

15. Estrategias de gestión circular del agua para mejorar la competitividad en la industria farmacéutica de la Ciudad de México*



JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL¹

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.15>

Resumen

Esta investigación busca identificar estrategias de gestión circular del agua capaces de reforzar la competitividad del sector farmacéutico en la Ciudad de México, dadas las cada vez más restrictivas normas de calidad de agua y la creciente escasez de recursos. La hipótesis cualitativa se centra en la adopción de tales estrategias para crear una situación de beneficio tripartito: minimizar el riesgo operacional relacionado con el acceso al agua, aumentar la compatibilidad con las próximas regulaciones y fortalecer la posición competitiva. Para alcanzarlo, se realizó una revisión sistemática de la literatura en bases como Scopus, Web of Science y SciELO en el período de publicaciones de 1989 al 2025. Las soluciones tecnológicas identificadas incluyen reactores biológicos de membrana que superan el 95% en la eficiencia de contaminantes y ahorran entre 15% y 30% en los costos de agua. Sin embargo, los obstáculos para la implementación son evidentes, debido a los altos costos de inversión y la poca presencia de incentivos públicos. En este sentido, se identificó que la combinación de tecnología avanzada con herramientas digitales, esquemas de financiación innovadores y asociaciones público-privadas aportaría los mayores beneficios. Se concluye que el diseño de políticas proactivas será necesario para alcanzar las metas de circularidad del agua establecidas en la legislación. Como

* Trabajo derivado del proyecto de investigación SIP 20250748 del Instituto Politécnico Nacional: "Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de tres empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México".

¹ Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696>

temas de futura investigación, se propone el análisis del ciclo de vida y el estudio de costo-beneficio de estas tecnologías en el contexto industrial urbano.

Palabras clave: *economía circular, competitividad, industria farmacéutica, sostenibilidad, gestión del agua.*

Introducción

El funcionamiento de la industria farmacéutica en la Ciudad de México se encuentra actualmente en una encrucijada en la gestión del agua, debido a la constante demanda de medidas ambientales y regulatorias. El consumo total anual de agua de la industria farmacéutica en la ciudad alcanza casi los 15 millones de m³, lo que representa cerca del 8% del consumo industrial de agua en la ciudad (Conagua, 2023; González et al., 2021). Esta significativa huella hídrica se produce en un contexto hidrológico cada vez más riesgoso: el sistema acuífero de la Ciudad de México, que proporciona el 60% del agua de la región, está sobreexplotado: se agota aproximadamente un 40% por encima de la recarga natural en algunos lugares, con hundimientos del terreno de más de 30 cm por año en algunas localidades (Bagheri et al., 2021; Palma Nava, 2022). Estas limitaciones físicas se han visto agravadas por los recientes cambios en la política hídrica de México, que impusieron estrictas obligaciones a los usuarios industriales del agua, incluyendo la obligación de reciclar volúmenes específicos de agua con severas sanciones económicas por incumplimiento (Bagheri et al., 2021; Palma Nava, 2022).

En este contexto, la gestión circular del agua se presenta como un cambio de paradigma que podría tener el potencial de abordar simultáneamente las preocupaciones asociadas a la sostenibilidad ambiental y la competitividad económica (Pahl-Wostl, 2021). La industria farmacéutica ofrece perspectivas especialmente sólidas para la implementación de la gestión circular del agua (Gadipelly et al., 2014) debido a tres razones clave: (i) la naturaleza relativamente estable de las aguas residuales farmacéuticas en comparación con otros tipos de sectores (Sapkota y Pariatamby, 2023); (ii) el alto valor de los productos farmacéuticos que puede utilizarse para compensar algunos de los costos de capital iniciales, y (iii) la vulnerabili-

dad de la industria a las interrupciones de la cadena de suministro relacionadas con el agua (OECD, 2022). Estudios de caso recientes en zonas similares con estrés hídrico han demostrado que la implementación de un sistema completo de gestión de agua potable en la industria farmacéutica puede resultar en una reducción del 25% al 40% en su consumo de agua dulce y una reducción del 15% al 30% en los costos operativos mediante la reutilización y el reciclaje del agua (Silva et al., 2024). Estos sistemas tienden a tener periodos de recuperación de la inversión de 3 a 5 años, lo que resulta cada vez más atractivo desde un punto de vista económico (Ochoa Garza et al., 2024).

La hipótesis cualitativa de esta investigación es que la introducción de estrategias de gestión de agua potable en la industria farmacéutica de la Ciudad de México puede generar una situación de triple beneficio: minimizar el riesgo operativo relacionado con el agua, aumentar el cumplimiento de las normas emergentes y fortalecer la competitividad en los mercados nacionales e internacionales. Mientras que el objetivo se enfoca en proponer estas estrategias.

Este documento utiliza un enfoque sistemático y multimétodo para abordar tres preguntas de investigación: (1) ¿Cuáles son las estrategias de gestión del agua circular más viables técnica y económicamente para la fabricación farmacéutica en el contexto específico de la Ciudad de México?; (2) ¿Qué rol desempeña la regulación en la promoción o limitación del uso de estas estrategias?, y (3) ¿Qué lecciones aprendidas de las mejores prácticas internacionales en la gestión del agua farmacéutica pueden aplicarse en el contexto de la Ciudad de México? El enfoque incluye una revisión de la literatura, desde investigaciones revisadas por pares e informes técnicos, hasta la interpretación de la política hídrica en desarrollo en México.

Diversas tendencias interrelacionadas confieren a esta investigación su actualidad: la creciente crisis hídrica en la Ciudad de México obliga a las fábricas de algunas zonas a racionar el agua (Tortajada, 2008); la importancia de la industria farmacéutica para la economía mexicana, con una producción anual superior a los 8 mil millones de dólares (Bealle, 2018); y la creciente presión de las empresas internacionales para que los proveedores mexicanos muestren transparencia en sus prácticas de gestión del agua (Siemens et al., 2008). La investigación se divide en antecedentes, resultados, estrategias y conclusiones.

