Capítulo 7. Recuperación de agua pluvial y recarga gestionada del acuífero Cuautitlán–Pachuca Experiencias piloto en la zona sur de la Zona Metropolitana de Pachuca

Humberto Iván Navarro Gómez [*]
Cutberto Rodríguez Álvarez[**]
Marco Antonio Montufar Benítez[***]
Jesús Emmanuel Cerón Carballo[****]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.468.07

Resumen

La recuperación de agua pluvial y su aprovechamiento para la recarga de acuíferos representan una estrategia prioritaria para enfrentar la crisis hídrica que atraviesa México. El país enfrenta una presión creciente sobre sus fuentes subterráneas: más de 100 acuíferos están sobreexplotados, mientras que el crecimiento urbano y el cambio climático intensifican la escasez estructural y las inundaciones recurrentes. En este capítulo se analiza el potencial del agua pluvial como recurso estratégico, integrando evidencia técnica, normativa y social. La metodología incluyó la revisión de la literatura científica especializada y reciente, el análisis de la evolución del marco jurídico mexicano en materia de aguas, la comparación internacional de experiencias de recarga gestionada y el estudio de casos en la zona metropolitana de Pachuca y en el acuífero Cuautitlán-Pachuca. Los hallazgos muestran que existen tecnologías probadas —como pozos de infiltración y lagunas— y

* Doctor en Ciencias. Área académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Presidente de la Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH) Región Hidalgo, secretario del Colegio de Urbanistas del Estado de Hidalgo. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2338-4863
** Doctor en Ingeniería. Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9225-8695
*** Doctor en Ingeniería. Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9756-1554
**** Doctor en Ingeniería. Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2809-3387

resultados positivos en proyectos piloto. Sin embargo, persisten retos para articular el nuevo marco jurídico con la regulación técnica, el financiamiento y la implementación a gran escala de los sistemas de captación pluvial y de recarga gestionada. Asimismo, la percepción social del agua pluvial como un recurso residual puede limitar su aceptación, aunque mejora cuando se comunica su aprovechamiento indirecto mediante la recarga subterránea. Se concluye que la recuperación pluvial puede contribuir a mitigar las inundaciones urbanas y fortalecer la seguridad hídrica, siempre que el nuevo marco jurídico se traduzca en instrumentos técnicos, financieros y de planeación que favorezcan su implementación efectiva. El capítulo plantea lineamientos técnicos y de política pública para avanzar hacia un modelo de gestión hídrica sustentable y adaptativa.

Palabras clave: *agua pluvial, recarga de acuíferos, seguridad hídrica, resiliencia urbana, legislación hídrica.*

Introducción

El agua constituye un recurso vital para el sostenimiento de la vida, el desarrollo económico y la estabilidad social de los países. No obstante, en el siglo XXI también se ha convertido en uno de los principales factores de vulnerabilidad ante el cambio climático y el crecimiento demográfico. Se estima que más de 2000 millones de personas en el mundo enfrentan actualmente estrés hídrico severo, una cifra que podría duplicarse hacia 2050 si no se implementan estrategias integrales de gestión hídrica (UN–Water, 2023; He et al., 2021).

En México, la distribución desigual del recurso refleja una paradoja: el 76% del agua concesionada se destina a la agricultura, mientras que el abastecimiento urbano apenas recibe el 14% (Conagua, 2011). Al mismo tiempo, 106 acuíferos presentan sobreexplotación crítica, especialmente en zonas metropolitanas y en zonas agrícolas intensivas (Conagua, 2021). Esta condición sitúa al país en una situación de alta vulnerabilidad hídrica y genera conflictos territoriales cada vez mayores.

La vulnerabilidad hídrica se manifiesta tanto en los efectos de los episodios de inundación en los espacios urbanos como en los problemas de disponibilidad asociados a la presión creciente sobre las fuentes de abastecimiento. La experiencia internacional muestra que la ordenación territorial constituye una herramienta fundamental para reducir la exposición y la vulnerabilidad de las ciudades frente al riesgo de inundación (Olcina, 2020). En México, esta problemática coexiste en condiciones de sobreexplotación de acuíferos y de suministro intermitente en diversas zonas urbanas (Conagua, 2021).

