

## 5. Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión hídrica urbana: evaluación técnico-social y recomendaciones de autogestión alineadas con el Pronaces Agua



MARIANA MARTÍNEZ-CASTREJÓN\*  
HILDA JANET ARELLANO-WENCES\*\*  
RICARDO HERRERA-NAVARRETE\*\*\*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.420.05>

### Resumen

El presente trabajo analiza el potencial de tres soluciones basadas en la naturaleza (SBN) —sistemas de captación de agua de lluvia, humedales artificiales y celdas de combustible microbianas— como articuladoras de la sostenibilidad del ciclo hidrosocial a escala doméstica en el contexto del Sur Global. A partir de una revisión integradora de la literatura científica indexada en Scopus, publicada entre 2019 y 2025, se examinan de manera comparativa sus aportes técnicos y sociotecnológicos al abasto, tratamiento y valorización del agua residual en entornos urbanos. El análisis considera tanto el desempeño técnico de las tecnologías como sus implicaciones en términos de apropiación social, operación descentralizada, reducción de presión sobre la infraestructura hídrica convencional y potencial de implementación en contextos de desigualdad socioambiental. Los resultados evidencian que, cuando se implementan a microescala, estas SBN pueden operar como un paquete ecotecnológico complementario que fortalece la autogestión hídrica doméstica mediante el aprovechamiento de procesos

---

\* Doctora en Ciencias Ambientales. Profesor-investigador en Universidad Autónoma de Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1224-7479> ; Scopus: 57280745300 ; correo electrónico: [marianamartinez@uagro.mx](mailto:marianamartinez@uagro.mx)

\*\* Doctora en Ciencias Ambientales. Profesor-investigador en Universidad Autónoma de Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7308-7731> ; Scopus: 57215662519

\*\*\* Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor-investigador en Universidad Autónoma de Guerrero, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9175-4486> ; Scopus: 57226607238

naturales, el uso de materiales de bajo costo y la adaptación a condiciones locales. A partir de la síntesis de hallazgos, el trabajo formula recomendaciones y pautas de autogestión hídrica situadas, alineadas con los principios de justicia hídrica, participación ciudadana y soberanía tecnológica promovidos por el Programa Nacional Estratégico Agua (Pronaces Agua). Se concluye que la integración de estas SBN contribuye a una gestión más resiliente, equitativa y sustentable del agua urbana, al tiempo que refuerza la articulación entre conocimiento científico, saberes locales y políticas públicas orientadas al bien común.

**Palabras clave:** *autogestión doméstica del agua, beneficios sociotecnológicos, justicia socioambiental, soluciones basadas en la naturaleza.*

## Introducción

En la actualidad, la sociedad enfrenta retos hídricos en todas las urbes del mundo. Estos retos se relacionan con la escasez del agua en la naturaleza, afectando el suministro potable. Además, el incremento poblacional en las ciudades incrementa la producción de agua residual y el agotamiento de los acuíferos (Gleason y Casiano, 2021). Lateralmente, debido al cambio climático sumado a la densidad poblacional incremental, la impermeabilización y el cambio de uso del suelo urbano y el deterioro e insuficiencia de la infraestructura hídrica, las ciudades se enfrentan a inundaciones intraurbanas en cada temporada pluvial. Esta problemática se vive más intensamente en las ciudades del Sur Global, en donde al panorama anterior se suman inundaciones extremas, sequías, deslizamientos de tierra, olas de calor y pérdida de biodiversidad (Romero-Duque et al., 2020). En el trabajo de Izah et al. (2024) se señala que se requieren aproximadamente 114 000 millones de dólares para garantizar una gestión eficiente del ciclo urbano del agua y satisfacer las necesidades sociales en esta región.

México forma parte del Sur Global compartiendo la acuciante crisis hídrica que lo caracteriza en donde las soluciones centralizadas de abastecimiento hídrico y de manejo del agua residual han alcanzado sus umbrales máximos de eficiencia vulnerando el ciclo hidrosocial urbano. En esta región,

los cambios administrativos locales son fundamentales para mitigar los efectos que provoca la ineficiencia de la infraestructura y mejorar la capacidad de las urbes para satisfacer las necesidades ciudadanas (Izah et al., 2024).

Bajo el lente analítico del ciclo hidrosocial, resulta indispensable integrar las dimensiones tecnológica, social y ecológica en las políticas públicas orientadas hacia la gestión hídrica. Este enfoque internacionalmente validado se sustenta en los postulados de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030 emitidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). En México, los esfuerzos por incorporar esta visión sustentable y sistémica se reflejan en los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces), iniciativa prioritaria del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías —ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— (Fuentes-Penna et al., 2023).

La política pública de los Pronaces se propone atender problemas nacionales que, por su urgencia y complejidad, requieren del involucramiento de las instituciones de educación superior, los centros de investigación, las instituciones del sector público en todos los niveles, las organizaciones civiles, las empresas y los ciudadanos. El objetivo final de cada programa —10 en total (Agentes tóxicos y procesos contaminantes, Salud, Agua, Seguridad humana, Cultura, Sistemas socio-ecológicos, Educación, Soberanía alimentaria, Energía y cambio climático y Vivienda)— es proponer soluciones integrales, amplias y profundas a partir de la investigación aplicada que fomente la soberanía nacional y la protección del medio ambiente (SECIHTI, 2025a).

Particularmente, el Pronaces Agua busca gestionar soluciones sostenibles para la gestión hídrica que se fortalezcan transversalmente con la participación de la comunidad, la comunidad científica, las autoridades y las empresas privadas con el propósito de fomentar el bien común y la justicia ambiental retomando los saberes populares, el conocimiento de frontera y las prácticas institucionales (SECIHTI, 2025b).

El propósito del Pronaces Agua se percibe ampliamente alineado al concepto de soluciones basadas en la naturaleza (SBN). Este concepto, internacionalmente validado y enfocado en la gestión sostenible y la protección de los ecosistemas terrestres, de agua dulce, costeros y marinos, naturales o modificados, busca retomar el conocimiento ancestral en

propuestas tecnicocientíficas que se beneficien de los procesos naturales o los imiten para mejorar la gestión hídrica y fortalecer la resiliencia socioambiental (World Water Assessment Programme, 2018).

Entre las SBN más reconocidas se encuentran los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) y los humedales artificiales (HA). Ambas, importantes contributivas a la gestión sostenible del agua a escala urbana y doméstica. Es importante resaltar la importancia de la implementación de las SBN a microescala, *i.e.*, en una edificación independiente que puede incluso ser unifamiliar. La independencia de la red municipal para el abasto hídrico —a partir de los SCALL— y para el tratamiento y recirculación del agua residual —aportaciones de los HA— fortalece el abasto porque se sustenta en la autogestión y la resiliencia ante afectaciones en la red colectiva de la ciudad. Un caso menos popular de SBN, pero con gran potencial, son las celdas de combustible microbianas (CCM). Estos sistemas bioelectroquímicos aprovechan el metabolismo de microorganismos electroquímicamente activos para dar tratamiento al agua residual y producir electricidad —bioelectricidad—, operando de forma completamente autónoma o acoplados a otras SBN para incrementar la eficiencia del tratamiento del agua residual o la producción de energía. Su implementación más factible es a microescala *in situ* (Capodaglio et al., 2021; Martínez-Castrejón et al., 2022b).

La implementación de las SBN a nivel doméstico supone un nodo estratégico que conjunta innovación, apropiación y resiliencia beneficiando directamente al ciudadano común, lo independiza y empodera al tiempo que reduce la presión ejercida sobre las redes municipales y plantea soluciones estructurales para el autoabasto y la autogestión del agua residual sobre la base de la conciencia ambiental, que en escenarios adversos ante fenómenos hidrometeorológicos exacerbados por el cambio climático son altamente valoradas (Montesinos-Pedro et al., 2025). A pesar de que las SBN han probado su eficacia en diversos ámbitos y escalas, existe una brecha importante en su estudio, particularmente se percibe el poco análisis comparativo sociotecnológico a nivel doméstico, la débil integración entre la evaluación técnica y los procesos sociales de adopción, uso y apropiación, la falta de estudios que conecten las SBN con agendas nacionales como el Pronaces Agua y la carencia de pautas de autogestión situadas en el contexto del Sur Global. El análisis de las tres SBN mencionadas en conjunto fortalecen la

gestión holística del agua doméstica porque integra un paquete ecotecnológico que gestiona el abasto de agua potable con los SCALL y el tratamiento del agua residual gris y negra a través de los humedales artificiales y las CCM, respectivamente.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es explorar la contribución de tres SBN a escala doméstica a la sostenibilidad del ciclo hidrosocial partiendo de una evaluación sociotecnológica que permita formular las pautas de autogestión hídrica situadas y en concordancia con la visión transformadora del Pronaces Agua.

