

Recuperación de aguas grises para riego urbano: hacia una economía circular del agua en México.

Greywater recovery for urban irrigation: towards a circular water economy in Mexico.

Elsa Gloria Benítez Manzo (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/Campus Acapulco.
MM24320001@acapulco.tecnm.mx

Mariana Martínez Castrejón* (2). SECIHTI-UAGro Centro de Ciencias de Desarrollo Regional. Tecnológico Nacional de México/Campus Acapulco. Acapulco, Guerrero, mariana.mc@acapulco.tecnm.mx.

Mónica Zárate Juárez (3). Tecnológico Nacional de México/Campus Acapulco. Acapulco, Guerrero.
monica.zj@acapulco.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 11, 2025; aceptado en octubre 21, 2025.

Resumen.

El presente trabajo analiza la viabilidad técnica y social de los humedales construidos como alternativa para la recuperación y el reúso de aguas grises en México, con énfasis en su potencial agrícola-urbano y el marco normativo aplicable. Se realizó una revisión narrativa de la literatura, priorizando artículos científicos en revistas indexadas, de la que se recuperaron nueve referencias clave sobre parámetros de eficiencia, dieciocho sobre potencial de reúso y tres normas oficiales mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-003-ECOL-1997 y NOM-127-SSA1-2021). Los resultados evidencian que los humedales construidos logran altas eficiencias en la remoción de contaminantes convencionales y ofrecen ventajas en términos de bajo costo y sostenibilidad. No obstante, las normas mexicanas presentan vacíos importantes al no considerar contaminantes emergentes ni lineamientos específicos para estas tecnologías. Se concluye que la actualización normativa resulta indispensable para avanzar hacia una economía circular del agua, donde el reúso de aguas grises tratadas sea un componente estratégico de sostenibilidad hídrica y resiliencia urbana.

Palabras claves: Aguas grises, economía circular, humedales artificiales, reúso de agua, riego urbano.

Abstract.

This study analyzes the technical and social feasibility of constructed wetlands as an alternative for the recovery and reuse of greywater in Mexico, focusing on its agricultural-urban potential and the applicable regulatory framework. A narrative literature review was conducted, prioritizing peer-reviewed articles published in indexed journals. Nine key references on efficiency parameters, eighteen on reuse potential, and three Mexican standards (NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-003-ECOL-1997, and NOM-127-SSA1-2021) were examined. Results show that constructed wetlands achieve high removal efficiencies for conventional pollutants and provide low-cost, sustainable solutions. However, current Mexican regulations present significant gaps, as they do not address emerging contaminants nor include specific criteria for nature-based technologies. It is concluded that regulatory updates are essential to foster



a circular water economy, where the reuse of treated greywater becomes a strategic component of water sustainability and urban resilience.

Keywords: Circular economy, constructed wetlands, greywater, urban irrigation, water reuse.

1. Introducción.

El estrés hídrico constituye un problema global en expansión, impulsado por el aumento del consumo de agua y los efectos del cambio climático (Nakai, 2018; Jiang et al., 2020). En la Unión Europea (UE), al menos el 17 % del territorio y el 11 % de la población enfrentan escasez de agua, situación particularmente crítica en la región mediterránea, donde hasta el 50 % de la población vive bajo estrés hídrico durante el verano (Bidlack et al., 2004).

En América Latina y el Caribe (ALC), pese a concentrar cerca del 35 % de los recursos hídricos renovables del mundo, factores como la desigual distribución espacial y temporal, la falta de infraestructura y los problemas de gobernanza generan escenarios críticos de escasez en países como Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, México y Perú. La agricultura consume aproximadamente el 68 % del agua disponible, intensificando la presión sobre los recursos hídricos y limitando su disponibilidad para otros sectores. Adicionalmente, 28 millones de personas carecen de acceso a fuentes mejoradas de agua y 83 millones no cuentan con instalaciones de saneamiento adecuadas; en países como Haití, solo el 57.7 % de la población tiene acceso a agua potable segura. Esta paradoja de abundancia regional frente a escasez local evidencia la urgencia de implementar estrategias de reúso y marcos regulatorios más efectivos para enfrentar el estrés hídrico que ya afecta a millones en la región (Rodríguez et al., 2022).

En México, además de las sequías recurrentes, existe un problema estructural de disponibilidad per cápita decreciente y distribución desigual. La disponibilidad natural de agua por habitante ha disminuido más del 60 % en las últimas décadas, pasando de más de 10,000 m³ en 1950 a aproximadamente 3,200 m³ en 2020, lo que ubica a amplias zonas del país bajo alta o muy alta presión hídrica (CONAGUA, 2020). Aunque el promedio nacional parece aceptable, el 87 % de la población se concentra en regiones hidrológico-administrativas con menor disponibilidad, lo que refuerza la vulnerabilidad hídrica (Pacheco-Treviño, 2024). Esta combinación de sobreexplotación de acuíferos, concentración poblacional en zonas críticas y efectos del cambio climático confirma la necesidad de adoptar estrategias no convencionales, entre ellas el reúso de aguas grises, para equilibrar la demanda en los focos de mayor presión demográfica.