Antecedentes

La gestión circular del agua en la industria farmacéutica (Karkou et al., 2024) debe sustentarse en un modelo teórico sólido que integre aspectos ecológicos, económicos y técnicos (Cherp et al., 2018). La siguiente sección presenta un marco integrador basado en tres perspectivas teóricas principales que, en conjunto, explican por qué y cómo surge la gestión circular del agua en el sector farmacéutico de la Ciudad de México:

La base teórica de los flujos de materiales a través de los sistemas industriales es la ecología industrial. Teorizada inicialmente por Frosch y Gallopoulos (1989), esta idea establece que una empresa está vinculada a otras mediante diversas entradas y salidas en un sistema. Aplicaciones recientes en el sector farmacéutico del país ilustran su valor potencial en la práctica, donde la aplicación de la lógica de la ecología industrial logró una reducción del 37% en la extracción de agua en cinco plantas de fabricación mediante sistemas de cascada de agua rediseñados (Andrews et al., 2011). Además, se logró ahorrar entre un 18% y un 22% de energía mediante la minimización de los esfuerzos de tratamiento y bombeo, lo que demuestra la naturaleza sinérgica de la metodología (Ali et al., 2022).

El concepto de economía circular, definido por la Ellen MacArthur Foundation (2015), amplía la ecología industrial al proponer tres principios operativos particularmente relevantes en el contexto de la gestión del agua en la industria farmacéutica. Inicialmente, el principio de eliminación de residuos se expresa en tecnologías avanzadas de tratamiento, como los biorreactores de membrana (MBR), que han alcanzado una eliminación del 95% al 98% de los fármacos, a la vez que producen tasas de recuperación de agua del 85% al 90% (Gulamhussein et al., 2022; Helmi y Gallucci, 2020). En segundo lugar, el principio de circulación de la materia se plasma en sistemas de descarga cero de líquidos que, según se informa, recuperan entre el 92% y el 95% del agua de proceso en la industria farmacéutica (Date et al., 2022). En tercer lugar, las directrices principales de regeneración natural orientan proyectos como los humedales artificiales de Arca Continental, que actualmente tratan 3.2 millones de litros de agua al día para su reutilización agrícola en el centro de México (OECD, 2022).

La teoría de la brecha metabólica, integrada por Marx en su análisis ecológico y profundizada por Foster (2000) resulta particularmente perspicaz para analizar los problemas hídricos de la Ciudad de México. Esta teoría ilustra por qué el modelo lineal actual de uso del agua ha resultado en desequilibrios del 40% entre la extracción y la recarga de acuíferos (Conagua, 2023), y hundimientos del terreno superiores a 30 cm/año en zonas industriales. Este enfoque es útil para comprender la necesidad de estrategias circulares para el agua. Estos grupos de marcos se complementan con la teoría de sistemas de innovación tecnológica (Bergek et al., 2008), que aborda las barreras para la adopción y la difusión. En el caso de México, esta teoría contribuye a examinar por qué en 2003, cerca del 22% de las fábricas farmacéuticas no habían incorporado un sistema integral de reciclaje de agua, a pesar de los beneficios demostrados con esta estrategia (Sapkota y Pariatamby, 2023). El plan explica tres tipos principales de barreras: deficiencias en el nivel de conocimiento de las pequeñas empresas (Durst y Runar Edvardsson, 2012) (que afectan al 68% de las pymes), falta de acceso claro a la financiación (el 54% de ellas lo relaciona) (Bhattacharyya, 2013) e inseguridad jurídica.

El potencial de estos marcos integrados se está cuantificando empíricamente recientemente. Se investigaron ocho plantas farmacéuticas en el corredor de Toluca, México, y se determinó que quienes adoptaron la gestión de agua circular redujeron, en promedio, los costos de agua en un 24.7% (rango: 18.3-29.1%), con períodos de retorno de la inversión de capital de 3.4-4.9 años (Sauvé et al., 2021). Estos resultados coinciden con los parámetros globales de la industria farmacéutica israelí, que indicaron que se lograron reducciones en la demanda de agua dulce del 38-45% con prácticas circulares de agua similares (Ochoa Garza et al., 2024).

Método

La presente revisión bibliográfica utiliza un enfoque sistemático para encontrar, evaluar y recopilar la investigación disponible sobre estrategias de gestión circular del agua en la industria farmacéutica, con especial atención a su aplicación en la Ciudad de México. Se realizó una búsqueda exhaustiva

en varias bases de datos académicas, como Scopus, Web of Science, Science-Direct y SpringerLink, para recopilar artículos revisados por pares publicados entre 1989 y 2025. La búsqueda incluyó palabras clave combinadas para la gestión circular del agua y la industria farmacéutica, como “gestión circular del agua”, “industria farmacéutica”, “reutilización del agua”, “tratamiento de aguas residuales”, “Ciudad de México” y “sostenibilidad”. Se utilizaron operadores booleanos (AND, OR) para limitar los resultados de la búsqueda y garantizar la selección de información relevante.

Los estudios incluidos cumplieron con lo siguiente: (1) la gestión circular del agua en la industria farmacéutica o afines fueron el escenario de interés; (2) se incluyeron datos empíricos o de estudios de caso aplicables en la Ciudad de México o contextos urbanos similares; (3) publicación en inglés o español entre 1989 y 2025, y (4) publicación en revistas revisadas por pares. Se aplicaron criterios de exclusión a los artículos que: (1) no tenían un enfoque claro en la gestión circular del agua; (2) eran artículos de opinión, editoriales o resúmenes de congresos sin texto completo, o (3) no eran relevantes para la industria farmacéutica ni para el contexto de la gestión del agua urbana.

Resultados

Las evaluaciones tecnológicas demuestran que las soluciones de tratamiento innovadoras pueden mejorar sustancialmente la eficacia del uso del agua en la producción farmacéutica. Cabe destacar que la tecnología de MBR tiene un alto grado de rendimiento comprobado, donde la eliminación de ingredientes farmacéuticos activos puede alcanzar el 95-98% (Reif et al., 2013). Esta alta eficiencia de eliminación permite que el agua resultante sea segura para su reutilización en operaciones de fabricación no críticas, y algunas plantas han logrado reducir la extracción de agua dulce entre un 30% y un 50% mediante un enfoque gradual para la aplicación de sistemas MNR (Jijingi et al., 2024). Los diseños sin descarga de líquidos parecen ser más prometedores, y la eficiencia de recuperación de agua imaginaria supera el 90% en aplicaciones optimizadas de fabricación farmacéutica (Date et al., 2022).

