ecosistemas acuáticos, aunque podría diversificarse el destino del agua tratada para disminuir la escasez de esta o la demanda de agua de primer uso.

Sin duda se deben trabajar estrategias que promuevan la reutilización del agua generada en las plantas de tratamiento de agua residual. Como bien mencionan Sarabia y col. (2022), la reutilización del agua tiene múltiples ventajas, entre ellas, ahorros energéticos, reducción de la extracción de agua de diversas fuentes, además de generar un sistema sostenible con el tiempo. Además, apoyar en este contexto impacta a la seguridad energética, que es otro tema preocupante en la actualidad.

Las condiciones para la reutilización del agua

tanto para el riego en la agricultura y áreas verdes como para usos industriales ya han sido estudiadas en diferentes partes del mundo y se observa que es una posibilidad de bastante potencial que beneficia a la creciente demanda de agua y la disminución del consumo de agua dulce. Sin embargo, aún es necesario establecer directrices y normatividad para su reutilización, como tarifas, calidad, confianza pública, así como determinar las tecnologías más aptas para los diferentes sitios (Adewumi *et al.*, 2010; Berardi y Pollice, 2017; Salgot y Folch 2018). Además, de acuerdo con la ANEAS (2023), los principales retos a impulsar en México para lograr la reutilización del agua en el riego, en la industria, en el comercio, así como agua de primer uso, son los políticos y regulatorios, así como la institucionalización de los organismos operadores de las plantas.

En la búsqueda de los avances en el estudio de los impactos positivos y negativos de las plantas de tratamiento de agua residual, así como aplicabilidad de la economía circular, se han podido encontrar algunos antecedentes relevantes. Entre ellos se encuentra un estudio sobre la problemática de las aguas residuales, en el cual el autor expone que el solo tratamiento de las aguas residuales para reutilización no es suficiente (Monroy Hermosillo, 2021).

La investigación de Nguyen y colaboradores (2022), después de establecer los beneficios que tiene la reutilización del agua y reutilización de los lodos residuales en base a la economía circular, concluye que, en definitiva, se debe adoptar la economía circular para fomentar la innovación y prácticas de gestión sostenible de los lodos, así como la necesidad de proporcionar información a las autoridades del agua para que inviertan en opciones de reutilización sostenibles para el tratamiento de lodos.

Conclusiones

La información sobre la generación y destinos de los lodos residuales, así como del destino del agua tratada en las plantas de tratamiento de agua residual municipal en México, es escasa. Dicha información

es importante para conocer las posibilidades de las plantas para transitar a una operación basada en la economía circular y aprovechar el potencial de los residuos generados, así como del agua tratada. Se considera que dicha información podría incluirse en los próximos censos y con ello, contribuir al desarrollo de la investigación y tecnología en lo que respecta a la solución del problema de las plantas de tratamiento de agua residual.

En relación con la autosuficiencia energética, si bien ya es una realidad con algunos casos exitosos en el país, aún existe un gran número de PTAR que tienen el potencial, pero no aprovechan el biogás generado; otras tienen las condiciones, pero no se contempla. El principal problema es que alrededor del 94% de las plantas en el país (cerca de 2700) no cuentan con el principal requisito para generar energía eléctrica a partir de los lodos residuales; se trata del caudal, es decir, el tamaño de la planta. Esto indica que se deben buscar otras maneras de que dichas plantas puedan transitar a una operación sustentable basada en la economía circular.

En lo que respecta a la reutilización del agua, en México se reusa cerca del 10% del agua tratada para riego agrícola y de áreas verdes, así como infiltración; el resto del agua tratada se descarga directamente a cuerpos de agua, contribuyendo con ello a la conservación de los ecosistemas acuáticos, pero desaprovechando la posibilidad de reusar el agua como agua de primer uso, ya sea en el sector agrícola o industrial, lo que contribuiría también a la disminución de la extracción de agua y combatir la escasez de la misma.

En general, se visualiza la necesidad de estrategias normativas, regulatorias y políticas que puedan influir en una operación de las plantas de tratamiento de agua con menores impactos negativos tanto ambientales como económicos y mayores impactos sociales positivos. La transición de la operación de las PTAR municipales a una economía circular es una oportunidad de mejorar la gestión de los recursos hídricos y asegurar las condiciones de supervivencia de las generaciones futuras.