## Marco teórico

### El ciclo hidrosocial y la gestión hídrica urbana

Desde el origen del concepto, el ciclo urbano del agua se ha valorado desde una perspectiva tecnocéntrica tomando forma en el molde de los conocimientos y avances técnico-científicos y configurando las ciudades de infraestructura gris —grandes obras centralizadas gestionadas y operadas por el Estado—. Sin embargo, este paradigma de funcionamiento urbano se vislumbra por caer, dada la transformación de las necesidades de las urbes y la creciente conciencia hídrica en la que el agua ha pasado de ser simplemente un recurso por explotar a ser concebido como catalizador del bienestar humano y un eje sociopolítico (Popartan et al., 2023).

Desde la interdisciplinariedad, pero particularmente en las entrañas de las ciencias sociales, se ha gestado el concepto de ciclo hidrosocial en el que la gobernanza tiene un rol protagónico dadas sus facultades para atender las necesidades sociales desde la perspectiva del ciudadano. Además, el concepto sienta las bases para la construcción de una agenda de gestión hídrica urbana que reconoce e incluye la valoración de la sociedad por el recurso hídrico en la naturaleza y procura su empoderamiento en el abasto, uso, tratamiento y recirculación al tiempo que lo separa de la red municipal y fortalece su resiliencia ante disfunciones de esta. Esta inclusión conceptual pero materializable resulta más adecuada para atender los acuciantes retos hídricos actuales en los que la sostenibilidad de las soluciones es imperativa.

La gestión del ciclo hidrosocial requiere de la atención de todos los actores involucrados y de la recuperación de los imaginarios colectivos y saberes ancestrales en torno al agua desde la colectividad situada como los cimientos para las soluciones técnico-científicas.

El Sur Global se presenta como una región de alta desigualdad en el acceso al agua y al saneamiento. Es en esta región en la que la escasez toma un matiz crítico debido a las disparidades estructurales que propician una hidrohegemonía indolente para el grueso de la población. En este contexto, el agua es percibida por quienes ostentan el poder de decisiones, como un recurso económico priorizando la ganancia que puede generar su gestión sobre la distribución equitativa entre la población (Thommandru et al., 2025). Para el Sur Global las SBN presentan una alta relevancia. Cuando son empleadas a microescala limitan la dependencia civil a la infraestructura urbana.

## **Soluciones basadas en la naturaleza en el ámbito urbano**

De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018:

Las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) están inspiradas y respaldadas por la naturaleza y el uso o imitación de los procesos naturales para contribuir a la gestión mejorada del agua [...] Una SBN utiliza los servicios del ecosistema para contribuir a un resultado de gestión del agua. Una SBN puede implicar la conservación o rehabilitación de ecosistemas naturales y/o la mejora o creación de procesos naturales en ecosistemas modificados o artificiales. Se pueden aplicar a microescala (por ejemplo, un inodoro seco) o macroescala (por ejemplo, el paisaje). (World Water Assessment Programme, 2018, p. 25)

Las SBN en las urbes son reconocidas como estrategias alternativas o complementarias a la infraestructura gris capaces de atender los retos hidrosociales. Los retos referidos incluyen manejo de inundaciones, abasto hídrico a partir de la escorrentía urbana y la precipitación pluvial, almacenaje del agua para usos posteriores y tratamiento o pretratamiento del agua

residual en una amplia diversidad de efluentes urbanos (Qi et al., 2020; Santos, 2025). Las condiciones de aplicación de las SBN son diversas y dependen de las necesidades particulares de los beneficiarios. En el Sur Global, las SBN son particularmente relevantes en donde las estrategias de gestión hídrica deben ser lo más autosuficientes posible (Castelo et al., 2023). En la región se han estudiado casos de implementación individuales y de paquetes de SBN también llamados ecotecnológicos (Martínez-Castrejón et al., 2022a).

### **Autogestión hídrica y soberanía: marco conceptual para el análisis sociotécnico**

Las SBN son estrategias de gestión hídrica en las que la participación ciudadana tiene un rol predominante. En general, en los últimos 50 años, la sociedad ha experimentado la necesidad de ser escuchada por el Estado y ha exigido participar en la generación de políticas públicas y en la toma de decisiones, particularmente en el ámbito de la sostenibilidad (Kiss et al., 2022). En México esta tendencia se refleja en el Pronaces Agua, particularmente en el eje 2: Autogestión comunitaria del ciclo socio-natural del agua y el Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia (ProNaII) Fortalecimiento y articulación de sujetos colectivos para la defensa y gestión del agua en el territorio (SECIHTI, 2025b). Esta perspectiva es particularmente significativa en las ciudades, territorios marcados por la exclusión social, la gobernanza neoliberal y la ideología del crecimiento, características incompatibles con la justicia ambiental e hídrica (Aranjo-Quiroga y Kuhl, 2023).

Las SBN articuladas a partir del Pronaces Agua y el ProNaII mencionado ostentan el potencial de reducir las inequidades estructurales que presentan las urbes mexicanas, dado que permiten nuevos ensamblajes sociotécnicos a microescala, propiciando la independencia total o parcial de la infraestructura municipal y transformándose hacia la resiliencia hidrosocial. Lo anterior, debido a que para el Pronaces Agua es indispensable la articulación de los saberes ancestrales, locales y científicos para alcanzar la apropiación social de la tecnología.

## **Sistemas de captación de agua de lluvia a microescala doméstica urbana**

El agua pluvial es considerada una fuente alternativa para el abasto en las ciudades de origen ancestral adjudicado a los mayas y a otras culturas antiguas (Oropeza-García et al., 2025). La cosecha de agua de lluvia es llevada a cabo a través de tecnología pasiva y de bajo impacto denominada SCALL. Estos sistemas, generalmente conformados por una superficie de captación, un sistema de conducción, un proceso de filtrado y de tratamiento y un método de almacenamiento, se destinan a la recogida de agua precipitada sobre techados, suelos o arroyos vehiculares (Martínez-Castrejón et al., 2022c; Suprapti et al., 2025). Los SCALL domésticos son ampliamente reconocidos por sus aportaciones en la restauración del ciclo hidrológico en el entorno urbano limitando la demanda de agua potable de las fuentes naturales, contribuyendo al control de la escorrentía urbana por retención y aumentando la disponibilidad hídrica en las viviendas con autonomía de la red municipal dependiendo de las cualidades climáticas del lugar de instalación (Palla y Gnecco, 2021). Por otro lado, los SCALL presentan áreas de oportunidad de intervención de políticas públicas, como el costo de la instalación y de mantenimiento y la vigilancia de la calidad del agua cosechada.

## **Humedales artificiales para el tratamiento del agua gris generada por viviendas urbanas**

Los HA se consideran una tecnología de bajo costo, prácticos y eficaces para el tratamiento y reutilización de aguas grises, ya que funcionan como biofiltros para evitar hidrofobicidad y alteración en las comunidades microbianas del suelo (Henderson et al., 2022). Son sistemas que se rigen bajo procesos ecológicos y que realizan una función imitando los entornos naturales; su ecosistema se integra por vegetación, capas de suelo y poblaciones microbianas, útiles para estabilizar y degradar diversos tipos de contaminantes. Los HA se clasifican de acuerdo con su diseño en humedales construidos de flujo superficial, flujo subterráneo, flujo vertical, flujo horizontal y humedales construidos de alimentación continua/por lotes (Sijimol et al., 2021).

Los HA se consideran una tecnología de bajo costo, prácticos y eficaces para el tratamiento y reutilización de aguas grises, ya que funcionan como biofiltros para evitar hidrofobicidad y alteración en las comunidades microbianas del suelo (Henderson et al., 2022). Si bien la creciente presión sobre los recursos hídricos amenaza la seguridad alimentaria, los ecosistemas de agua dulce y la salud humana, las aguas grises pueden ser un recurso para reducir la crisis del agua, sin embargo, su uso directo puede contener componentes químicos y microbiológicos que pueden presentar riesgos adversos para la salud (Compaoré et al., 2023).

### **Celdas de combustible microbianas: principios y potencial de aplicación doméstica**

Las CCM son dispositivos electroquímicos con la capacidad de generar bioenergía, cualidad que los integra en la categoría de bioelectroquímicos. A la par de la generación bioeléctrica, se suma a sus cualidades la degradación de materia orgánica de los sustratos con los que opera aprovechando el metabolismo de los microorganismos a los que les brinda el medio de subsistencia. Se trata de reactores de tratamiento de efluentes residuales en los que la reacción de oxidación anódica es catalizada por microorganismos anaeróbicos en el ánodo del dispositivo, mientras que en el cátodo el proceso de reducción puede llevarse a cabo de forma biótica o abiótica. Además de la cámara anódica y el cátodo, las CCM presentan esencialmente una membrana de intercambio de protones y un circuito externo para unir a los electrodos, un aceptor de electrones y bacterias electroquímicamente activas (Ramírez-Nava et al., 2021; Martínez-Castrejón et al. 2022b). Las CCM han recibido una atención creciente desde el siglo XXI debido a la concientización sobre los problemas ambientales y la necesidad de fuentes alternativas de energía.