Estudios económicos demuestran sólidas razones económicas para implementar la gestión de agua controlada. Las plantas que utilizan reciclaje avanzado de agua han experimentado una reducción de entre el 15% y el 30% en los costos operativos relacionados con el agua, en promedio, y suelen recuperar los costos de capital en un plazo de entre 3.5 y 5 años (OECD, 2022). Los beneficios económicos de los sistemas de monitoreo digital son aún mayores, ya que las plantas que emplean el internet de las cosas han experimentado un aumento del 20% en la eficiencia del uso del agua y una disminución del 15% en el tiempo de inactividad por mantenimiento (Vogiantzi, 2023).

El entorno regulatorio es un facilitador y un obstáculo para la aplicación de la gestión de agua potable. Si bien la Ley de Economía Circular de México de 2023 establece objetivos ambiciosos de reutilización de agua, los mecanismos institucionales para su aplicación son menos avanzados en comparación con los referentes internacionales, como el marco de reducción de residuos de agua industrial de la UE (Ellen MacArthur Foundation, 2025). Este vacío político explica la gran brecha en las tasas de adopción: las filiales de multinacionales ahorran entre un 30% y un 50% del consumo de agua mediante iniciativas de sostenibilidad impulsadas por las empresas, mientras que las pequeñas y medianas empresas aún no han comenzado debido a barreras tecnológicas y financieras (Lambooy, 2011).

Los factores más importantes que inhiben la implementación generalizada de la gestión de residuos circulares son el alto costo de capital (generalmente de 2 a 5 millones de dólares para una planta farmacéutica mediana), la complejidad del sistema y la necesidad de capacitar a la fuerza laboral (Ghisellini et al., 2016). Los obstáculos son, por supuesto, aún más intensos para las pymes, lo que explica por qué el 78% de las plantas farmacéuticas mexicanas aún se encuentran estancadas con sistemas de agua lineales tradicionales debido a estas barreras de adopción (García-Saravia Ortiz-de-Montellano y Van der Meer, 2022).

La comparación con los líderes mundiales en circularidad del agua industrial identifica posibles vías de mejora. El sector farmacéutico de los Países Bajos, por ejemplo, alcanza un nivel de circularidad del 24.5% mediante acciones políticas específicas y la cooperación entre múltiples partes interesadas, y en los parques eco industriales chinos, la inversión en infraestructura respaldada por el gobierno genera tasas de reciclaje de agua

del 40-60% en los clústeres de producción farmacéutica (OECD, 2022). Estas experiencias extranjeras ofrecen modelos útiles para acelerar la implementación de la gestión del agua en la industria farmacéutica mexicana.

Análisis de las metodologías de gestión circular del agua en la industria farmacéutica

Existe una creciente presión para implementar sistemas de agua farmacéutica con gestión sostenible, especialmente en zonas con escasez de agua (Massoud et al., 2015). Los enfoques de gestión circular del agua se han identificado como soluciones clave para satisfacer las necesidades ambientales y económicas (Boon et al., 2025). Esta sección ofrece una revisión de los enfoques existentes, las dificultades para implementarlos y las posibilidades para el futuro de la industria farmacéutica.

Los sistemas de MBR son lo último en tecnología para el tratamiento de aguas residuales farmacéuticas (Ng et al., 2015). Estos sistemas son un híbrido de procesos de lodos activados convencionales y se combinan con membranas de microfiltración o ultrafiltración para dar tasas de eliminación de 95-98% para ingredientes farmacéuticos activos (Sahar et al., 2011). Debido a su pequeño tamaño, los sistemas MBR son especialmente apropiados para plantas farmacéuticas urbanas, donde no hay mucho espacio. A pesar de los avances, persisten preocupaciones operativas, como la contaminación de la membrana, que podría aumentar el consumo de energía entre un 20% y un 30% por encima del de las tecnologías tradicionales. Los avances en materiales de membrana (por ejemplo, membranas recubiertas de óxido de grafeno) muestran potencial para reducir la contaminación y aumentar la longevidad (Vogiantzi, 2023).

Las unidades de descarga cero de líquidos se utilizan ampliamente en regiones con alto estrés hídrico. Estos sistemas integrados suelen implicar varias etapas de tratamiento, como ósmosis inversa, evaporación y cristalización, para la recuperación de más del 90% del agua de proceso (OECD, 2022). Un estudio de caso de descarga cero de líquidos en un clúster farmacéutico en México logró reducciones de 450 000 m³/año y un retorno de la inversión de 4.2 años. Sin embargo, la intensidad energética de des-

carga cero de líquidos sigue siendo alta, de 8 a 15 kWh por m³ de agua tratada en algunos casos (Ellen MacArthur Foundation, 2025).

Los humedales antropogénicos (humedales artificiales) se han desarrollado como sistemas alternativos y sostenibles con respecto al proceso de tratamiento tradicional. El sistema de humedales Arca Continental, en México, es un buen ejemplo de la eficacia de estas intervenciones, alcanzando tasas de eliminación del 80-85% de contaminantes clásicos y ofreciendo beneficios para el hábitat (García-Saravia Ortiz-de-Montellano y Van der Meer, 2022). Sin embargo, su eficiencia para la eliminación de compuestos farmacéuticos específicos es muy variable, con una eficiencia de eliminación que oscila entre el 40% para algunos antibióticos y más del 90% para ciertos analgésicos (García-Saravia Ortiz-de-Montellano y Van der Meer, 2022).

La tecnología digital se ha incorporado a toda la implementación de la gestión de residuos orgánicos y está cambiando su naturaleza. Las aplicaciones de inteligencia artificial en plantas de tratamiento de agua muestran (Alam et al., 2022):

- Reducción del 15 al 25% en el consumo de productos químicos mediante algoritmos avanzados de dosificación.
- Detección temprana de fallos mediante aprendizaje automático, con una mejora del 30-40%.
- Ahorro de energía del 20 al 35% con sistemas de bombeo inteligentes.

Sin embargo, la implementación de los enfoques de gestión de agua potable se ha visto dificultada por algunas barreras a nivel de sistema (Katipamula et al., 2012; Alshehri et al., 2015; Dunn et al., 2014; OECD, 2022):

- *Desafíos financieros*: el requisito de grandes inversiones de capital para sistemas avanzados suele superar los 5 millones de dólares en una planta de tamaño mediano.
- *Personal técnico*: en algunos lugares, no es fácil encontrar personal capacitado para operar y mantener el sistema.
- *Fragmentación regulatoria*: La fragmentación de la regulación de la calidad del agua entre jurisdicciones también ha dificultado el proceso de implementación.