El reúso de aguas residuales tratadas (AR) se perfila como una alternativa clave para reducir la presión sobre los recursos hídricos (Elbana et al., 2017). Sin embargo, estas corrientes pueden contener contaminantes emergentes — como colorantes, metales pesados, fármacos, productos de cuidado personal y bacterias— que requieren tratamientos específicos para su eliminación (Collivignarelli et al., 2020). Pese a los avances tecnológicos, su aprovechamiento sigue siendo limitado: la UE genera alrededor de 40,000 millones de m³ de AR tratadas al año, de los cuales solo se reutiliza el 2.4 % (964 millones de m³) (Bidlack et al., 2004). En los países en desarrollo, la situación es aún más compleja debido a la insuficiente cobertura de infraestructura de saneamiento.

En México, si bien la capacidad de tratamiento ha crecido hasta alcanzar un volumen de aproximadamente 136 m³/s de aguas residuales (Marín-Muñiz et al., 2023), su aprovechamiento es limitado. La cobertura se concentra en el ámbito municipal, donde el 63.73 % de las aguas residuales recolectadas recibe tratamiento; en contraste, en el sector no municipal —incluido el industrial— apenas el 40.1 % del caudal es tratado (CONAGUA, 2020). Del total del volumen tratado, menos de la mitad se destina formalmente al reúso productivo, con predominio del riego agrícola (48 %) (INEGI, 2023). Esta brecha entre capacidad instalada y reúso efectivo pone de relieve el déficit de una verdadera economía circular del agua y la urgencia de promover sistemas descentralizados, como los humedales artificiales, que permitan maximizar el reúso in situ.

En el marco de la economía circular, la UE ha impulsado políticas orientadas al reúso y reciclaje de recursos (Ricciardi et al., 2020), reconociendo a las aguas residuales como un recurso estratégico, especialmente en zonas áridas y semiáridas (Villarín et al., 2020). En este contexto, las aguas grises (AG) —provenientes de fregaderos, duchas y



lavanderías, y que representan entre el 50 % y el 80 % del consumo doméstico (Santasmás et al., 2013)— se destacan por su disponibilidad continua, fácil acceso y baja carga contaminante, características que las convierten en una fuente idónea para tratamiento y reúso in situ (Boano et al., 2020).

Diversas tecnologías han sido aplicadas al tratamiento de AG, como la filtración, los biorreactores de membrana, los contactores biológicos rotativos, los reactores secuenciales por lotes, los lechos anaerobios de flujo ascendente y los humedales artificiales (HA). Estos últimos destacan por su bajo costo, simplicidad operativa y mínimo impacto ambiental, lo que los hace particularmente viables en países en desarrollo. Los HA funcionan como filtros biológicos en los que convergen procesos físicos, químicos y biológicos capaces de remover materia orgánica, nutrientes y patógenos; no obstante, su eficiencia puede verse limitada por la baja carga orgánica admisible, lo que requiere mayores superficies para tratar caudales significativos (Collivignarelli et al., 2020).

En países como México, donde el sector agrícola representa entre el 76 % y el 76.3 % del volumen total de agua concesionada (CONAGUA, 2020; IMCO, 2023), y donde la agricultura de riego, aunque cubre solo el 26 % de la superficie agrícola, alcanza rendimientos significativamente superiores al temporal (94 % frente a 77.92 %) (INEGI, 2024), la recuperación de AG mediante HA representa una alternativa estratégica. Esta tecnología permite reducir la presión sobre fuentes superficiales y subterráneas, transformar un desecho urbano en un recurso hídrico seguro y aportar a la resiliencia hídrica de comunidades rurales y urbanas.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar la viabilidad técnica y social de los humedales artificiales domésticos para la recuperación y el reúso de aguas grises urbanas en México, subrayando su potencial contribución a la soberanía alimentaria y a la consolidación de una economía circular del agua.

2. Métodos.

El presente trabajo se desarrolló como una revisión narrativa de la literatura (Galván-Farías & De la Torre, 2023; Rother, 2007), cuyo propósito fue analizar el tratamiento de aguas grises mediante humedales construidos y su potencial de reúso. Se plantearon tres objetivos específicos: i) identificar los parámetros de eficiencia reportados en la literatura, ii) determinar el potencial de reúso agrícola-urbano del agua gris tratada en humedales artificiales y iii) revisar el marco normativo mexicano aplicable al tratamiento y reúso de agua gris.