Las bacterias son el componente principal de las CCM. Estas deben ser capaces de transferir electrones al ánodo. Las bacterias más efectivas para la generación de bioelectricidad son *Geobacter* y *Shewanella*. Además, los cultivos han demostrado una mayor capacidad metabólica que los cultivos puros (Martínez-Castrejón et al., 2022b).

Las CCM, aunque emergentes, han demostrado ser efectivas en el tratamiento de diversos efluentes residuales siempre que estos, cuenten con una alta carga de materia orgánica. En estos dispositivos, es posible la depuración del agua residual, presentándose como una potencial solución al problema de la contaminación del agua. Entre las perspectivas para las CCM se vislumbra su viabilidad en aplicaciones cotidianas (You et al., 2021).

## Metodología

Se llevó a cabo una revisión integrativa de la literatura científica publicada de 2019 a 2025 para conocer el estado del arte sobre tres SBN para la gestión descentralizada del ciclo urbano del agua en viviendas: SCALL, HA para aguas grises y CCM.

La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus a través Publish or Perish (PoP), un software de libre acceso que conecta hacia repositorios digitales de literatura científica. Scopus es considerada una base de datos multidisciplinaria e internacional que proporciona producción con alto factor de impacto a nivel mundial, por lo que se ha convertido en un estándar en el campo de la bibliometría (Herrera-Navarrete et al., 2021; Rose y Kitchin, 2019).

Para asegurar una amplitud y pertinencia contextual, se realizó una combinación conceptual, técnica y empírica de búsqueda de evidencia, desde la perspectiva multidisciplinaria consistente con los programas nacionales estratégicos, particularmente con el Pronaces Agua y el proyecto Fortalecimiento y articulación de sujetos colectivos para la defensa y gestión del agua en el territorio.

Para ello, se aplicaron tres líneas de búsqueda: (1) un enfoque amplio orientado a sistemas domésticos en contexto urbano; (2) un enfoque técnico centrado en eficiencia hidráulica y capacidad de almacenamiento, y (3) un enfoque sistémico relacionado con circularidad del agua y metabolismo urbano (tabla 5.1). La selección de documentos fueron artículos científicos, por lo que su exclusión se enfocó en capítulos de libro, documentos de conferencias y documentos duplicados de anteriores líneas de búsqueda. Además, en el caso de las CCM, la selección incluyó la discriminación de los productos que no se elaboraron con el enfoque de beneficiar de alguna manera a la sociedad de forma

directa. Esta discriminación de contenido condujo al rechazo de 47 de los 69 previamente recuperados, dejando un corpus de análisis de 22 artículos.

Tabla 5.1. *Proceso y criterios de búsqueda en el periodo 2019-2025*

<i>SBN</i>	<i>Línea de búsqueda</i>	<i>Términos de búsqueda</i>	<i>Documentos recuperados</i>	<i>Documentos excluidos</i>
Sistemas de captación de agua de lluvia	Enfoque amplio	"rainwater harvesting", "urban" "residential" OR "household" OR "domestic"	9	2
	Enfoque técnico	"rainwater harvesting", "urban housing", "storage" OR "performance" OR "efficiency"	0	0
	Enfoque sistémico	"rainwater harvesting", "urban metabolism" OR "circular water" OR "water circularity"	0	0
Humedales artificiales para aguas grises	Enfoque amplio	"constructed wetlands", "greywater" "residential" OR "household" OR "domestic"	8	3
	Enfoque técnico	"constructed wetlands" "greywater treatment", "household", "urban"	1	1
	Enfoque sistémico	"constructed wetlands", "circular economy" OR "urban metabolism"	0	0
Celdas de combustible microbianas	Enfoque amplio	"microbial fuel cell", "urine" OR "domestic wastewater"	75	8
	Enfoque técnico	"microbial fuel cell", "domestic wastewater", "treatment" "energy"	2	0
	Enfoque sistémico	"urban water cycle", "household", "circular economy" OR "urban metabolism"	0	0

Fuente: elaboración propia.

La captación pluvial doméstica muestra ausencia de literatura en dos enfoques, lo que confirma mayores estudios desde perspectivas hidrológicas y de mitigación de inundaciones, pero escasamente abordada desde marcos conceptuales de metabolismo urbano o economía circular del agua. Esto refuerza la pertinencia del presente capítulo al integrar esta triada conceptual en el análisis de tecnologías verdes descentralizadas. Además, presentan una distribución equilibrada entre enfoques:

- Hidrológico-técnico: Freni (2019), Deitch y Freirer (2019), Palla y Gnecco (2021, 2022), Hasnain et al. (2022)
- Sistémico-comunitario: Suprapti et al. (2025)
- Socioeconómico y percepción pública: Tsai y Onishi (2022)

Respecto a los humedales artificiales para aguas grises, la literatura se enfoca explícitamente en sistemas domésticos, y a escala de vivienda es escasa y dispersa, lo cual subraya la pertinencia de integrar y analizar detalladamente las pocas contribuciones disponibles (Henderson et al., 2022; Compaoré et al., 2023; Boopathi y Kadarkarai, 2022; Sacco et al., 2024; Sijimol et al., 2021).

Mientras que las búsquedas centradas en las celdas de combustible microbianas, desde un enfoque técnico y sistémico, muestran una estrecha relación con los impactos del tipo de inóculo (Salar-García, 2021), así como con variables clave como la producción de energía y la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Asimismo, se identifican factores limitantes asociados con la estabilidad del biofilm, los costos y la escalabilidad de estos sistemas.

## Desarrollo

### Contexto de las SBN en vivienda

El concepto de SBN emergió en la primera década del siglo XXI como propuesta del Banco Mundial y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza para enfrentar las consecuencias atraídas por la urbanización tradicional o infraestructura gris (Banco Mundial, 2008; UICN, 2009). La propuesta consiste fundamentalmente, en (1) retomar la sustentabilidad de las prácticas ancestrales, como la captación pluvial, fortaleciéndolas con los avances tecnológicos contemporáneos, *i.e.*, una reapropiación, y (2) fomentar la sustentabilidad urbana y de los ecosistemas fortaleciendo, imitando o mejorando los procesos naturales como la infiltración o la depuración de efluentes a partir del metabolismo microbiano.

Esta reapropiación de saberes ancestrales o de cualidades de los ecosistemas aportaron avances urbanos en aplicaciones de biotecnología como los humedales artificiales o las CCM, en monitoreo de calidad de corrientes intraurbanas a partir de los macroinvertebrados que reciben y estrategias de diseño urbano, como los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS, por sus siglas en inglés), entre muchas más y variadas aplicaciones.

En la literatura reciente se detectaron ventajas urbanas atraídas con la implementación de SBN de enfoque hídrico (tabla 5.2).

Tabla 5.2. *Funciones hidrosociales de las SBN en las ciudades*

<i>Función en el ciclo hidrosocial</i>	<i>SBN</i>	<i>Escala de aplicación</i>	<i>Referencia</i>
Mitigación de la isla de calor	Preservación del terreno permeable o vegetado	Urbana y doméstica	Liu et al., 2020 Irfeey et al., 2023
Mejoramiento de la calidad del aire	Arbolado y corredores ecológicos	Urbana	Peng et al., 2022
	Techos y muros verdes	Doméstica	Wang et al., 2022
Mitigación y tratamiento de escorrentías	SUDS	Urbana	Lekuona-Orkaizagirre et al., 2025
	Humedales artificiales SCALL	Urbana y doméstica	Freni, 2019; Deitch y Feirer, 2019
Tratamiento sostenible de efluentes residuales	Humedales artificiales	Urbana y doméstica	Compaoré et al., 2023
	CCM SCALL	Doméstica	Suprapti et al., 2025
Recirculación de efluentes residuales tratados			
Incremento en la disponibilidad de agua			

Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que las SBN recuperadas son descentralizadas, lo que evidencia la importancia de las aplicaciones a nivel doméstico y a la vivienda como unidad de análisis básica. Vistas a microescala, las SBN domésticas se perciben como microinfraestructuras distribuidas a lo largo y ancho de las ciudades, brindando alivio local a las necesidades hídricas particulares de los ciudadanos y a las redes municipales de abasto y saneamiento.