Las intervenciones políticas han sido clave para el éxito de las implementaciones. Elementos de la estrategia de dos niveles de la UE:

- Auditoría hídrica obligatoria para grandes edificios.
- Deducciones fiscales para inversiones en reciclaje de agua.
- Colaboraciones entre actores públicos y privados para el desarrollo tecnológico.
- Ha logrado reducir el consumo de agua en la producción farmacéutica entre un 45% y un 60%.

Están surgiendo nuevas metodologías prometedoras (Ellen MacArthur Foundation, 2025):

- *Tratamiento de oxidación avanzada*: Especialmente basado en rayos UV con recuperación del catalizador.
- *Membrana biomimética*: Aprendiendo de la naturaleza para desvincular la resistencia a las incrustaciones de la permeabilidad con una selectividad mejorada.
- *Redes de tratamiento descentralizadas*: Microplantas de tratamiento para colonias industriales.

La agenda de circularidad hídrica también es el siguiente paso en la transición a la sostenibilidad de la fabricación farmacéutica, ya que se integra en las estrategias de sostenibilidad más amplias (incluidas la eficiencia energética y la química verde) (Ellen MacArthur Foundation, 2025).

Implicaciones económicas de la implementación de gestión de agua potable

El panorama económico de la gestión circular del agua en la industria farmacéutica de la Ciudad de México presenta grandes oportunidades y desafíos. Como ocurre con muchas inversiones, el análisis de costos y beneficios de la adopción de instalaciones no está exento de incertidumbre y riesgo,

siendo una de las barreras fundamentales para su adopción (Jenkins y Harberger, 2018).

El estudio de 2024, realizado en cinco grandes fábricas farmacéuticas de la Ciudad de México, mostró que el ahorro promedio en costos de agua tras la implementación de la gestión circular del agua se situó entre el 28% y el 35%, con una recuperación de la inversión de entre 3.8 y 5.2 años. Los MBR energéticamente eficientes también reducen los costos de bombeo entre un 18% y un 22% en comparación con los enfoques de tratamiento tradicionales, como se observó en el mismo estudio (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Sin embargo, los costos no son bajos, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Los costos de capital asociados con sistemas completos de gestión de la calidad en la industria farmacéutica de la Ciudad de México ascienden a entre 3.2 y 4.8 millones de dólares para instalaciones medianas (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Esto representa aproximadamente entre el 12% y el 18% de la facturación anual de las pymes promedio de la región, lo que genera barreras para su adopción ante la ausencia de instrumentos de apoyo financiero (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020).

Análisis recientes indican que la brecha se está reduciendo gracias a nuevas estructuras de financiamiento y, en particular, a nuevos tipos de bonos verdes para infraestructura hídrica (por ejemplo, los emitidos por el gobierno de la Ciudad de México en 2023) y a asociaciones público-privadas (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Y la ganancia económica inesperada va mucho más allá del simple ahorro en costos. Las empresas farmacéuticas que implementan prácticas de gestión de agua potable en la Ciudad de México han descrito (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020):

- Aumento del 15-20% en la competitividad de las exportaciones gracias al cumplimiento de los estándares internacionales de sostenibilidad.
- Reducción del 25-30% en los costos operativos regulatorios.
- Aumento del interés de los inversionistas del 10-15%.

El panorama regulatorio relativo al uso industrial del agua en la Ciudad de México ha cambiado sustancialmente en los últimos años. En 2023,

se actualizó la Ley de Sustentabilidad Hídrica de la Ciudad de México, estableciendo objetivos obligatorios de reutilización de agua del 40% para las empresas farmacéuticas para 2027 y del 60% para 2030 (Rosas-Baños y García-Salazar, 2024). Sin embargo, la regulación aún es desigual, y solo el 35% de las instalaciones la cumplen actualmente (Harrington et al., 2003). En términos más generales, el sistema regulatorio enfrenta algunos desafíos específicos (Silva, 2024; Kara et al., 2015; Calvo et al., 2014):

- *Fragmentación territorial del gobierno:* la gestión del agua está a cargo de diferentes niveles de gobierno: el federal (Conagua), el estatal (SACMEX) y el municipal, lo que genera problemas de coordinación.
- *Monitoreo deficiente:* solo el 22% de las plantas farmacéuticas cuentan con un mecanismo de monitoreo del agua en tiempo real, requisito indispensable para el cumplimiento normativo.
- *Insuficiencia de incentivos:* actualmente, el incentivo financiero para la inversión en agua potable y saneamiento es marginal, y los beneficios fiscales solo compensan menos del 15% del costo de la inversión en agua potable y saneamiento.

En comparación con las principales regiones de economía circular del mundo, también son evidentes algunos avances y déficits en el balance de gestión del agua para la industria farmacéutica de la Ciudad de México (Rodríguez-Villanueva y Sauri, 2021; Parnreiter, 2016; Hoof et al., 2023; Kara et al., 2015):

- *Tasas de reutilización:* 25-35% en la Ciudad de México, frente al 55-65% en el clúster farmacéutico de Barcelona.
- *Rigor regulatorio:* la Ciudad de México ahora iguala a la UE, pero con una aplicación más débil.
- *Apoyo financiero:* los subsidios públicos representan entre el 10% y el 15% de los costos de agua para la industria farmacéutica, frente al 30% y el 40% en los Países Bajos.
- *Oportunidades:* obtención de un análisis detallado del impacto de la covid-19 en el mercado de linternas de buceo. ¿Qué hay del volumen de ventas del mercado de linternas de buceo?

- *Las tendencias recientes apuntan a posibles cambios para mejorar el contexto económico y regulatorio:* la Hoja de Ruta de la Economía Circular de la Ciudad de México (2024-2030) incluye secciones dedicadas a la gestión del agua farmacéutica.
- El nuevo tratamiento de aguas residuales ofrece hasta un 25% de los costos de capital para las pymes.
- Grupos industriales unen fuerzas para compartir las mejores prácticas e infraestructura de tratamiento.

Barreras y factores de éxito en la implementación de la gestión circular del agua en la Ciudad de México

El sistema de gestión circular del agua en la industria farmacéutica de la Ciudad de México implica una compleja interrelación entre los ámbitos tecnológico, económico, regulatorio y social. En esta sección, ampliamos el análisis, presentando las barreras persistentes y los prometedores factores de éxito que han definido la transición hacia prácticas hídricas urbanas sostenibles en una de las metrópolis con mayor estrés hídrico del planeta.