Referencias

- Adewumi JR, Ilemobade AA, Van Zyl JE (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential and challenges. *Esources, Conservation & Recycling* 55(2):221-231. doi:10.1016/j.resconrec.2010.09.012.
- ANEAS (2023). *Reúso de agua tiene beneficios ambientales y económicos: experto*. ANEAS. <https://www.aneas.com.mx/post/reuso-agua-beneficios-ambientales-economicos-experto> [consultado el 24 de agosto de 2023].
- Berardi G, Pollice A (2017). Closing the water cycle in the agro-industrial sector by reusing treated wastewater for irrigation. *Journal of Cleaner Production* 164:587-596. doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.239.
- Castañeda Villanueva AA (2020). Evolución de la gestión del agua en municipios de México: estudio de un organismo público descentralizado en los altos Jalisco. *Agua y Territorio* 17:33-54. doi:10.17561/at.17.5518.
- CONAGUA (2004). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación 2004*. CONAGUA. [consultado el 20 de julio de 2023].
- CONAGUA (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. Comisión Nacional Del Agua. files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf [consultado el 22 de julio de 2023].
- CONAGUA (2021). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación 2021*. CONAGUA. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf [consultado el 26 de julio de 2023].
- Gherghel A, Teodosiu C, De Gisi S (2019) A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production* 228:244-263. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.240.
- Gil Corrales MÁ (2007). *Crónica Ambiental. Gestión pública de Políticas Ambientales en México*. (Primera). Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Gutiérrez Garza E (2007). De las teorías del desarrollo al desarrollo sustentable. Historia de la construcción de un enfoque multidisciplinario. *Trayectorias IX* (25):45-60.
- INEGI (2021). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2020*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2021/> [consultado el 31 de julio de 2023].
- Lahera-Ramón V (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera Revista de Estudios Territoriales* 12 (2):58-69.
- Ley de aguas nacionales (2023). Ley de aguas nacionales. En *Diario Oficial de la Federación* (pp. 1–118). Diario Oficial de la Federación (DOF). diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf.
- Mantilla G, Sandoval L, Ramírez EM, Gásca S, Navarro J, Hernández N, García JL, Esquivel A, Calderón CG (2017). *Energía limpia del agua sucia: aprovechamiento de lodos residuales*. IMTA, https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/energia-limpia/files/assets/common/downloads/publication.pdf.
- Mihelcic J, Zimmerman J (2011). *Ingeniería Ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. (1a Ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Monroy Hermosillo O (2021). Problemática de las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal* 12 (2):40-44.
- Nguyen MD, Thomas M, Surapaneni A, Moon EM, Milne NA (2022) Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. *Environmental Technology & Innovation* 28:102651. doi:10.1016/j.eti.2022.102651.
- ONU (2022). *Objetivos del Desarrollo Sustentable 2030*. Organización de Las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Salgot M, Folch M (2018) Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2:64-74. doi:10.1016/j.coesh.2018.03.005
- Saravia Matus S, Gil M, Fernandez D, Montañez A, Blanco E, Naranjo L, Llavona A, Sarmanto N (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe. In *Serie Recursos Naturales y Desarrollo, CEPAL*.
- SEMARNAT (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Silva JA (2015). Escenario actual de la gestión comunitaria del agua en México respecto a América Latina y el Caribe. *XX Congreso Internacional de Contaduría, Administración e Informática*, Ciudad Universitaria, México DF.
- Smol M, Mejía A, Howarth M (2023) Business Opportunities in the Water and Wastewater Sector Through the ReSOLVE

Framework. In: Smol M, Prasad MNV, Stefanakis AI (eds) *Water in Circular Economy*. Springer International Publishing, Cham, pp 225-233. doi:10.1007/978-3-031-18165-8_17.

Tang J, Zhang C, Shi X, Sun J, Cunningham JA (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. doi:10.1016/j.jenvman.2018.12.097.

Volschan Junior I, de Almeida R, Cammarota MC (2021) A review of sludge pretreatment methods and co-digestion to boost biogas production and energy self-sufficiency in wastewater treatment plants. *Journal of Water Process Engineering* 40:101857. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101857.