La aplicación doméstica de las SBN acerca la tecnología a las prácticas, percepciones, conocimientos e interacciones de la sociedad. De esta forma, se rescatan especificidades derivadas de las prácticas domésticas —caudales y calidades de las descargas, usos consuntivos principales (frecuencia y volumen), fuentes de abasto y destino de efluentes— propiciando soluciones a la medida de los beneficiarios directos de la tecnología. Este nivel de implementación se traduce en la idea de que la tecnología por sí sola no transforma la gestión hídrica, sino que transforma la articulación sociotécnica favoreciendo el ciclo hidrosocial.

En el proyecto Pronaces Agua este recurso se presenta como eje transformador hacia la justicia hídrica a través del empoderamiento del ciudadano

manifestándose directamente sobre las cualidades climatológicas de los territorios de aplicabilidad, propiciando la autonomía hídrica y reduciendo las vulnerabilidades propiciadas por fenómenos hidrometeorológicos y la propia obsolescencia de la infraestructura convencional.

## Sistemas de captación de agua de lluvia

La captación de agua de lluvia es una SBN aplicable a escala doméstica que opera aprovechando la precipitación local, disminuye la dependencia del suministro centralizado y favorece el cierre del ciclo hidrosocial urbano. La revisión de la literatura enfatiza su pertinencia en contextos urbanos densos y periurbanos con vulnerabilidad a inundaciones o déficit hídrico (tabla 5.3). Como parte de los resultados de esta revisión se presentan las recomendaciones relacionadas con el contenido de cada una de las publicaciones del análisis.

Se detectó que los SCALL se vinculan con el ciclo hidrosocial debido a que su funcionamiento depende de la capacidad de almacenamiento en las viviendas, la frecuencia y distinción de usos domésticos no potables y su capacidad para liberar presión de la red de abasto.

En relación con los hallazgos sociotecnológicos, se recuperaron únicamente dos estudios. Palla y Gnecco (2021) proponen el uso de plataforma web-GIS y la integración tecnológica para gestión y toma de decisiones. Por otro lado, Tsai y Onishi (2022) reportan una alta disposición a pagar por los SCALL en hogares con experiencia en inundaciones y actitudes ambientales proactivas.

Estos resultados demuestran la escasa investigación sobre SCALL aplicados específicamente en viviendas urbanas en México. Además, existe un área de oportunidad para los abordajes sociotecnológicos profundos, mismos que abonan a la perspectiva sistémica de las implementaciones de los SCALL. También requieren atención los sistemas híbridos que conjugan otras SBN con los sistemas de cosecha pluvial para cerrar el ciclo hidrosocial. En general se percibe la falta de estudios de caso en contextos de vivienda social densa y asentamientos informales para evaluar la viabilidad de los SCALL.

Tabla 5.3. *Síntesis de hallazgos sobre SCALL en viviendas urbanas*

<i>Escala</i>	<i>Hallazgos técnicos</i>	<i>Recomendaciones</i>	<i>Referencia</i>
Multifamiliar (>400 viviendas, Italia)	La capacidad de almacenamiento es el principal factor que determina la retención efectiva; SCALL reducen inundaciones locales mediante simulación FLO-2D.	Considerar la capacidad de almacenamiento como parámetro crítico de diseño.	Freni, 2019
Periurbano (cuenca en Florida)	SCALL reducen caudales agregados >20% cuando hay alta densidad de viviendas; posible conversión de tanques sépticos para almacenamiento.	Analizar los efectos acumulados a escala de cuenca; incluir infraestructura existente (por ej., tanques).	Deitch y Feirer, 2019
Dos asentamientos urbanos	Reducción del estrés del drenaje hasta ~70% mediante SWMM; CTR (control en tiempo real) aumenta el desempeño.	Integrar sistemas CTR con plataformas digitales para operación.	Palla y Gnecco, 2021
Subcuencas urbanas	Efectividad significativa cuando el almacenamiento $\geq 40\%$ del volumen del evento crítico; análisis multiescenario con EPA-SWMM.	Adoptar criterios de dimensionamiento basados en porcentaje del evento crítico.	Palla y Gnecco, 2022
Viviendas urbanas (Japón)	Alta disposición a pagar en hogares con experiencia en inundaciones y actitudes ambientales proactivas.	Integrar educación ambiental y estrategias de comunicación para aumentar adopción.	Tsai y Onishi 2022
Rawalpindi (Pakistán), escala doméstica	El SCALL puede cubrir una proporción relevante de demanda no potable; limitantes por tamaño de azotea y almacenamiento.	Dimensionar según demanda real, azotea y lluvia mensual; considerar escenarios de sequía.	Hasnain et al., 2022
Área urbana en Yakarta	Mayor confiabilidad hídrica con modelo híbrido doméstico-comunal; apoyo a recarga urbana.	Considerar modelos híbridos con almacenamiento comunal para mayor resiliencia.	Suprapti et al., 2025

Nota: SWMM: software modelo de gestión de aguas pluviales; CTR: control en tiempo real.

Fuente: elaboración propia.

## Humedales artificiales para tratar aguas grises domésticas

La implementación a escala doméstica de los humedales artificiales se alinea con el Pronaces Agua dada su factibilidad de fortalecer la autogestión de efluentes residuales como el agua gris, tratarla y recircularla como agua para usos secundarios.

En la literatura revisada (tabla 5.4) se encontró que los humedales artificiales domésticos que trataron agua gris presentan altas remociones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y nutrientes (Sijimol et al., 2021; Boopathi y Kadarkarai, 2022; Compaoré et al., 2023). Además, Compaoré

et al. (2023) reportan una reducción de coliformes  $>2.5$  log. Por otro lado, Henderson et al. (2022) analizaron cuatro sistemas de flujo vertical recirculante en una comunidad del desierto del Negev; evaluaron la presencia de genes y bacterias resistentes a antibióticos en los efluentes tratados logrando su disminución. Es conveniente resaltar el trabajo de Sacco et al. (2024), quienes empleando humedales de flujo vertical mostraron eficiencias superiores al 90% en la remoción de microcontaminantes, permitiendo su reutilización para su uso no potable.

Tabla 5.4. Síntesis de estudios sobre humedales construidos para aguas grises domésticas

Escala	Hallazgos técnicos	Recomendaciones	Referencia
Comunidad pequeña; 4 humedales verticales recirculantes	Reducción de 1–3 log de genes de resistencia (sul1, qnrS, blaCTXM32). Comunidad microbiana estable. Necesidad de monitorear integrones (int11).	Monitorear integrones por riesgo de transferencia horizontal. No reporta recomendaciones de diseño hidráulico.	Henderson et al., 2022
Escala piloto (Sahel); 3 humedales: sin plantas y plantados	$>90\%$ remoción de SST, DQO, nutrientes. <i>A. gyanus</i> con mejor desempeño en DBO <sub>5</sub> . $>2.5$ log en reducción de coliformes fecales. Efluente apto para riego restringido según la OMS.	Preferir humedales plantados. Seleccionar especies locales ( <i>A. gyanus</i> , <i>C. zizanioides</i> ). Uso posible para riego restringido.	Compaoré et al., 2023
Laboratorio; Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSH)	Remociones: 77-90% DBO; 70-81% DQO; 82-91% SST; 76-84% nitrógeno total. Buen desempeño con variedades de caña.	Considerar caña de azúcar como especie fitorremediadora local. No reporta recomendaciones para escalamiento.	Boopathi y Kadarkarai, 2022
Comparativo: HAFV descentralizado vs. posttratamiento de PTAR	$>90\%$ remoción de microcontaminantes (diclofenaco, DEET). Uso de biochar como sustituto sostenible del sustrato.	Emplear HAFV cuando se requiera remoción avanzada de microcontaminantes. Evaluar biochar como material sostenible.	Sacco et al., 2024
Laboratorio; humedales box-type con Napier, Vetiver y Equisetum	80-95% remoción en parámetros (turbidez, acidez, DBO, DQO). Aumento del oxígeno disuelto hasta 97%. Todas las especies mostraron eficiencia.	Seleccionar especies herbáceas adaptables (Napier, Vetiver, Equisetum). Útiles en sistemas compactos de bajo costo.	Sijimol et al., 2021

Nota: SST: sólidos suspendidos totales; DQO: demanda química de oxígeno; DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxígeno a 5 días; OMS: organización mundial de la salud; PTAR: planta de tratamiento de agua residual; HAFV: humedal artificial de flujo vertical; HAFSH: humedal artificial de flujo subterráneo horizontal; DEET: N-dietil-meta-toluamida.

Fuente: elaboración propia.

Sobre los factores sociotecnológicos, estos son abordados de forma indirecta en los trabajos analizados, lo que representa un área de oportunidad

para la conceptualización de los beneficios aportados por los humedales artificiales al ciclo hidrosocial (tabla 5.5).