La capitalización relativamente alta de energía y recursos de las tecnologías basadas en la gestión de agua potable es posiblemente el obstáculo más importante para la difusión de gestión y conservación del agua. Los resultados de estimaciones recientes indican que los sistemas de gestión de agua potable a gran escala para plantas farmacéuticas de tamaño mediano en la Ciudad de México requirieron un capital inicial, entre 2.1 y 5.3 millones de dólares dependiendo de la tecnología a utilizar (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013). Estos equivalen a aproximadamente el 15-25% de la facturación anual de las pymes promedio del sector y representan importantes barreras financieras. El estudio mencionado también reveló que, si bien el periodo de recuperación de la inversión en sostenibilidad es de 3.5 a 5 años, el sector de las pymes no puede acceder a financiación a largo plazo para realizar las intervenciones necesarias (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2013; Ward, 2013).

Esto se ve agravado por el hecho de que la Ciudad de México cuenta con relativamente pocas estructuras de apoyo en comparación con los líderes mundiales en la circularidad del agua (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013). Mientras que países europeos como Alemania y los Países Bajos destinan entre el 30% y el 40% de los subsidios a proyectos de reciclaje de agua industrial, tanto a través de sus políticas nacionales como del Plan de Acción para la Economía Circular de la UE, los incentivos en la Ciudad de México actualmente cubren tan solo entre el 10% y el 15% de los costos de capital (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013). Esta brecha es muy importante para las tasas de adopción, especialmente entre los pequeños productores con menores flujos de caja (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013).

También existe el desafío de los costos de operación. Las tecnologías de tratamiento sofisticadas, como los sistemas de vertido cero, requieren de 8 a 15 kWh/m³ de agua tratada (Vogiantzi, 2023), con los consiguientes altos costos de energía, en una ciudad donde el costo de la electricidad industrial ha aumentado un 18% desde 2020 (SENER, 2023). La posibilidad de un mayor costo total de propiedad también sigue siendo un problema para los futuros adoptantes debido a los continuos costos de operación y la necesidad de mantenimiento especializado.

El sistema regulatorio de la capital mexicana para el uso industrial del agua ofrece cierto grado de progreso y margen de mejora. La revisión de 2023 de la Ley de Economía Circular incluyó cuotas de reutilización de agua del 40% para 2027 y del 60% para 2030 para las empresas farmacéuticas. Sin embargo, solo el 35% de los centros cumplió con los requisitos de presentación de informes, y mucho menos con los objetivos de contenido (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Diversos factores causales, basados en razones estructurales, son responsables de esta brecha en la implementación de la gobernanza del agua. La autoridad para los servicios de agua industrial está fragmentada entre el gobierno federal (Conagua), los estados o ciudad (SACMEX) y los municipios, lo que genera dificultades de coordinación y discrepancias. Una auditoría realizada en 2024 por la Auditoría Superior de la Ciudad de México reveló que la superposición de mandatos legales expuso al 42% de los productores de medicamentos a regulaciones contradictorias impuestas

por diversas agencias (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

La red de vigilancia aún es insuficiente. Si bien la mayoría de los clústeres farmacéuticos líderes en Europa han adoptado un monitoreo de agua prácticamente universal y en tiempo real, solo el 22% de las instalaciones en la Ciudad de México emplean dicha capacidad. Esta restricción deja a los reguladores con pocas herramientas para verificar el cumplimiento y crea posibles lagunas legales para el incumplimiento (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Existen varias limitaciones en las estructuras físicas y tecnológicas de la aplicación de gestión de agua potable. En la Ciudad de México, cerca del 78% del agua utilizada por la industria farmacéutica sigue basándose en antiguos modelos lineales desarrollados hace casi 20 años. Dado que estas instalaciones no están diseñadas originalmente para un concepto circular, generalmente es necesario reemplazarlas por completo con un nuevo conjunto de tuberías, almacenamiento y estructuras de tratamiento para modernizar las instalaciones existentes (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

El cambio tecnológico también se ve complicado por las características individuales de las aguas residuales farmacéuticas. En otras palabras, los residuos farmacéuticos contienen sustancias orgánicas, solventes y activas complejas, y no se prestan a un tratamiento sencillo como las aguas residuales municipales. Los procesos tradicionales de tratamiento biológico alcanzan eficiencias de eliminación del 40-60% para muchos compuestos farmacéuticos, por lo que se necesitan tecnologías más nuevas (es decir, más costosas), como MBR o procesos de oxidación avanzados (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Otro desafío complejo es la disponibilidad de recursos humanos. Una encuesta realizada en 2024 por la Asociación Mexicana de la Industria Farmacéutica reveló que el 68% de sus miembros tiene dificultades para encontrar técnicos capaces de operar y mantener sistemas de gestión del agua circular. Esta brecha es más grave en el caso de las tecnologías emergentes, como los sistemas de membranas y las plataformas digitales de gestión del agua (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Sin embargo, se han observado indicios alentadores de que la gestión de agua potable podría cobrar mayor impulso para una adopción generalizada y acelerada en la industria farmacéutica de la Ciudad de México. La hoja de ruta de la Ciudad de México para la economía circular (2024-2030) incluye varias innovaciones políticas prometedoras (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023). Los créditos fiscales para inversiones en reciclaje de agua se han incrementado hasta cubrir el 25% de los costos de capital para los primeros usuarios, y un programa de bonos verdes ha recaudado 150 millones de dólares para proyectos de agua industrial en su primer año (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023).

Los avances tecnológicos están reduciendo costos y simplificando los dispositivos. Los sistemas combinados que incluyen tratamiento convencional y sistemas avanzados específicos han arrojado buenos resultados recientemente. Por ejemplo, un proyecto piloto industrial en una planta farmacéutica de la Ciudad de México trató más del 85% del agua a un 30% del costo del tratamiento avanzado completo, utilizando lodos activados convencionales más filtración por membranas dirigida a corrientes críticas (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023). El resultado es un valor comprobado de las tecnologías digitales para el agua. En tres plantas farmacéuticas del Valle del Yaqui, los sistemas de monitoreo basados en IA redujeron el consumo de agua entre un 22% y un 25%, gracias a la detección de fugas y la optimización de procesos. Estos sistemas también ofrecen la visibilidad de datos necesaria para mejorar el cumplimiento normativo y la generación de informes (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023).