En el ámbito internacional, diversas experiencias han demostrado que la recuperación y aprovechamiento del agua pluvial, en conjunto con técnicas de recarga gestionada de acuíferos (*managed aquifer recharge*, MAR), constituyen soluciones viables para enfrentar la sobreexplotación subterránea y adaptarse al cambio climático. En India, Israel y Australia, estas estrategias han permitido almacenar agua de lluvia y agua residual tratada en acuíferos, incrementando la disponibilidad en periodos de sequía y reduce la presión sobre las fuentes superficiales (Dillon et al., 2019, 2020).

En México, el acuífero Cuautitlán–Pachuca cuenta con antecedentes documentados de recarga artificial mediante pozos, entre ellos el proyecto piloto desarrollado en la zona de El Caracol, en Ecatepec de Morelos (González y Juárez, 2017). Estas experiencias evidencian la posibilidad de articular la gestión del agua con la recarga gestionada de acuíferos en contextos urbanos y periurbanos.

Esta necesidad cobra especial relevancia en Pachuca y Mineral de la Reforma, donde históricamente se ha documentado un suministro intermitente de agua potable. Lizárraga-Mendiola et al. (2015) reportaron que sólo el 42% de las viviendas analizadas contaba con servicio continuo, mientras que el 58% restante presentaba un suministro limitado, que podía variar de algunas horas al día a tres veces por semana. Sin embargo, persisten retos para articular el nuevo marco jurídico con la regulación técnica, los mecanismos de financiamiento y los instrumentos de planeación territorial y urbana necesarios para escalar estas soluciones e integrarlas de manera sistemática en la gestión hídrica.

Bajo este panorama, el objetivo general de este capítulo es analizar la recuperación de agua pluvial como estrategia para la seguridad hídrica en

México, evaluando su viabilidad técnica, social y normativa, y proponiendo lineamientos de política pública y de planeación urbana para su implementación sostenible.

De manera específica se plantea: *(i)* revisar y sistematizar el marco conceptual, técnico y normativo de la recuperación de agua pluvial y la recarga gestionada de acuíferos, con base en experiencias nacionales e internacionales recientes; *(ii)* analizar casos de estudio en México, particularmente en la zona metropolitana de Pachuca y el acuífero Cuautitlán-Pachuca, para examinar su desempeño técnico y los factores sociales asociados a su implementación; *(iii)* proponer lineamientos de política pública y de ordenamiento urbano resiliente que integren la gestión pluvial como herramienta para fortalecer la seguridad hídrica y mitigar riesgos urbanos.

Con ello, el capítulo se alinea explícitamente con la Agenda 2030 y busca aportar elementos para avanzar en el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 en los contextos urbanos y periurbanos del país.

Justificación

La crisis hídrica en México demanda soluciones innovadoras que trasciendan los enfoques tradicionales de extracción y distribución. La sobreexplotación de 106 acuíferos (Conagua, 2021), el aumento de la variabilidad climática y el crecimiento urbano acelerado han configurado un escenario crítico para la seguridad hídrica. A ello se suma que la infraestructura pluvial de muchas ciudades ha estado tradicionalmente orientada a evacuar los escurrimientos con rapidez, mientras que la planificación contemporánea del riesgo de inundación demanda integrar medidas territoriales y soluciones de menor impacto que reduzcan la exposición y la vulnerabilidad urbanas (Olcina, 2020).

La recuperación de agua pluvial y su conducción hacia sistemas de recarga gestionada de acuíferos representan una estrategia dual con alto potencial de sostenibilidad: por un lado, permiten disminuir la presión sobre las fuentes subterráneas al favorecer la recarga del acuífero; y por otro, mitiga los riesgos de inundación al transformar la escorrentía urbana en un recurso útil y productivo (Dillon et al., 2020).

A nivel internacional, los sistemas MAR han demostrado su eficacia técnica y económica, mientras que en México existen experiencias documentadas de recarga artificial mediante pozos en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, como el proyecto piloto desarrollado en la zona de El Caracol, en Ecatepec de Morelos (González y Juárez, 2017).