Tabla 5.5. *Resultados de HA con enfoque sociotecnológico reportados en la literatura revisada*

<i>Referencia</i>	<i>Hallazgos sociotecnológicos</i>
Henderson et al., 2022	Señala implicaciones de riesgo por persistencia de algunos GRA (dimensión sociotecnológica indirecta).
Compaoré et al., 2023	Uso de especies locales facilita apropiación y manejo comunitario (mencionado indirectamente).

Nota: GRA: genes de resistencia a los antibióticos.

Fuente: elaboración propia.

Es posible inferir que la disposición de espacio en las viviendas es una variable que limita la implementación de los humedales artificiales en las viviendas urbanas, sin embargo, pueden ser una alternativa a las superficies permeables como una estrategia de adopción de un microecosistema con todos los beneficios ecosistémicos que genera.

De las recomendaciones propuestas, conviene recuperar la importancia de plantar los humedales con especies locales o productivas (Boopathi y Kadarkarai, 2022), considerar humedales de flujo vertical cuando se requiera la remoción avanzada (Sacco et al., 2024) y la incorporación de monitoreo básico pero constante al efluente cuando se plantee su reúso (Henderson et al., 2022).

Las brechas detectadas incluyen, además de la incorporación de variables sociotecnológicas en los hallazgos, la ausencia de investigación en vivienda social y en asentamientos irregulares, la falta de evidencia de implementación en climas tropicales y húmedos —relevante para México— y la poca integración de los humedales en soluciones híbridas para el tratamiento del agua residual o el abasto hídrico.

### **Celdas de combustible microbianas alimentadas con orina humana**

La revisión realizada arroja que las CCM son una alternativa ecológica relevante para el saneamiento sostenible debido a su capacidad de tratar efluentes residuales y generar bioelectricidad. Ostentan un valor especial porque

permiten la valorización de residuos como la orina y efluentes residuales de alta carga biológica, transformándolos en energía para operar dispositivos de bajo consumo o para apoyar procesos de remoción de contaminantes (Martínez-Castrejón et al., 2022c).

Los beneficios sociotecnológicos reportados abarcan dimensiones ambientales, sanitarias, agroecológicas y tecnológicas (tabla 5.6).

Tabla 5.6. Resultados de CCM con enfoque sociotecnológico reportados en la literatura revisada

Hallazgos sociotecnológicos	Recomendaciones	Referencia
Uso explícito como biosensor: capacidad de detectar y degradar metabolito de cocaína ( <i>benzoylecgonine</i> ) en orina —aplicación para vigilancia/monitoreo de contaminantes farmacológicos.	Evaluar sensibilidad/especificidad en muestras reales, estudiar escalabilidad y protocolos de muestreo para vigilancia sanitaria; explorar integración con sistemas de saneamiento para monitoreo pasivo.	Catal et al., 2019
Inactivación de patógenos en cascadas de CCM (reducción logarítmica elevada) —implicación directa en bioseguridad y posible reducción del riesgo en efluentes.	Incluir evaluación de riesgos y normas de bioseguridad; explorar requisitos regulatorios para reúso de efluentes; validar con patógenos relevantes localmente.	Ieropoulos et al., 2019
Eliminación de antígenos HBsAg (hasta 98.6%) en cascadas de CCM. Beneficio sanitario directo por reducción de riesgo viral.	Evaluar efectividad en distintos volúmenes y condiciones fisiológicas; estudiar inactivación de otros antígenos; analizar potencial de aplicación en unidades de salud con baja energía.	Pasternak et al., 2019
Producción de catolito desinfectante como subproducto (pH>13) con eficacia frente a patógenos ( <i>Salmonella</i> ). Recurso para desinfección/seguridad sanitaria.	Evaluar seguridad, toxicidad y protocolos de uso del catolito; estudiar factibilidad de reutilización <i>in situ</i> (higiene, desinfección de superficies, agua de baja complejidad).	Gajda et al., 2020
Demostración a escala real de un sistema de 10 L. Recuperación de estruvita y energía, y validación de integración en sistemas descentralizados.	Optimizar balance energético ( <i>net energy</i> negativo reportado), mejorar diseño de <i>stack</i> y evaluar modelos de negocio para recuperación de fertilizantes (cadena de valor).	Sharma et al., 2021
El catolito sintetizado por CCM muestra capacidad de desinfección (pH ~11 y erradicación de <i>E. coli</i> ) dependiente del tiempo de operación —implicación sanitaria directa.	Definir tiempos mínimos operativos para obtener catolito seguro; protocolo de control de calidad microbiológica; estudiar almacenamiento/uso seguro.	Merino-Jimenez et al., 2021a
Una sola MFC cerámica de bajo costo puede accionar un grifo electrónico —beneficio directo en higiene con autosuficiencia energética.	Evaluar durabilidad de la cerámica en uso real; medir desempeño con diferentes calidades de orina; estudiar integración en baños públicos.	Jimenez et al., 2021
Dispositivo micro. CCM de muy bajo costo (<1.5 USD) aplicable a diagnóstico de urolitiasis/hiperoxaluria y como microgenerador para dispositivos implantables.	Evaluar estabilidad y durabilidad <i>in vivo</i> ; estudiar variabilidad entre usuarios; explorar integración con sensores biomédicos comerciales.	Yousefi et al., 2021

Uso de residuos agrícolas (cáscara de maíz/astillas) como lecho. Implicaciones de economía circular y disponibilidad local de insumos. Evidencia de operación en contexto piloto con beneficios para zonas rurales/domésticas.	Diseñar cadenas de abastecimiento local de insumos. Estudiar la sostenibilidad de suministro y la aceptación comunitaria.	Montenegro-Rosero et al., 2022
Plant-MFC con orina ganadera que mejora crecimiento vegetal y genera electricidad en paralelo —beneficio agronómico directo.	Analizar rendimiento en suelos y climas contrastantes; cuantificar balance energético agrícola; evaluar impacto económico para pequeñas unidades ganaderas.	Apollon et al., 2022
Remoción eficiente de ciprofloxacino en aguas domésticas. Beneficio socioambiental en control de contaminantes emergentes.	Evaluar desempeño con matrices reales de aguas residuales; estudiar regeneración del ánodo; revisar riesgos por liberación de nanotubos.	Huang et al., 2022
Análisis costo-beneficio directo: identifica la densidad de potencia como variable crítica para la viabilidad económica — implicación para decisión de inversión y políticas.	Priorizar mejoras en densidad de potencia y calidad de efluente; usar sensibilidad económica para orientar diseños pilotos y subsidios; incorporar evaluación de ingresos por electricidad y por servicios de saneamiento.	Biswas y Chakraborty, 2023a
Uso probado de residuos cítricos y orina como sustratos en CCM. Beneficio socioeconómico: aprovechar residuos locales/biomasa para reducir costos operativos.	Evaluar disponibilidad estacional de residuos y logística; analizar coste-beneficio del suministro de sustratos alternativos y su efecto en operación.	Verma y Mishra, 2023
Rol de la vegetación ( <i>Typha</i> ) en mejorar desempeño de HA-CCM; observación de efecto estacional (deterioro en invierno) — implicaciones para confiabilidad operativa y selección de especies.	Seleccionar especies apropiadas al clima local; diseñar planes estacionales de operación y monitoreo; capacitar en manejo de plantas y mantenimiento.	Biswas y Chakraborty, 2023b
HA-MFC vegetado con <i>Dieffenbachia</i> mostró alta eficiencia de tratamiento y generación eléctrica —beneficio directo: planta específica mejora rendimiento operativo.	Validar selección de especies para contexto climático y social; evaluar seguridad de reúso del efluente y modelos de mantenimiento comunitario.	Chaijak y Sola, 2023
Arquitectura escalable y económica de CCM domésticas probada en piloto (36 L) para convertir salida en energía utilizable. Viabilidad de solución doméstica de bajo costo.	Escalar ensayos en distintos climas y condiciones; integrar la gestión energética en uso para iluminación, bombas. Proponer un plan de sostenibilidad técnica y financiera.	Suransh et al., 2023
Optimización con IA mejora el desempeño energético de la CCM urinaria (~5% sobre datos experimentales).	Validar modelos IA con datos de operación prolongada; integrar la herramienta como sistema de control en tiempo real; evaluar escalabilidad.	Rezk et al., 2023
Resiliencia de CCM a adición de desinfectantes: recuperación tras choque por hipoclorito. Implicación directa para operación en entornos reales con uso de desinfectantes.	Incorporar estrategias operativas ante adiciones de desinfectante (diseño redundante, recuperación temporal). Evaluar protocolos de limpieza y efectos sobre comunidad microbiana.	You et al., 2024
Diseño AutoDriBER (autogoteo) con buen desempeño y modelado cinético Diseño autónomo/optimizado para tratamiento de orina en zonas rurales.	Pilotos en campo rural. Validar robustez frente a variabilidad de alimentación; formar manuales de operación local.	Mehrotra et al., 2024

Recuperación de amonio demostrada y vinculación entre resistencia externa y transporte de amonio, beneficio directo para recuperación de nutrientes (cadena de valor fertilizantes).	Optimizar circuitos para favorecer transporte y cristalización (estruvita); evaluar integración con procesos de reúso/venta de fertilizante.	Yodkamonsart et al., 2025
TSM-CCM: desempeño para tratamiento descentralizado y generación eléctrica en oficinas. Solución urbana descentralizadas.	Optimizar para remoción de amonio y eficiencia energética; evaluar adaptación a diferentes tamaños de edificios/oficinas y modelos de gestión.	Larasati et al., 2025
HA-CCM con <i>Epipremnum aureum</i> mejora COD, TN, P y genera 4.9 W/m <sup>3</sup> . Saneamiento descentralizado económico.	Estudiar mantenimiento de las plantas a largo plazo; validar desempeño en climas cálidos y fríos; analizar costo-beneficio para comunidades rurales.	Rajpurohit y Behera, 2025

Nota: TSM: tanque séptico modificado; USD: dólares americanos; IA: inteligencia artificial.