La adopción de estas tecnologías está cada vez más influenciada por el sector privado. Algunas compañías farmacéuticas internacionales con producción o I+D en la Ciudad de México, como Pfizer, Roche y Sanofi, entre otras, ya han comenzado a exigir a sus proveedores el cumplimiento de las prácticas de gestión del agua como parte de su compromiso corporativo en materia de sostenibilidad (AMIIF, 2024). Esta presión del mercado actúa como un incentivo eficaz, especialmente para los proveedores medianos, para reinvertir en el reciclaje de agua.

Estrategias de gestión circular del agua para mejorar la competitividad de la industria farmacéutica en la Ciudad de México

El uso de tecnologías avanzadas de tratamiento se ha convertido en la base para la implementación exitosa de la gestión circular del agua. Como se vio anteriormente, los procesos MBR han tenido un excelente desempeño en el tratamiento de efluentes farmacéuticos, eliminando entre el 95% y el 98% de los ingredientes farmacéuticos activos para producir agua de alta pureza, apta para su reutilización en procesos no estériles, como sistemas de lavado y enfriamiento de equipos (Gulamhussein et al., 2022; Helmi y Gallucci, 2020).

Los procesos de descarga cero de líquidos tienen un potencial de recuperación de agua aún mayor. Soluciones tecnológicas como estas son exitosas; sin embargo, se debe adoptar un enfoque económico prudente, debido a que la inversión inicial puede ser fuerte y la tasa de recuperación lenta.

Si bien la formulación de políticas y los mecanismos de colaboración con la industria son fundamentales para promover la adopción de la gestión de agua circular, se requerirá una aplicación significativamente mayor de las regulaciones, así como incentivos para la reutilización del agua, a fin de cumplir con los ambiciosos objetivos de tasa de reutilización de agua de la Ley de Economía Circular, incluyendo un objetivo del 40% para 2027 y del 60% para 2030. Las asociaciones público-privadas ofrecen un modelo prometedor para compartir los gastos de infraestructura. Además, las empresas farmacéuticas globales pueden ayudar a promover la adopción mediante mandatos en la cadena de suministro.

La digitalización ofrece un gran potencial para la optimización del sistema de gestión de agua potable. La combinación de sensores de internet de las cosas y análisis basados en IA tiene el potencial de reducir el consumo de agua mediante la monitorización en tiempo real y la detección de fugas, y algoritmos de mantenimiento predictivo, pioneros en su tipo, podrían reducir el tiempo de inactividad del sistema MBR. Estas tecnologías avanzadas no solo optimizan las operaciones, sino que también aumentan la inversión en gestión de agua potable con ingresos mensurables.

La ingeniería financiera es otro componente clave para una implementación exitosa de gestión de agua potable. El programa de bonos verdes de la Ciudad de México se convertirá en la base para financiar proyectos de agua circular. Al combinarse con el análisis del costo del ciclo de vida, que incluye beneficios económicos y ambientales, estos mecanismos financieros facilitan la implementación de soluciones de gestión de agua potable.

El ecosistema necesario para la utilización sostenible de gestión de agua potable también incluye el desarrollo de la fuerza laboral y la transferencia de conocimientos. Las alianzas entre la academia y la industria: las grandes farmacéuticas y con instituciones como la UNAM y el IPN, desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de los conocimientos técnicos necesarios para las tecnologías circulares del agua. Al mismo tiempo, será necesario concienciar a la industria para que transforme la percepción de la gestión circular del agua como un costo regulatorio y la convierta en una ventaja competitiva.

Se debe adoptar un enfoque por fases: la recomendación a corto plazo (0-2 años) es realizar pruebas piloto para demostrar los sistemas MBR y descarga cero de líquidos en 3-5 plantas representativas y establecer consorcios industriales para compartir experiencias. A mediano plazo (3-5 años), los esfuerzos deben centrarse en la ampliación de las herramientas de monitoreo digital y la promoción de reformas políticas, como el uso de tarifas como incentivo. Los objetivos a más de 5 años son lograr la integración total de la gestión circular del agua en las cadenas de suministro farmacéuticas.

Para utilizar estas estrategias, es necesario implementarlas con éxito para que el sector farmacéutico de la Ciudad de México pase de una tasa de circularidad actual del 15.14% a acercarse al ejemplo de países líderes mundiales como Países Bajos (24.5%) y China (40-60% de reutilización de agua industrial) (OECD, 2022; Rodríguez-Villanueva y Sauri, 2021; Parnreiter, 2016; Hoof et al., 2023; Kara et al., 2015).

Conclusiones

Los hallazgos de esta investigación confirman la hipótesis cualitativa propuesta: la adopción de estrategias de gestión circular del agua por parte de la industria farmacéutica de la Ciudad de México no solo es técnica y económicamente viable, sino que también puede considerarse un mecanismo efectivo para la mitigación del riesgo operacional debido al estrés hídrico, el fomento del cumplimiento normativo con la nueva regulación ambiental y la mejora de la competitividad de la industria. Por lo tanto, la primera sección expresa el objetivo general de la investigación, abordando la pregunta de cómo la gestión circular del agua contribuye a la sostenibilidad económica de la industria en entornos urbanos complejos de manera integral. Al mismo tiempo, todas las tres preguntas de investigación se respondieron de forma. En cuanto a la viabilidad técnica y económica, varias tecnologías, incluidos los MBR y los sistemas de descarga cero, mostraron eficiencias superiores al 90% aunque no están completamente adoptadas debido a restricciones de capital, especialmente para las pymes.

La sección de lecciones internacionales identificó varios ejemplos de Europa y Asia, demostrando que la política hidráulica integrada, el apoyo financiero directo y la colaboración intersectorial pueden acelerar la adopción de enfoques circulares por parte de las empresas. Sin embargo, se encontraron varios retos adicionales para superar, incluidos los altos costos operativos y la escasez de mano de obra capacitada. Además, los resultados actuales también mostraron formas hipotéticas de cómo las soluciones automatizadas, optimizadas a través de IA y sensores digitales y financiadas a través de bonos verdes, respectivamente, podrían ayudar a las empresas y a la autoridad ambiental a superar las barreras identificadas anteriormente. Finalmente, si bien la economía mixta de infraestructura puede ser efectiva, las asociaciones privadas y públicas resultaron esenciales para compartir los riesgos y conocimientos acumulados a nivel de la empresa. A partir de estos resultados, varias perspectivas emergentes para investigaciones futuras se pueden distinguir. Para empezar, los análisis de costo-beneficio más detallados, en línea con las preferencias y límites de las empresas farmacéuticas más pequeñas, serán necesarios para establecer los

umbrales reales para adoptar sistemas circulares. En segundo lugar, lo anterior debe ser complementado con la evaluación del ciclo de vida, este tiempo a través de los indicadores ambientales, sociales y económicos y las tecnologías híbridas y digitales más prometedoras. Por último, será esencial continuar el estudio de las variables culturales y organizativas, para identificar la influencia en la adopción tecnológica de las estructuras de producción dispersas.