En México, la infiltración artificial de agua pluvial y de escurrimientos superficiales al suelo y al subsuelo está regulada técnicamente por la NOM-015-CONAGUA-2007, orientada a proteger la calidad del agua subterránea durante estos procesos. A partir de 2025, este marco se amplió con la expedición de la Ley General de Aguas y la reforma de la Ley de Aguas Nacionales, que incorporan de manera más explícita la captación pluvial y la recarga artificial dentro de la política hídrica nacional (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2025a, 2025b). El reto actual radica en articular estas disposiciones legales con la regulación técnica, el financiamiento y los instrumentos de planeación necesarios para su implementación a mayor escala. En este sentido, la justificación del presente capítulo radica en la necesidad de:

1. Consolidar la implementación del nuevo marco jurídico mediante instrumentos técnicos y reglamentarios que faciliten la captación pluvial y la recarga gestionada.
2. Impulsar programas de infraestructura de captación y recarga mediante incentivos fiscales, mecanismos de financiamiento público-privado y esquemas de inversión que garanticen su viabilidad.
3. Integrar la gestión pluvial y la recarga gestionada en los instrumentos de planeación urbana y ordenamiento territorial, en coherencia con los objetivos de seguridad hídrica, resiliencia climática y desarrollo sostenible.

De esta manera, se podrá avanzar hacia un modelo de gestión hídrica integral que combine seguridad, sostenibilidad y justicia territorial.

Marco teórico

Gestión del agua y cambio climático

La gestión del agua se ha convertido en uno de los retos más urgentes en el contexto del cambio climático, debido al aumento de la variabilidad de la disponibilidad hídrica y a la mayor frecuencia de eventos extremos, como sequías e inundaciones (IPCC, 2022; Unesco, 2021).

En este marco, los cambios en los patrones de precipitación y en los balances hídricos regionales han puesto en crisis los sistemas tradicionales de abastecimiento, diseñados bajo condiciones de mayor estabilidad climática. El impacto es particularmente severo en los países en desarrollo, donde la infraestructura hídrica es insuficiente o presenta rezagos en su mantenimiento y modernización.

En México, la sobreexplotación de acuíferos ha reducido drásticamente la recarga natural, lo que ha generado un déficit que compromete la seguridad hídrica a nivel nacional (Conagua, 2023). Esto ha derivado en un círculo vicioso: al disminuir los niveles freáticos, aumentan los costos de extracción y el consumo energético, lo que, a su vez, profundiza las desigualdades territoriales y la vulnerabilidad social.

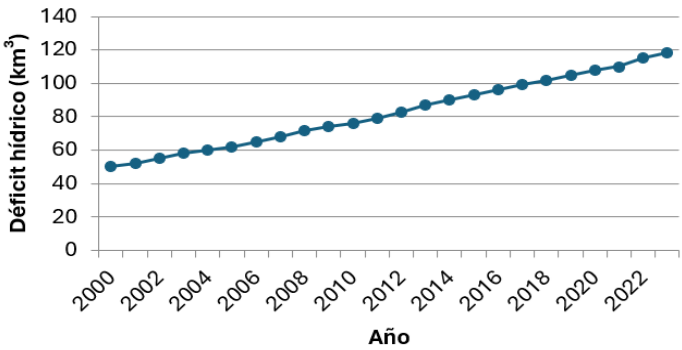
La urbanización también puede modificar tanto los mecanismos de recarga como la calidad del agua subterránea. En el acuífero urbano de San Salvador, Barrera-de-Calderón et al. (2021) identificaron aportes de recarga asociados a fugas de los sistemas urbanos de abastecimiento y alcantarillado, advirtiendo que estos procesos pueden incrementar la recarga cuantitativamente, pero también introducir riesgos para la calidad del agua subterránea.

Los procesos de urbanización y de cambio de uso del suelo pueden modificar significativamente las condiciones de recarga de los acuíferos. En la porción sur de la cuenca de México, Ávila-Carrasco et al. (2023) documentaron una disminución de la recarga potencial asociada al crecimiento urbano. Este antecedente constituye un referente comparativo para analizar procesos de urbanización y recarga similares en la porción norte de la cuenca, en particular en el entorno del acuífero Cuautitlán-Pachuca.

En un contexto más amplio, el crecimiento urbano y la variabilidad climática incrementan la presión sobre los recursos hídricos y exigen estrategias de gestión más resilientes (He et al., 2021).

La evolución reciente del déficit hídrico en México entre 2000 y 2023, que explica la urgencia de este cambio de paradigma, se sintetiza en el gráfico 1.