Fuente: elaboración propia.

Se documentaron sistemas capaces de eliminar antibióticos, fármacos y antígenos virales, mejorando la seguridad sanitaria a partir de efluentes residuales. Otras investigaciones están enfocadas a las configuraciones que mejoren la eficiencia energética para alimentar dispositivos de uso cotidiano.

La viabilidad de introducir a las CCM a la vida cotidiana depende de factores como la disponibilidad y el costo de sus componentes, su necesidad de mantenimiento y la robustez del sistema ante condiciones cambiantes. Con el propósito de acercar su implementación a la realidad, algunos grupos de trabajo han buscado materiales de bajo costo para las CCM como las cerámicas, que reducen la dependencia de insumos especializados. Sin embargo, las barreras de operación persisten, demandando la intervención de la comunidad científica para fortalecer las capacidades locales. Debido a que estos dispositivos dependen de las características de los sustratos con los que operan, es esencial considerar las variaciones de composición o estacionales, además de integrarse con prácticas y tecnologías existentes —como HA, sanitarios secos o separadores de orina— para maximizar su utilidad.

Los resultados mostraron cómo las CCM mejoran su rendimiento de remoción cuando se integran con HA sin necesidad de emplear energía externa. Por otro lado, entre las oportunidades de innovación con enfoque sociotecnológico se presenta el uso de inteligencia artificial (IA) y la optimización avanzada. El impulso de la eficiencia hacia la miniaturización y aplicaciones a escala doméstica. Además, en el sector de la vivien-

da se presenta la oportunidad de desarrollar e implementar las CMMs en los *E-toielts* autosustentables. Un caso de especial mención son las aplicaciones relacionadas con la salud y la inactivación de agentes patógenos. Por último, una aplicación con un gran campo de estudio es en sistemas plant-CCM.

### **Recomendaciones para la autogestión hídrica situadas y alineadas al Pronaces Agua**

La selección de SBN en entornos urbanos requiere sustentarse en un enfoque situado que considere la densidad, el acceso a la infraestructura y sus desigualdades, las características del suelo urbano y la variabilidad climática y extrema. Una visión sistémica es imperante para priorizar la multifuncionalidad, la eficiencia en el uso de recursos y la adaptabilidad territorial. Las SBN selectas deben haberse probado en escenarios de presión hídrica creciente o en eventos extremos, particularmente donde la gestión de la escorrentía y la precipitación pluvial y el tratamiento descentralizado resultan críticos para gestionar la resiliencia urbana. La integración de estas tecnologías con los principios de diseño bioclimáticos y el uso estratégico de infraestructura sostenible —como los SUDS—, fortalecen su pertinencia técnica y social, alineándose con las estrategias de adaptación y mitigación promovidas por el Pronaces Agua.

En asentamientos regulares, con abasto hídrico municipal centralizado, se recomienda priorizar tecnologías con desempeño compatible a las características de uso, consumo y generación que se hayan estandarizado y que sean de simple operación para reducir la dependencia de mantenimiento especializado. En el caso de las viviendas informales —con limitaciones importantes de espacio, incertidumbre jurídica, o sin conexión a las redes municipales— las tecnologías deben ser de baja inversión inicial, operación comunitaria y escalabilidad progresiva.

En las zonas más densamente pobladas, las intervenciones deben caracterizarse por ser compactos o híbridos que combinen captación, almacenamiento y tratamiento básico. Mientras que, en las zonas de baja densidad, en donde se puede aprovechar el espacio disponible, las SBN descentralizadas

deben articular el almacenamiento, la infiltración y recarga urbana, reforzando la resiliencia en sequías y la variabilidad de la precipitación.

Las instituciones deben actuar como facilitadoras de procesos de inclusión, cuidado y sostenibilidad social, además de como reguladoras y gestoras de la gestión hidrosocial. Esto implica el desarrollo de la gobernanza para reducir sesgos y reconocer la diversidad de actores que limite la marginación y propicie la visibilidad de grupos vulnerables. Es indispensable la integración interinstitucional para garantizar el acompañamiento técnico en las etapas tempranas de la implementación, articulación de los criterios de operación y mantenimiento con capacidades locales y el establecimiento de acuerdos claros sobre responsabilidades y riesgos. A nivel comunitario se sugiere el fortalecimiento de las organizaciones espontáneas, especialmente en zonas de exclusión al borde de las ciudades.

Es importante resaltar que, como cualquier tecnología, las SBN pueden reforzar las desigualdades existentes si se implementan sin un enfoque crítico. Dado que las zonas verdes urbanas pueden convertirse en mecanismos que amplifican las brechas sociales, y que algunos formatos de participación pueden explotar vulnerabilidades, es indispensable que las recomendaciones técnicas sean situadas e incorporen una lectura socioespacial: identificar quiénes se benefician, quiénes asumen los costos y quiénes quedan fuera de las decisiones. Las ciudades del Sur Global entrelazan con el agua dimensiones de justicia, cohesión social y regeneración urbana, por eso requiere de diagnósticos integrales para la prevención de escenarios de exclusión y despojo.

La autogestión hídrica depende directamente en los procesos de apropiación sociotecnológica que integren el uso cotidiano, el mantenimiento y el seguimiento operativo, cualitativo y eficiente de las SBN.

Es indispensable la promoción de prácticas asequibles y desarrollar capacidades locales que permitan resolver fallas y mantener los sistemas operando sin asistencia externa. El mantenimiento debe integrarse a rutinas domésticas o comunitarias realistas. El seguimiento requiere de esquemas simples que permitan reconocer la eficiencia, reconocer fallas y sostener la continuidad del sistema. Estos elementos son consistentes con el Pronaces Agua, en el que la participación activa, el conocimiento local y la corresponsabilidad son fundamentales para la sociedad.

## Conclusiones

Para las SBN el conocimiento situado es esencial para su efectividad debido a que su desempeño depende de las condiciones climáticas locales, las prácticas cotidianas, la disponibilidad de espacio físico para su implementación y las condiciones territoriales.

La participación ciudadana en la toma de decisiones favorece su adopción y sostenibilidad al involucrar a los usuarios desde el diseño, capacitándolos para llevar a cabo el mantenimiento requerido y monitorear el desempeño de la tecnología.

Por su operación descentralizada y desconectada de las redes municipales, las SBN contribuyen a la justicia hídrica y a la resiliencia urbana. Además, al ser implementadas en paquetes ecotecnológicos, permiten la gestión integral del ciclo hidrosocial a escala doméstica reduciendo la presión sobre la naturaleza y la infraestructura urbana, revalorizando los efluentes residuales y cerrando el círculo de aprovechamiento del recurso hídrico.

Estas SBN son compatibles con la perspectiva transformadora del Pro-naces Agua, al integrar la sostenibilidad, la justicia ambiental y la participación social.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la SECIHTI por el financiamiento otorgado a los proyectos de estancia posdoctoral en consolidación, a Mariana Martínez-Castrejón y a Ricardo Herrera-Navarrete y a los revisores, coordinadores y editores del libro por las sugerencias que contribuyeron a la mejora de este capítulo.