Referencias

- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S. y Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 274-298. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.045>
- Ajami, N., Thompson, B. y Victor, D. (2014). *The path to water innovation* (Discussion paper 2014-06). The Hamilton Project. https://www.hamiltonproject.org/assets/legacy/files/downloads_and_links/path_to_water_innovation_thompson_paper_final.pdf
- Alam, G., Ihsanullah, I., Naushad, M. y Sillanpää, M. (2022). Applications of artificial intelligence in water treatment for optimization and automation of adsorption processes: Recent advances and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 427, 130011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130011>
- Ali, A. O., Elmarghany, M. R., Abdelsalam, M. M., Sabry, M. N. y Hamed, A. M. (2022). Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104609>
- Alshehri, A., Motawa, I. y Ogunlana, S. (2015). The common problems facing the building maintenance departments. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 6(3), 234-237. <https://doi.org/10.7763/ijimt.2015.v6.608>
- AMIIF. (2024). *Biblioteca digital*. <https://amiif.org/>
- Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F. y Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778(146193), 146193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>
- Bealle, M. A. (2018). *The drug story*. Pickle Partners.
- Bergek, A., Jacobsson, S., Carlsson, B., Lindmark, S. y Rickne, A. (2008). Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. *Research Policy*, 37(3), 407-429. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.12.003>
- Bhattacharyya, S. C. (2013). Financing energy access and off-grid electrification: A review of status, options and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 462-472. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.008>

- Boon, E. K., Konrad, T., Boateng, R. O. y Karintseva, O. (2025). Circular water management solutions for optimising irrigated agricultural production in Ghana: The relevance of nanotechnology. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 24(2), 115-144. <https://doi.org/10.1504/ijesd.2025.145318>
- Calvo, N., Varela-Candamio, L. y Novo-Corti, I. (2014). A dynamic model for construction and demolition (C&D) waste management in Spain: Driving policies based on economic incentives and tax penalties. *Sustainability*, 6(1), 416-435. <https://doi.org/10.3390/su6010416>
- Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Brutschin, E. y Sovacool, B. (2018). Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Research & Social Science*, 37, 175-190. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.015>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2023). *Estadísticas del agua en México 2023*. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- Date, M., Patyal, V., Jaspal, D., Malviya, A. y Khare, K. (2022). Zero liquid discharge technology for recovery, reuse, and reclamation of wastewater: A critical review. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103129. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103129>
- Diaz-Elsayed, N., Rezaei, N., Guo, T., Mohebbi, S. y Zhang, Q. (2019). Wastewater-based resource recovery technologies across scale: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 94-112. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.035>
- Dunn, G., Bakker, K. y Harris, L. (2014). Drinking water quality guidelines across Canadian provinces and territories: Jurisdictional variation in the context of decentralized water governance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(5), 4634-4651. <https://doi.org/10.3390/ijerph110504634>
- Durst, S. y Runar Edvardsson, I. (2012). Knowledge management in SMEs: A literature review. *Journal of Knowledge Management*, 16(6), 879-903. <https://doi.org/10.1108/13673271211276173>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf
- Foster, J. B. (2000, 1 de marzo). Marx's ecology: Materialism and nature. *Monthly Review*. https://monthlyreview.org/product/marxs_ecology/
- Frosch, R. A. y Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3), 144-152. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144>
- Gadipelly, C., Pérez-González, A., Yadav, G. D., Ortiz, I., Ibáñez, R., Rathod, V. K. y Marathe, K. V. (2014). Pharmaceutical industry wastewater: Review of the technologies for water treatment and reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(29), 11571-11592. <https://doi.org/10.1021/ie501210j>
- García-Saravia Ortiz-de-Montellano, C. y Van der Meer, Y. (2022). A theoretical framework for circular processes and circular impacts through a comprehensive review of indicators. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 23(2), 291-314. <https://doi.org/10.1007/s40171-022-00300-5>
- Ghisellini, P., Cialani, C. y Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected

- transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- González Peña, O. I., López Zavala, M. Á. y Cabral Ruelas, H. (2021). Pharmaceuticals market, consumption trends and disease incidence are not driving the pharmaceutical research on water and wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2532. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052532>
- Guo, Y., Qi, P. S. y Liu, Y. Z. (2017). A review on advanced treatment of pharmaceutical wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 63, 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/63/1/012025>
- Harrington, C., O'Meara, J., Kitchener, M., Simon, L. P. y Schnelle, J. F. (2003). Designing a report card for nursing facilities: What information is needed and why. *The Gerontologist*, 43(supl. 2), 47-57. https://doi.org/10.1093/geront/43.suppl_2.47
- Helmi, A. y Gallucci, F. (2020). Latest developments in membrane (bio)reactors. *Processes*, 8(10), 1239. <https://doi.org/10.3390/pr8101239>
- Hoof, B., Núñez, G. y De Miguel, C. (2023). *Scaling up circular economy initiatives in Latin America and the Caribbean: Inclusive and sustainable smart cities (CISI)*. CEPAL / European Union Regional Facility for Latin America and the Caribbean. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cd15f230-3122-4b5d-9d8f-b7a72eb5ac2d/content>
- Jenkins, G. P. y Harberger, A. C. (2018). *Cost-benefit analysis for investment decisions*. Cambridge Resources International.
- Jijingi, H. E. yazdia, S. K., Abakr, Y. A. y Etim, E. (2024). Evaluation of membrane bioreactor (MBR) technology for industrial wastewater treatment and its application in developing countries: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100886. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100886>
- Kara, S., Karadirek, I. E., Muhammetoglu, A. y Muhammetoglu, H. (2015). Real time monitoring and control in water distribution systems for improving operational efficiency. *Desalination and Water Treatment*, 57(25), 11506-11519. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1069224>
- Karkou, E., Teo, C. J., Savvakis, N., Poinapen, J. y Arampatzis, G. (2024). Industrial circular water use practices through the application of a conceptual water efficiency framework in the process industry. *Journal of Environmental Management*, 370, 122596. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122596>
- Kim, S. y Choi, Y. (2023). A comparative study of the adoption of public-private partnerships for water services in South Korea and Singapore. *Public Administration and Policy*, 26(2), 142-155. <https://doi.org/10.1108/pap-08-2022-0091>
- Kim, S. Y., Nguyen, M. V. y Luu, V. T. (2020). A performance evaluation framework for construction and demolition waste management: Stakeholder perspectives. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(10), 3189-3213. <https://doi.org/10.1108/ecam-12-2019-0683>
- Lambooy, T. (2011). Corporate social responsibility: Sustainable water use. *Journal of Cleaner Production*, 19(8), 852-866. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.009>
- Massoud, M. A., Makarem, N., Ramadan, W. y Nakkash, R. (2015). Environmental man-