Para el primer objetivo se seleccionaron nueve referencias clave, correspondientes a los artículos más citados y relevantes de acuerdo con el criterio de los autores luego de ejecutar la búsqueda de la cadena “*humedal artificial*” “*aguas grises*” “*riego*”, en español e inglés. Para el segundo objetivo, se revisaron dieciocho publicaciones fundamentales sobre el potencial de reúso agrícola-urbano agregando a la cadena de conceptos anterior “*economía circular*”.

La búsqueda de información se realizó en Google Scholar, debido a su carácter de motor académico multidisciplinar que integra resultados de diversas bases indexadas, lo cual permitió ampliar el alcance de la revisión (Brophy & Bawden, 2005). Se priorizaron artículos científicos publicados en revistas indexadas con arbitraje por pares a doble ciego, preferentemente de alcance internacional, por considerarse la fuente más confiable y rigurosa para este tipo de estudio.

Quedaron excluidos otros tipos de documentos, tales como literatura gris, reportes técnicos, tesis, memorias de congresos, material de divulgación y entradas en repositorios sin arbitraje, al no garantizar procesos de validación científica suficientes.

Finalmente, en el tercer objetivo se analizaron tres normas mexicanas vigentes: NOM-003-ECOL-1997, NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-127-SSA1-2021 de las que se recuperaron los parámetros concordantes con los artículos científicos analizados.



3. Desarrollo.

3.1. Parámetros de eficiencia esperados.

De acuerdo con Retta (2023), tras la revisión de 76 estudios de investigación, se concluye que la eficiencia de los humedales en la eliminación de contaminantes es variable y depende de diversos factores, como el tipo de humedal, las macrófitas empleadas y el tipo de agua residual tratada, entre otros. El autor destaca, además, que la mayoría de los casos analizados correspondieron a humedales artificiales en fase piloto. En la presente revisión, esta reflexión se ratifica haciendo hincapié en los resultados de remoción reportados en relación con DQO, DBO, P, TSS, N, turbidez, helmintos y coliformes fecales (Tabla 1).

Tabla 1. Remociones reportadas en la literatura.

Configuración del humedal	Remoción reportada	Referencia
Aguas residuales sintéticas Flujo subsuperficial horizontal a escala piloto. <i>Phragmites australis</i> , <i>Typha latifolia</i> .	DBOs: 85–89 %, DQO: 85–90 %, Fósforo 28–89 % (mejores resultados con grava fina de río) y Fósforo total: 21–82 %.	Akratos & Tsihrintzis, 2007
Aguas residuales municipales pretratadas Flujo subsuperficial, horizontal, en serie. <i>P. australis</i> y <i>T. dominguensis</i>	DQO 90.2-95.73%, Fósforo 21.87-40.35%	Romero-Aguilar et al., 2009.
Flujo subsuperficial, horizontal Macrófitas emergentes (<i>Phragmites australis</i>) Dimensión: 200–500 habitantes equivalentes	Helmintos: 71-95%, DBOs: 85–90 %, DQO: 70–80 %, TSS: 80–90 %, NT: 30–50 %, PT: 20–40 %, Coliformes fecales: 90–99 %	García et al., 2010
Humedal híbrido (vertical y horizontal), humedales de superficie libre. Sistemas multietapa. <i>Phragmites australis</i> , <i>Typha</i> y <i>Acorus</i>	DBO 70–95 %, DQO 60–90 %, TSS 80–95%, NT: 40–70 %	Vymazal, 2013.
Subsuperficial de flujo horizontal a escala real. Diseñado para 500 estudiantes que viven en el campus. <i>Arundo donax</i> y <i>Typha latifolia</i>	Capacidad del sistema para eliminar la DBO, la DQO, los TSS y los coliformes del agua gris entrante es mucho mayor (67-80 %) que la de los nutrientes (25-40 %).	Edwin et al., 2015
Flujo horizontal. Operado por 4 meses. <i>Phragmites australis</i> , <i>Carex oshimensis</i> y <i>Cyperus papyrus</i>	Turbidez >92%, TSS >85%, DQO >89% y DBO ₅ >88%	Collivignarelli et al., 2020.
Flujo vertical acoplado con columna de adsorción a base de cenizas, cáscara de arroz, piedra pómez, tallos secos de <i>Phragmites Australis</i> y carbón activado (como control).	Este sistema removió COD, NO ₃ ⁻ -N y PO ₄ ⁻³ arriba del 90.35%, 100% y 90.2%, respectivamente.	Parei et al., 2023.
Humedal de flujo subsuperficial horizontal, plantado con <i>Cyperus spp.</i> y <i>Typha spp.</i> , escala piloto. agua tratada reutilizada para riego sobre césped	COD: hasta 83%, BODs: hasta 81%, NT: ~66%, PT: 50%, TSS: 88% y E. coli: eficiencias de ~83-85%.	Farruggia et al., 2025

Nota: DQO: demanda química de oxígeno, DBO: demanda biológica de oxígeno, TSS: sólidos suspendidos totales, NT: nitrógeno total, P: fósforo, PT: Fósforo total.