## Referencias

Apollon, W., Vidales-Contreras, J. A., Rodríguez-Fuentes, H., Gómez-Leyva, J. F., Olivares-Sáenz, E., Maldonado-Ruelas, V. A., Ortiz-Medina, R. A., Kamaraj, S.-K. y Luna-Maldonado, A. I. (2022). Livestock's Urine-Based Plant Microbial Fuel Cells Im-

- prove Plant Growth and Power Generation. *Energies*, 15(19), 6985. <https://doi.org/10.3390/en15196985>
- Arango-Quiroga, J., Kinol, A. y Kuhl, L. (2023). Examining knowledge and epistemic justice in the design of nature-based solutions for water management. *PLOS Climate*, 2(9), e0000194. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000194>
- Banco Mundial. (2008). Biodiversity, Climate Change, and Adaptation: Nature-based Solutions from the World Bank Portfolio, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/6216>
- Biswas, A. y Chakraborty, S. (2023a). Cost benefit analysis of integrated constructed wetland microbial fuel cell system for sustainable and economic domestic wastewater treatment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103475. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103475>
- Biswas, A. y Chakraborty, S. (2023b). Organics and coliform removal from low strength domestic wastewater using integrated constructed wetland-microbial fuel cell reactor with bioelectricity generation. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137204>
- Boopathi, N. y Kadarkarai, R. (2022). A laboratory-scale study of residential greywater treatment with sugarcane in a constructed wetland. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(40), 61178-61186. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20264-4>
- Capodaglio, A. G., Bolognesi, S. y Cecconet, D. (2021). Sustainable, decentralized sanitation and reuse with hybrid nature-based systems. *Water*, 13(11), 1583. <https://doi.org/10.3390/w13111583>
- Castelo, S., Amado, M. y Ferreira, F. (2023). Challenges and opportunities in the use of nature-based solutions for urban adaptation. *Sustainability*, 15(9), 7243. <https://doi.org/10.3390/su15097243>
- Catal, T., Kul, A., Atalay, V. E., Bermek, H., Ozilhan, S. y Tarhan, N. (2019). Efficacy of microbial fuel cells for sensing of cocaine metabolites in urine-based wastewater. *Journal of Power Sources*, 414, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.078>
- Chaijak, P. y Sola, P. (2023). The new report of domestic wastewater treatment and bioelectricity generation using *Dieffenbachia seguine* constructed wetland coupling microbial fuel cell (CW-MFC). *Archives of Environmental Protection*, 57-62. <https://doi.org/10.24425/aep.2023.144737>
- Compaoré, C. O. T., Maiga, Y., Nikiéma, M., Mien, O., Nagalo, I., Panandtigri, H. T., Mihelcic, J. R. y Ouattara, A. S. (2023). Constructed wetland technology for the treatment and reuse of urban household greywater under conditions of Africa's Sahel region. *Water Supply*, 23(6), 2505-2516. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.121>
- Deitch, M. J. y Feirer, S. T. (2019). Cumulative impacts of residential rainwater harvesting on stormwater discharge through a peri-urban drainage network. *Journal of Environmental Management*, 243, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.018>
- Freni, G. (2019). Effectiveness of rainwater harvesting systems for flood reduction in residential urban areas. *Water Switzerland*, 11(7), ISSN 2073-4441, <https://doi.org/10.3390/w11071389>

- Fuentes-Penna, A., Ruiz-Vanoye, J. A., Gómez-Cárdenas, R., Ramírez Salgado, J. C., Trejo-Macotela, F. R., Díaz-Parra, O., Poblano Verastegui, A. y Rentería Torres, P. L. (2023). Mexico and PRONACES towards to become a smart city. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, 14(3), 31. <https://shre.ink/qOOv>
- Gajda, I., Obata, O., Greenman, J. y Ieropoulos, I. A. (2020). Electroosmotically generated disinfectant from urine as a by-product of electricity in microbial fuel cell for the inactivation of pathogenic species. *Scientific Reports*, 10(1), 5533. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60626-x>
- Gleason, J. A. y Casiano Flores, C. (2021). Challenges of water sensitive cities in Mexico: The case of the metropolitan area of Guadalajara. *Water*, 13(5), 601. <https://doi.org/10.3390/w13050601>
- Hasnain, S. A., Jack, L. y Gul, M. (2022). An assessment of technical feasibility in the implementation of rooftop rainwater harvesting system in urban residential areas of Pakistan. *International Journal of Water*, 15(2), 148-173. <https://doi.org/10.1504/IJW.2022.132299>
- Henderson, M., Ergas, S. J., Ghebremichael, K., Gross, A. y Ronen, Z. (2022). Occurrence of antibiotic-resistant genes and bacteria in household greywater treated in constructed wetlands. *Water*, 14(5), 758. <https://doi.org/10.3390/w14050758>
- Herrera-Navarrete, R., Arellano-Wences, H. J., Colín-Cruz, A., Sampedro-Rosas, M. L., Rosas-Acevedo, J. L. y Rodríguez-Herrera, A. L. (2021). Thematic and Geographical Trend in Scientific Research Applied in Municipal Wastewater Treatment Plants: an Overview. *Water Air Soil Pollut* 232, 318. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05269-y>
- Huang, S. J., Dwivedi, K. A., Kumar, S. y Wang, C. T. (2022). Multiwall carbon nanotubes-coated graphite-felt anode for efficient removal of ciprofloxacin from domestic wastewater in dual-chambered microbial fuel cells. *Journal of Environmental Engineering*, 148(6), 04022022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001991](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001991)
- Ieropoulos, I., Obata, O., Pasternak, G. y Greenman, J. (2019). Fate of three bioluminescent pathogenic bacteria fed through a cascade of urine microbial fuel cells. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 46(5), 587-599. <https://doi.org/10.1007/s10295-019-02153-x>
- Irfeey, A. M. M., Chau, H. W., Sumaiya, M. M. F., Wai, C. Y., Muttill, N. y Jamei, E. (2023). Sustainable mitigation strategies for urban heat island effects in urban areas. *Sustainability*, 15(14), 10767. <https://doi.org/10.3390/su151410767>
- Izah, S. C., Jacob, D. E., Nelson, I. U. y Avez, S. (2024). Urban water crisis in the global South. En *Water crises and sustainable management in the global south* (pp. 45-83). Singapore: Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4966-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4966-9_2)
- Jimenez, I. M., Brinson, P., Greenman, J. y Ieropoulos, I. (2021). Electronic faucet powered by low cost ceramic microbial fuel cells treating urine. *Journal of Power Sources*, 506, 230004. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230004>
- Kiss, B., Sekulova, F., Hörschelmann, K., Salk, C. F., Takahashi, W. y Wamsler, C. (2022).

- Citizen participation in the governance of nature-based solutions. *Environmental Policy and Governance*, 32(3), 247-272. <https://doi.org/10.1002/eet.1987>
- Larasati, D., Setiyawan, A. S., Surinkul, N. y Va, V. (2025). Decentralized wastewater treatment and energy recovery in urban settings: performance of a modified septic tank-microbial fuel cell system. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 538-558. <https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v8i2.23544>
- Lekuona-Orkaizagirre, A., Meaurio, M., Madrazo-Uribeetxebarria, E., Antín, M. G. y Gredilla, A. (2025). Field-based assessment of the influence of a combined SUDS system consisting of a permeable pavement and a stormwater tank on urban runoff quality. *Journal of Hydrology*, 133906. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133906>
- Liu, Y., Li, T. y Yu, L. (2020). Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: A pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118938>
- Martínez-Castrejón, M., López-Díaz, J. A., Solorza-Feria, O., Talavera-Mendoza, O., Rodríguez-Herrera, A. L., Alcaraz-Morales, O. y Hernández-Flores, G. (2022a). Environmental, economic, and social aspects of human urine valorization through microbial fuel cells from the circular economy perspective. *Micromachines*, 13(12), 2239. <https://doi.org/10.3390/mi13122239>
- Martínez-Castrejón, M., Ramirez-Nava, J. y Hernández-Flores, G. (2022b). Celdas de Combustible Microbianas: Tecnología para Tratamiento de Efluentes Residuales y Generación de Bioelectricidad. En M. G. Salinas-Juárez, M. M. Téllez-Cruz, H. M. Alfaro-López, & H. Cruz-Martínez (Eds.), *Contribuciones destacadas en conversión y almacenamiento de energía* (pp. 163-186). Sociedad Mexicana del Hidrógeno, A. C. <https://n9.cl/mjbc18>
- Martínez-Castrejón, M., López-Díaz, J. A., Solorza-Feria, O., Talavera-Mendoza, O., Rodríguez-Herrera, A. L., Alcaraz-Morales, O. y Hernández-Flores, G. (2022c). Environmental, economic, and social aspects of human urine valorization through microbial fuel cells from the circular economy perspective. *Micromachines*, 13(12), 2239. <https://doi.org/10.3390/mi13122239>
- Mehrotra, S., Singh, N. K., Vempaty, A. y Mathuriya, A. S. (2024). Development, performance evaluation, and kinetic studies of microbial fuel cell based auto dripping bioelectrochemical reactor (AutoDriBER) for urine treatment. *Environmental Technology*, 45(5), 902-915. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2130106>
- Merino-Jimenez, I., Obata, O., Pasternak, G., Gajda, I., Greenman, J. y Ieropoulos, I. (2021). Effect of microbial fuel cell operation time on the disinfection efficacy of electrochemically synthesised catholyte from urine. *Process Biochemistry*, 101, 294-303. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.10.014>
- Montenegro-Rosero, K., Villamar-Ayala, C. A., Fernández, L. y Espinoza-Montero, P. (2022). Operational performance of corncobs/sawdust biofilters coupled to microbial fuel cells treating domestic wastewater. *Science of the Total Environment*, 809, 151115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151115>
- Montesinos-Pedro, E., Carbajal-Avila, J. y Martínez-Castrejón, M. (2025). Structural Strategies for Water Scarcity after Hurricane Otis in Acapulco, Mexico. *WIT Transac-*