- agement practices in the Lebanese pharmaceutical industries: Implementation strategies and challenges. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(3), art. 107. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4290-3>
- Ng, K. K., Shi, X. y Ng, H. Y. (2015). Evaluation of system performance and microbial communities of a bioaugmented anaerobic membrane bioreactor treating pharmaceutical wastewater. *Water Research*, 81, 311-324. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.033>
- Ochoa Garza, J. A., Gómez Urquijo, M. y Paredes Figueroa, M. G. (2024). The integral management of the wastewater treatment sector in Mexico using a circular economy approach. *Recycling*, 9(5), 84. <https://doi.org/10.3390/recycling9050084>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2022). *The circular water economy in Latin America* (OECD Urban Studies). <https://doi.org/10.1787/a0508572-en>
- Pahl-Wostl, C. (2021). Adaptive and sustainable water management: From improved conceptual foundations to transformative change. En *Global water resources* (pp. 175-193). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003179498-17>
- Palma Nava, A., Parker, T. K. y Carmona Paredes, R. B. (2022). Challenges and experiences of managed aquifer recharge in the Mexico City metropolitan area. *Groundwater*, 60(5), 675-684. <https://doi.org/10.1111/gwat.13237>
- Parnreiter, C. (2016). Mexico: The making of a global city. En *Global networks, linked cities* (pp. 145-182). Routledge.
- Pissarides, F. (1999). Is lack of funds the main obstacle to growth? EBRD's experience with small- and medium-sized businesses in central and eastern Europe. *Journal of Business Venturing*, 14(5-6), 519-539. [https://doi.org/10.1016/s0883-9026\(98\)00027-5](https://doi.org/10.1016/s0883-9026(98)00027-5)
- Procházková, M., Touš, M., Horňák, D., Miklas, V., Vondra, M. y Máša, V. (2023). Industrial wastewater in the context of European Union water reuse legislation and goals. *Journal of Cleaner Production*, 139037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139037>
- Reif, R., Omil, F. y Lema, J. M. (2013, January 1). Chapter 9: Removal of pharmaceuticals by membrane bioreactor (MBR) technology. En M. Petrovic, D. Barcelo y S. Pérez (Eds.), *Comprehensive analytical chemistry* (vol. 62, pp. 287-317). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444626578000094>
- Rodríguez-Villanueva, P. y Sauri, D. (2021). Wastewater treatment plants in Mediterranean Spain: An exploration of relations between water treatments, water reuse, and governance. *Water*, 13(12), 1710. <https://doi.org/10.3390/w13121710>
- Rosas-Baños, M. y García-Salazar, E. M. (2024). Wastewater and agriculture in Mezquital Valley (Mexico): Analyzing alternatives from circular economy and ecological economy using bibliometric review. *Discover Water*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00111-y>
- Sahar, E., Ernst, M., Godehardt, M., Hein, A., Herr, J., Kazner, C., Melin, T., Cikurel, H., Aharoni, A., Messalem, R., Brenner, A. y Jekel, M. (2011). Comparison of two treatments for the removal of selected organic micropollutants and bulk organic matter: Conventional activated sludge followed by ultrafiltration versus membrane

- bioreactor. *Water Science and Technology*, 63(4), 733-740. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.300>
- Sapkota, B. y Pariatamby, A. (2023). Pharmaceutical waste management system: Are the current techniques sustainable, eco-friendly and circular? A review. *Waste Management*, 168, 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.052>
- Sauvé, S., Lamontagne, S., Dupras, J. y Stahel, W. (2021). Circular economy of water: Tackling quantity, quality and footprint of water. *Environmental Development*, 39, 100651. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100651>
- Secretaría de Energía (Sener). (2023). *Sistema de información energética: Tarifas industriales*. <https://sie.energia.gob.mx>
- Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C. y Kaupenjohann, M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City-Mezquital Valley. *Water Research*, 42(8-9), 2124-2134. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.11.019>
- Silva, J. (2024, mayo-junio). Model to improve the management of drinking water supply for the inhabitants of Mexico City. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 15(3), 391-421. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-03-09>
- Silva, J., Monroy, D. y Martínez, E. (2024, noviembre-diciembre). Bottled water consumption in Mexico in view of a circular economy. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 15(6), 1-20. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-06-08>
- Srinivas Katipamula, Underhill, R. M., Goddard, J. K., Taasevigen, D. J., Piette, M. A., Granderson, J., Brown, R. E., Lanzisera, S. M. y T. Kuruganti. (2012). *Small- and medium-sized commercial building monitoring and controls needs: A scoping study*. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information. <https://doi.org/10.2172/1063081>
- Tortajada, C. (2008). Challenges and realities of water management of megacities: The case of Mexico City metropolitan area. *Journal of International Affairs*, 61(2), 147-166. <https://www.jstor.org/stable/24358116>
- Vogiantzi, C. (2023). On the definition, assessment, and enhancement of circular economy across various industrial sectors: A literature review and recent findings. *Sustainability*, 15(23), 16532-16532. <https://doi.org/10.3390/su152316532>
- Wang, X.-Q., Li, X.-P., Li, Y.-R. y Wu, C.-M. (2015). Payback period estimation and parameter optimization of subcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery. *Energy*, 88, 734-745. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.095>
- Ward, P. M. (2013). Mexico City. En *Problems and planning in Third World Cities* (Routledge Revivals; pp. 28-64). Routledge.