3.2. Potencial de reúso agrícola-urbano del agua gris recuperada de humedales artificiales.

De acuerdo con Sijimol y Joseph (2021) el tratamiento y reúso de aguas grises constituye una necesidad urgente (Maimon et al., 2010). Factores como el crecimiento poblacional acelerado, la urbanización no planificada, la contaminación de cuerpos superficiales y la sobreexplotación de acuíferos incrementan la presión sobre los recursos hídricos en los sectores agrícola, industrial y doméstico (Khatun & Amin, 2011). A ello se suma la influencia del cambio climático en la escasez de agua (Dahal et al., 2020; Güiza-Villa et al., 2020).

El reciclaje de AG representa una alternativa viable para el ahorro de agua (Khatun & Amin, 2011), ya que el reúso de aguas residuales amplía la disponibilidad total del recurso (Ghaitidak, y Yadav, 2013) y contribuye a disminuir la creciente demanda (Avery et al., 2007). En comparación con las aguas negras, las AG contienen menores concentraciones de materia orgánica, nutrientes y patógenos, lo que facilita su tratamiento (Arden & Ma, 2018; Eriksson et al., 2002; Li et al., 2009). Para su reúso, es indispensable un tratamiento biológico que reduzca la carga microbiana y orgánica, complementado con procesos de desinfección para eliminar patógenos y controlar la formación de biopelículas en las redes hidráulicas (Ghaitidak, y Yadav, 2013).

El sistema de reciclaje de AG comprende etapas de recolección, almacenamiento, tratamiento y reúso (Khatun & Amin, 2011). El agua tratada puede destinarse a usos no potables como riego de jardines privados, áreas verdes, parques públicos, descarga de inodoros o prácticas contra incendios, lo que reduce significativamente la demanda de agua potable (Avery et al., 2007; Gross et al., 2007; Negahban-Azar et al., 2012; Karpiscak et al., 1990; Lu & Leung, 2003). En el caso de riego paisajístico, 8–12 horas de reciclaje permiten alcanzar una calidad adecuada; para riego superficial, es necesario aplicar desinfección adicional (Gross et al., 2007).

El reúso de AG en la agricultura y en la recarga de cuerpos de agua es una práctica común a nivel mundial (Maimon et al., 2014; Ghaitidak, y Yadav, 2013) y resulta especialmente relevante en países de bajos ingresos (Ghisi & Ferreira, 2007). Sus beneficios incluyen la conservación de agua dulce, la reducción de costos, la disminución del consumo energético en transporte, así como la mitigación de la presencia de patógenos y microcontaminantes inorgánicos (ElZein et al., 2016; Miller, 2006). Además, presentan una biodegradabilidad superior respecto al agua negra o mixta en humedales artificiales.

3.3. Normatividad mexicana en materia de tratamiento y reúso de agua gris.

La regulación mexicana en materia de tratamiento y reúso de aguas residuales se sustenta en tres normas principales: NOM-001-SEMARNAT-2021, relativa a los límites máximos permisibles de contaminantes en descargas; NOM-003-ECOL-1997, que regula el reúso de aguas residuales tratadas en servicios al público; y NOM-127-SSA1-2021, enfocada en los límites de calidad del agua para uso y consumo humano. Los parámetros y umbrales establecidos en dichas normas se sintetizan en la Tabla 2, donde se observan los valores de referencia aplicables a sólidos suspendidos totales, DBO, DQO, nutrientes, patógenos y otros indicadores de calidad.

Tabla 2. Parámetros y normas reportadas en la literatura.

Parámetro (mg/L, excepto cuando se especifica)	Umbral (P.D.)	Norma
Sólidos suspendidos totales	36 (riego de áreas verdes) / 120 (infiltración y otros riegos)	NOM-001-SEMARNAT-2021
DQO	72 (riego de áreas verdes) / 180 (infiltración y otros riegos)	
Nitrógeno total	NA (riego de áreas verdes) / 25 (infiltración y otros riegos)	
Fósforo total	NA (riego de áreas verdes) / 10 (infiltración y otros riegos)	
Huevos de helmintos (huevos/L)	1 (solo aplica a riego de áreas verdes)	
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 ml)	500 (riego de áreas verdes) / 100 (infiltración y otros riegos)	
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	240 (contacto directo) / 1,000 (contacto indirecto)	NOM-003-ECOL-1997
Huevos de helminto (h/L)	≤ 1 (directo) / ≤ 5 (indirecto)	



Grasas y aceites	15 (directo e indirecto)	
DBO ₅	20 (directo) / 30 (indirecto)	
Sólidos suspendidos totales	20 (directo) / 30 (indirecto)	
Turbiedad	4.0 UNT	
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	0.50	NOM-127-SSA1-2021
Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃ ⁻)	11.00	
Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂ ⁻)	0.90	
Sólidos disueltos totales	1000.00	
E. coli	<1 UFC/100 mL	

Nota: P.D.: promedio diario.