- tions on Ecology and the Environment, 264, 365-374. <https://doi.org/10.2495/sc250291>
- Oropeza-García, N. A., Vega-Azamar, R. E., Campos-Cámara, B. L., Canché-Uuh, J. A. y González-Vera, M. A. (2025). Mayans and Their Water Management. En G. A. Corzo Perez, L. G. Hayde, R. Romero-López & A. Jiménez Palacios (Eds.), *Aqua Vitae: Unraveling the Story of Water in Latin America* (pp. 37-50). The Latin American Studies Book Series. Springer, Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-57731-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-57731-4_3)
- Palla, A. y Gnecco, I. (2021). The web-gis trig eau platform to assess urban flood mitigation by domestic rainwater harvesting systems in two residential settlements in Italy. *Sustainability*, 13(13), 7241. <https://doi.org/10.3390/su13137241>
- Palla, A. y Gnecco, I. (2022). On the Effectiveness of Domestic Rainwater Harvesting Systems to Support Urban Flood Resilience. *Water Resources Management*, 36(15), 5897-5914, ISSN 0920-4741, <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03327-6>
- Pasternak, G., Greenman, J. y Ieropoulos, I. (2019). Removal of Hepatitis B virus surface HBsAg and core HBcAg antigens using microbial fuel cells producing electricity from human urine. *Scientific Reports*, 9(1), 11787. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48128-x>
- Peng, J., Cheng, X., Hu, Y. y Corcoran, J. (2022). A landscape connectivity approach to mitigating the urban heat island effect. *Landscape Ecology*, 37(6), 1707-1719. <https://doi.org/10.1007/s10980-022-01439-3>
- Popartan, L. A., Poch, M., Pueyo-Ros, J. y Rodriguez-Roda, I. (2023). The urban hydrosocial cycle: why should engineers care? *Open Research Europe*, 3, 174. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.16223.1>
- Qi, Y., Chan, F. K. S., Thorne, C., O'Donnell, E., Quagliolo, C., Comino, E., Pezzoli, A., Li, L., Griffiths, J., Sang, Y. y Feng, M. (2020). Addressing Challenges of Urban Water Management in Chinese Sponge Cities via Nature-Based Solutions. *Water*, 12(10), 2788. <https://doi.org/10.3390/w12102788>
- Rajpurohit, P. y Behera, M. (2025). High-strength domestic wastewater treatment using *Epipremnum aureum* as the cathodic plant in a constructed wetland-microbial fuel cell. *Journal of Water Process Engineering*, 69, 106724. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106724>
- Ramirez-Nava, J., Martínez-Castrejón, M., García-Mesino, R. L., López-Díaz, J. A., Talavera-Mendoza, O., Sarmiento-Villagrana, A., Rojano, F., & Hernández-Flores, G. (2021). The Implications of Membranes Used as Separators in Microbial Fuel Cells. *Membranes*, 11(10), 738. <https://doi.org/10.3390/membranes11100738>
- Rezk, H., Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A. y Sayed, E. T. (2023). Artificial intelligence as a novel tool for enhancing the performance of urine fed microbial fuel cell as an emerging approach for simultaneous power generation and wastewater treatment. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 148, 104726. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104726>
- Romero-Duque, L. P., Trilleras, J. M., Castellarini, F. y Quijas, S. (2020). Ecosystem services in urban ecological infrastructure of Latin America and the Caribbean: How do

- they contribute to urban planning? *Science of the Total Environment*, 728, 138780. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138780>
- Rose, M. E. y Kitchin, J. R. (2019). Pybliometrics: Scriptable bibliometrics using a Python interface to Scopus. *SoftwareX*, 10, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100263>
- Sacco, F. C. M., Venditti, S., Wilmes, P., Steinmetz, H. y Hansen, J. (2024). Vertical-flow constructed wetlands as a sustainable on-site greywater treatment process for the decrease of micropollutant concentration in urban wastewater and integration to households' water services. *Science of the Total Environment*, 946, 174310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174310>
- Salar-García, M. J., Walter, X. A., Gorauski, J., de Ramón Fernández, A. y Ieropoulos, I. (2021). Effect of iron oxide content and microstructural porosity on the performance of ceramic membranes as microbial fuel cell separators. *Electrochimica acta*, 367, 137385. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137385>
- Santos, E. (2025). Nature-Based Solutions for Water Management in Europe: What Works, What Does Not, and What's Next? *Water*, 17(15), 2193. <https://doi.org/10.3390/w17152193>
- Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación [SECIHTI]. (2025a). *Programas Nacionales Estratégicos*. <https://secihti.mx/pronaces/>
- Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación [SECIHTI]. (2025b). *Agua. Programas Nacionales Estratégicos*. <https://secihti.mx/pronaces/pronaces-agua/>
- Sharma, P., Talekar, G. V. y Mutnuri, S. (2021). Demonstration of energy and nutrient recovery from urine by field-scale microbial fuel cell system. *Process Biochemistry*, 101, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.11.014>
- Sijimol, M. R., Marsa, M. L. y Sabu, J. (2021). Analysis of potential of Napier grass, Vetiver and Equisetum plants for the treatment of domestic greywater using box-type constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 84(10), 2913-2922, ISSN 0273-1223, <https://doi.org/10.2166/wst.2021.289>
- Suprapti, S., Kusuma, M. S. B., Kardhana, H., Cahyono, M. y Juliana, I. C. (2025). Communal-based domestic rainwater harvesting system: A novel approach to alternative solutions for increasing water supply and recharging groundwater in Jagakarsa urban area, South Jakarta. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101126. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101126>
- Suransh, J., Jadhav, D. A., Nguyen, D. D. y Mungray, A. K. (2023). Scalable architecture of low-cost household microbial fuel cell for domestic wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Science of The Total Environment*, 857, 159671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159671>
- Thommandru, A., Turdialiev, M. A. y Mone, V. (2025). Hydro-hegemony in the Anthropocene: Neoliberal Paradigms and Global South Marginalization in Water Scarcity Governance. *Journal of Developing Societies*, 0169796X251326720. <https://doi.org/10.1177/0169796X251326720>
- Tsai, P. y Onishi, A. (2022). Urban households' willingness to pay for improvements in

- rainwater harvesting and rainwater infiltration system: Case study in Japan. *Water and Environment Journal*, 36(3), 494-503. <https://doi.org/10.1111/wej.12781>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2009). No time to lose-make full use of nature-based solutions in the post-2012 climate change regime, Decimoquinta sesión de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP15), Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Copenhague (Dinamarca), del 7 al 18 de diciembre.
- Verma, M. y Mishra, V. (2023). Bioelectricity generation using sweet lemon peels as anolyte and cow urine as catholyte in a yeast-based microbial fuel cell. *Waste and Biomass Valorization*, 14(8), 2643-2657. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02050-6>
- Wang, X., Li, H. y Sodoudi, S. (2022). The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Building and Environment*, 217, 109082. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>
- World Water Assessment Programme. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua, Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos, UNESCO / ONU-Agua, París*. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2018>
- Yodkamonsart, P., Watanabe, T., Kubota, K., Jaturapitakkul, C. y Yoochatchaval, W. (2025). Recovery of ammonium from domestic wastewater using microbial fuel cells. *Water Science & Technology*, 92(7), 983-990. <https://doi.org/10.2166/wst.2025.135>
- You, J., Greenman, J. y Ieropoulos, I. A. (2021). Microbial fuel cells in the house: A study on real household wastewater samples for treatment and power. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 101618. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101618>
- You, J., Walter, X. A., Gajda, I., Greenman, J. y Ieropoulos, I. (2024). Impact of disinfectant on the electrical outputs of urine-fed ceramic and membrane-less microbial fuel cell cascades. *International Journal of Hydrogen Energy*, 57, 759-763. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.042>
- Yousefi, R., Mardanpour, M. M. y Yaghmaei, S. (2021). Fabrication of the macro and micro-scale microbial fuel cells to monitor oxalate biodegradation in human urine. *Scientific Reports*, 11(1), 14346. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93844-y>