En términos comparativos, diversos estudios han señalado que las normas mexicanas son más permisivas que las regulaciones de países desarrollados. Domínguez et al. (2024), al analizar la NOM-001 en sus versiones de 1996 y 2021 frente a la legislación de Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea, concluyeron que México mantiene límites máximos más altos para varios contaminantes, aunque sus niveles de exigencia se asemejan a los de países de desarrollo intermedio, como Brasil. Este hallazgo subraya la necesidad de revisar y actualizar la normativa mexicana, en especial la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-003-ECOL-1997, con el fin de homologar estándares ambientales al marco de compromisos internacionales como el T-MEC.

Actualmente, la normatividad mexicana se centra en parámetros convencionales (DBO, DQO, sólidos suspendidos, coliformes), sin contemplar los contaminantes emergentes. Entre ellos destacan los fármacos de uso cotidiano —analgésicos, antibióticos, anticonceptivos y antiinflamatorios—, que han sido detectados en descargas domésticas y cuerpos receptores sin regulación específica (Sanabria-Pérez et al., 2019). La ausencia de lineamientos normativos permite que estos compuestos se acumulen en el ambiente y generen efectos ecotóxicos, incluso a bajas concentraciones. Asimismo, la falta de políticas claras para la disposición de medicamentos caducos, como el escaso conocimiento de programas de acopio tipo SINGREM, refuerza este vacío legal.

En este mismo sentido, Aguilar-Gutiérrez et al. (2025) documentan que los tratamientos convencionales reducen parcialmente la carga de contaminantes, pero no eliminan residuos farmacéuticos (antibióticos, hormonas, antiinflamatorios). En contraste, los humedales construidos han mostrado altos niveles de remoción de estos compuestos gracias a la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos, lo que los posiciona como una alternativa descentralizada y de bajo costo para regiones áridas de México. Sin embargo, la falta de criterios normativos que reconozcan explícitamente esta tecnología limita su aplicación a gran escala.

Otro vacío relevante corresponde a los microplásticos, contaminante emergente cuya presencia ha sido reportada en aguas superficiales, sedimentos y organismos acuáticos en México (Caro-Martínez et al., 2025). Ninguna de las normas vigentes —NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-003-ECOL-1997 o NOM-127-SSA1-2021— establece parámetros relacionados con microplásticos, lo que reduce la capacidad regulatoria frente a un problema ambiental creciente y limita las posibilidades de reúso seguro en contextos agrícola y urbano.

Pese a estas limitaciones, los humedales construidos han demostrado en México su eficacia para remover contaminantes orgánicos, nutrientes y patógenos a niveles compatibles con el reúso. Como señala Marín-Muñiz et al. (2023), esta tecnología contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles). No obstante, la ausencia de lineamientos regulatorios que reconozcan formalmente los humedales construidos, junto con la falta de criterios operativos y de monitoreo adaptados a este tipo de sistemas, constituye una barrera normativa para su consolidación.

La Tabla 3 sintetiza la vinculación entre los ODS, las aportaciones de los humedales construidos y los vacíos normativos de las NOM mexicanas, resaltando la urgencia de actualizar la regulación para fortalecer la gestión integral del recurso hídrico.

Tabla 3. Vinculación de los ODS de los humedales artificiales y la normatividad mexicana.

ODS	Aportaciones de los humedales construidos	Vacíos normativos en las NOM mexicanas
<p>ODS 6: Agua limpia y saneamiento. Meta 6.3: mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando vertidos y minimizando la liberación de productos químicos y materiales peligrosos; duplicar el reciclado y reúso seguro</p>	<p>Alta eficiencia en la remoción de DBO, DQO, sólidos suspendidos, nutrientes y patógenos. Posibilidad de generar agua tratada apta para riego agrícola y urbano. Tecnología descentralizada y de bajo costo, aplicable en comunidades rurales y periurbanas.</p>	<p>Las NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-003-ECOL-1997 regulan descargas y reúso, pero no diferencian aguas grises de aguas negras. No contemplan parámetros de contaminantes emergentes (fármacos, microplásticos, cosméticos).</p>
<p>ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles Meta 11.5: reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y a la gestión de residuos municipales y de otro tipo</p>	<p>Promueven la resiliencia urbana al reducir descargas contaminantes y generar agua para riego de áreas verdes. Fomentan la economía circular del agua en espacios urbanos. Disminuyen costos energéticos y de infraestructura frente a plantas convencionales.</p>	<p>Las normas mexicanas no incorporan lineamientos para tecnologías naturales descentralizadas. Falta de criterios de monitoreo y operación adaptados a humedales construidos. Ausencia de incentivos normativos que promuevan el uso de estas tecnologías en planes urbanos.</p>

La normatividad mexicana constituye un marco de referencia indispensable, pero aún insuficiente, para transitar hacia un modelo de **economía circular del agua**, en el cual el reúso de aguas residuales tratadas sea un componente estratégico de sostenibilidad hídrica. La actualización y ampliación de las normas debe orientarse no solo a la protección de la salud y el ambiente, sino también a incentivar prácticas de aprovechamiento seguro del recurso, particularmente en el **riego agrícola**, donde la recuperación de nutrientes y la sustitución de agua potable representan beneficios ambientales y económicos. De este modo, la integración de los humedales construidos y otras tecnologías descentralizadas al marco normativo permitiría consolidar un esquema de gestión hídrica más resiliente, eficiente y alineado con los principios de la circularidad y los compromisos internacionales de desarrollo sostenible.

Conclusiones.

El análisis de la literatura demuestra que los humedales construidos constituyen una alternativa técnica y socialmente viable para el tratamiento descentralizado de aguas grises en México, al permitir remociones significativas de contaminantes convencionales (DBO, DQO, SST, nutrientes y patógenos) y ofrecer agua tratada apta para reúso agrícola-urbano. Esta tecnología, además de su bajo costo y simplicidad operativa, fortalece la resiliencia hídrica de comunidades rurales y periurbanas, contribuyendo de manera directa al cumplimiento de los ODS 6 y 11.

Sin embargo, la revisión normativa evidencia que la NOM-001-SEMARNAT-2021, la NOM-003-ECOL-1997 y la NOM-127-SSA1-2021 continúan centradas en parámetros convencionales y no contemplan los contaminantes emergentes (fármacos, microplásticos, cosméticos), lo que limita la seguridad del reúso en escenarios agrícolas y urbanos. La falta de lineamientos específicos para tecnologías basadas en la naturaleza, como los humedales construidos, también representa un obstáculo para su adopción a gran escala.

En este contexto, se considera urgente actualizar la normatividad mexicana, incorporando parámetros de contaminantes emergentes, criterios de operación adaptados a sistemas descentralizados y estímulos regulatorios que favorezcan su implementación. Asimismo, el aprovechamiento de aguas grises mediante humedales construidos debe vincularse a un modelo de economía circular del agua, en el que el reúso para riego agrícola y urbano contribuya a reducir la extracción de agua potable, recuperar nutrientes y fortalecer la seguridad hídrica en el país.



Créditos.

Las autoras agradecen el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México, que se ha materializado en i) la Beca de Posgrado Nacional a nivel maestría otorgada a Elsa G. Benitez Manzo con el número de apoyo 4029189; ii) la Beca Nacional de Doctorado concedida a Mónica Zárate-Juárez con el número de subvención 4047565 y iii) la beca de Estancia Posdoctoral por México concedida a Mariana Martínez-Castrejón en el marco del programa ProNacEs Agua-PRONAI «Fortalecimiento y coordinación de sujetos colectivos para la defensa y gestión del agua en el territorio».

Referencias bibliográficas.

- Aguilar-Gutiérrez, J. A., Soto-Padilla, M. Y., Flores-Tavizón, E., Trujillo-Morales, L., & Bernadac-Villegas, L. G. (2025).** Contaminación de agua por fármacos: Humedales construidos como alternativa de tratamiento en zonas áridas. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 28(1), 1–13. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2025.746>
- Akratos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2007).** Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29(2), 173–191. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>
- Arden, S., & Ma, X. (2018).** Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. *Science of the Total Environment*, 630, 587-599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218>
- Avery, L. M., Frazer-Williams, R. A., Winward, G., Shirley-Smith, C., Liu, S., Memon, F. A., & Jefferson, B. (2007).** Constructed wetlands for grey water treatment. *Ecology & Hydrobiology*, 7(3-4), 191-200. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70101-5](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70101-5)
- Bidlack, W. R., Wang, W., & Clemens, R. (2004).** Water: The world's most precious resource. *Journal of Food Science*, 69(2), CRH55–CRH60. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb15495.x>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F.,... & Masi, F. (2020).** A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the total environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Brophy, J., & Bawden, D. (2005).** Is Google enough? Comparison of an internet search engine with academic library resources. *Aslib Proceedings*, 57(6), 498–512. <https://doi.org/10.1108/00012530510634235>
- Caro-Martínez, D. M., Niño-Torres, C. A., Charruau, P., Rendón-von Osten, J., Castelblanco-Martínez, D. N., Rios Mendoza, L. M., Frausto-Martínez, O., & Blanco-Parra, M. Del P. (2025).** The state of microplastic pollution in México: a review and evolving perspectives. *Science of The Total Environment*, 988, 179772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179772>
- Collivignarelli, M. C., Carnevale Miino, M., Gomez, F. H., Torretta, V., Rada, E. C., & Sorlini, S. (2020).** Horizontal flow constructed wetland for greywater treatment and reuse: an experimental case. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2317. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072317>
- Comisión Nacional del Agua. (2020).** Estadísticas del agua en México: Edición 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2020.pdf
- Dahal, P., Shrestha, M. L., Panthi, J., & Pradhananga, D. (2020).** Modeling the future impacts of climate change on water availability in the Karnali River Basin of Nepal Himalaya. *Environmental Research*, 185, 109430. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109430>

- Domínguez-Montero, L. E., Poggi-Varaldo, H. M., Cañizares-Villanueva, R. O., Padilla Viveros, A. A., Rinderknecht-Seijas, N., Caffarel-Méndez, S., & De la Cruz-Burelo, E. (2024).** Regulaciones para la descarga de aguas residuales de México: Comparación con otros países y su cumplimiento en plantas de tratamiento seleccionadas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40(2), 289-312. <https://doi.org/10.20937/RICA.54362>
- Edwin, G. A., Poyyamoli, G., Nandhivarnan, M., Prasath, R. A., & Boruah, D. (2015).** Constructed wetlands for the treatment of grey water in campus premises. In *Implementing Campus Greening Initiatives: Approaches, Methods and Perspectives* (pp. 337-349). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11961-8_25
- Elbana, T. A., Bakr, N., & Elbana, M. (2017).** Reuse of treated wastewater in Egypt: Challenges and opportunities. *Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt*, 429-453. https://doi.org/10.1007/698_2017_46
- ElZein, Z. A. K. A. A., Abdou, A., & Abd ElGawad, I. (2016).** Constructed wetlands as a sustainable wastewater treatment method in communities. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 605-617. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.053>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002).** Characteristics of grey wastewater. *Urban water*, 4(1), 85-104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Farruggia, D., Licata, M., Urso, G., Salamone, F., Coutinho Calheiros, C. S., et al. (2025).** Long-term investigation of pollutant removal efficiency in two constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in urban areas. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1606056. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1606056>
- Galván-Farías, A. G., & De la Torre, M. I. (2023).** Segregación residencial socioeconómica en Latinoamérica: Una visión crítica del concepto. *Revista de Arquitectura*, 25(2). <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2023.25.3176>
- García, J., Rousseau, D. P. L., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2010).** Procesos de eliminación de contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial: Una revisión. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(7), 561-661. <https://doi.org/10.1080/10643380802471076>
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2013).** Characteristics and treatment of greywater—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2795-2809. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>
- Ghisi, E., & Ferreira, D. F. (2007).** Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(7), 2512-2522. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.019>
- Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z., & Raveh, E. (2007).** Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW)—a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households. *Chemosphere*, 66(5), 916-923. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.06.006>
- Güiza-Villa, N., Gay-García, C., & Ospina-Noreña, J. E. (2020).** Effects of climate change on water resources, indices, and related activities in Colombia. In *Resources of water*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/71359>
- IMCO (Instituto Mexicano para la Competitividad). (2023).** Situación del agua en México. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>



- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2023).** *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Agua* (Comunicado de prensa NÚM. 161/23). https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP_Agua23.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2024).** *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Agua* (Comunicado de prensa NÚM. 196/24). https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP_DiaMundAgua.pdf
- Jiang, L., Bao, A., Yuan, Y., Zheng, G., Guo, H., Yu, T., & De Maeyer, P. (2020).** The effects of water stress on croplands in the Aral Sea basin. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120114. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120114>
- Khatun, A., & Amin, M. R. (2011, December).** Greywater reuse: A sustainable solution for water crisis in Dhaka, Bangladesh. In N. Amin, M. A. Bhuiyan, M. S. Chowdhury, & A. Kakoli (Eds.), *Proceedings of the 4th Annual Paper Meet and 1st Civil Engineering Congress* (pp. 427–434). Dhaka, Bangladesh: Institution of Engineers, Bangladesh. Chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iebconferences.info/345.pdf
- Karpiscak, M. M., Foster, K. E., & Schmidt, N. (1990).** Residential water conservation: Casa del agua 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 26(6), 939-948. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1990.tb01428.x>
- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009).** Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the total environment*, 407(11), 3439-3449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Lu, W., & Leung, A. Y. (2003).** A preliminary study on potential of developing shower/laundry wastewater reclamation and reuse system. *Chemosphere*, 52(9), 1451-1459. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00482-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00482-X)
- Maimon, A., Tal, A., Friedler, E., & Gross, A. (2010).** Safe on-site reuse of greywater for irrigation-a critical review of current guidelines. *Environmental science & technology*, 44(9), 3213-3220. <https://doi.org/10.1021/es902646g>
- Maimon, A., Friedler, E., & Gross, A. (2014).** Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse. *Science of the Total Environment*, 487, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.133>
- Marín-Muñiz, J. L., Sandoval Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R., & Zamora, S. (2023).** Humedales de tratamiento en México para el control de contaminantes de aguas residuales: Una revisión de experiencias durante los últimos veintidós años. *Procesos*, 11(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Miller, G. W. (2006).** Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. *Desalination*, 187(1-3), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.068>
- Nakai, J. (2018).** Food and Agriculture Organization of the United Nations and the sustainable development goals. *Sustainable development*, 22, 1-450. https://www.okayama-u.ac.jp/user/kouhou/ebulletin/pdf/vol22/contribution_001.pdf
- Negahban-Azar, M., Sharvelle, S. E., Stromberger, M. E., Olson, C., & Roesner, L. A. (2012).** Fate of graywater constituents after long-term application for landscape irrigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(8), 4733-4749. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1229-y>



- Pacheco-Treviño, L. (2024).** Review of water scarcity assessments: Highlights of Mexico's water situation. *WIREs Water*, 11(3), e1721. <https://doi.org/10.1002/wat2.1721>
- Parei, A. N., Naeeni, S. T. O., & Akbari, Z. (2023).** Application of hybrid vertical flow constructed wetland systems to treatment of greywater for their use to irrigation in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137368>
- Retta, B., Coppola, E., Ciniglia, C. Y Grilli, E. (2023).** Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales: una revisión de estudios de caso italianos. *Applied Sciences*, 13 (10), 6211. <https://doi.org/10.3390/app13106211>
- Ricciardi, P., Cillari, G., Carnevale Miino, M., & Collivignarelli, M. C. (2020).** Valorization of agro-industry residues in the building and environmental sector: A review. *Waste Management & Research*, 38(5), 487-513. <https://doi.org/10.1177/0734242X20904426>
- Rodríguez, C., García, B., Pinto, C., Sánchez, R., Serrano, J., & Leiva, E. (2022).** Contexto hídrico en América Latina y el Caribe: distribución, normativa y perspectivas para la reutilización y recuperación del agua. *Agua*, 14 (21), 3589. <https://doi.org/10.3390/w14213589>
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, L. (2009).** Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167. <https://scielo.org.mx/pdf/rica/v25n3/v25n3a4.pdf>
- Rother, E. T. (2007).** Systematic literature review X narrative review. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20(2), v-vi. <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>
- Sanabria-Pérez, F. J., Alanís, M., Pech-Canché, J. M., & Solís-Maldonado, C. (2019).** Principales residuos de medicamentos generados en los hogares y su potencial ecotóxico en Tuxpan, Veracruz. *Acta Universitaria*, 29(3), 1-15. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2398>
- Santasmassas, C., Rovira, M., Clarens, F., & Valderrama, C. (2013).** Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resources, conservation and recycling*, 72, 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.004>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022).** *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.* Diario Oficial de la Federación, México. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). (1997).** *Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.* Diario Oficial de la Federación, México. Recuperado de https://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud (SSA). (2021).** *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.* Diario Oficial de la Federación, México. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Sijimol, M. R., & Joseph, S. (2021).** Constructed wetland systems for greywater treatment and reuse: A review. *International Journal of Energy and Water Resources*, 5(3), 357-369. <https://doi.org/10.1007/s42108-021-00129-1>



Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2017). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(3), 19-35. <https://www.redalyc.org/journal/3535/353546192002/html/>

Villarín, M. C., & Merel, S. (2020). Paradigm shifts and current challenges in wastewater management. *Journal of hazardous materials*, 390, 122139. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122139>.

Vymazal, J. (2013). The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, 47(14), 4795–4811. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.029>

Información de los autores.



Elsa Gloria Benítez Manzo, Ingeniera en Sistemas computacionales egresada del Instituto Tecnológico de Acapulco, Estudiante de posgrado en la Maestría en Desarrollo Regional e Innovación Tecnológica en el TecNM campus Acapulco. Beneficiaria del programa de Becas Nacionales de la SEICHTI. Su línea de investigación es el Desarrollo Regional Sustentable.



Mariana Martínez Castrejón. Doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de Guerrero, arquitecta especializada en edificación sustentable y eficiencia energética. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel I. Docente del TecNM campus Acapulco. Realiza una estancia posdoctoral, de incidencia en concordancia con el ProNaCes Agua adscrita a la SECIHTI-Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, UAGro. Su línea de investigación es la gestión sustentable del ciclo hidrosocial urbano con soluciones basadas en la naturaleza.



Mónica Zárate Juárez Dra. En Ciencias de la Educación en el Centro Universitario México, Maestra en Estadística aplicada en la Universidad Autónoma de Guerrero, Ingeniera Bioquímica en el Tecnológico Nacional De México campus Acapulco, especialista en el control de calidad del agua y sistemas de tratamiento en agua potable.