Gráfico 1. *Evolución del déficit hídrico en México (2000–2023)*



Fuente: elaboración propia con base en Conagua (2023).

Captación y aprovechamiento de agua pluvial

La captación de agua de lluvia (*rainwater harvesting systems*, RWHS) constituye una alternativa para complementar el abastecimiento mediante sistemas de captación y almacenamiento adaptables a distintas escalas y condiciones de uso (Gould y Nissen-Petersen, 1999). Estos sistemas, que van desde techos captadores y tanques de almacenamiento hasta sistemas más sofisticados de filtración y bombeo, pueden implementarse a diferentes escalas: viviendas, escuelas, edificios públicos e incluso parques industriales.

La captación de agua de lluvia puede constituir una fuente complementaria de abastecimiento, siempre que los sistemas estén diseñados, operados y mantenidos adecuadamente. La World Health Organization (WHO, 2022) señala que los sistemas de captación pluvial correctamente diseñados, con superficies de captación limpias, depósitos protegidos y tratamiento cuando sea necesario, pueden proporcionar agua con un riesgo sanitario reducido.

La contribución de estos sistemas al abastecimiento doméstico varía ampliamente en función del régimen de precipitación, del área de captación, de la capacidad de almacenamiento y de los usos finales del agua (Campisano et al., 2017).

El desempeño de los sistemas de captación pluvial depende, además de las condiciones climáticas, de la capacidad de almacenamiento y de la demanda que se pretende satisfacer. Jing et al. (2017), al evaluar sistemas de captación de agua de lluvia en ocho ciudades de cuatro zonas climáticas de China, encontraron diferencias importantes tanto en la eficiencia de ahorro de agua como en la viabilidad económica de los sistemas.

Los resultados muestran que las condiciones de mayor precipitación y un dimensionamiento adecuado del almacenamiento favorecen su desempeño, mientras que en regiones áridas su viabilidad económica puede verse considerablemente reducida.

De manera complementaria, la captación de agua de lluvia en azoteas constituye una alternativa particularmente relevante en contextos de escasez hídrica, al permitir aprovechar superficies construidas para recolectar y almacenar agua destinada a diferentes usos, siempre que el diseño y la capacidad de almacenamiento se adapten a las condiciones locales (Lepcha et al., 2024).

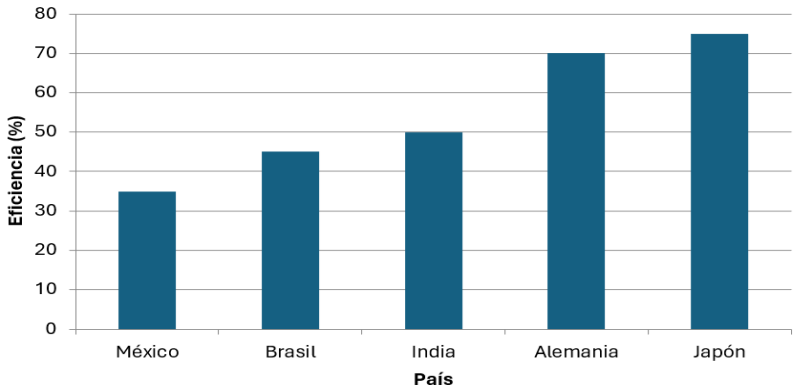
La evaluación del potencial de captación pluvial requiere considerar no sólo la disponibilidad del recurso, sino también su calidad y su variabilidad espacial. Matta-Ortíz et al. (2024), mediante un análisis espacial en un contexto urbano latinoamericano, muestran la utilidad de integrar ambos componentes para evaluar la viabilidad del aprovechamiento del agua de lluvia.

En México, la captación de agua pluvial se ha implementado como alternativa complementaria de abastecimiento tanto en contextos rurales como urbanos. Diversas experiencias nacionales muestran su utilidad para reducir la presión sobre las fuentes convencionales y ampliar la disponibilidad de agua para usos no potables, aunque su desempeño depende de las condiciones climáticas, de la infraestructura disponible y del contexto de implementación (Yannopoulos et al., 2019). Asimismo, persisten retos relacionados con su regulación, financiamiento, operación y aceptación social.

Profundizar en el marco regulatorio, en los esquemas de incentivos fiscales y en las campañas de educación hídrica resulta esencial para transitar hacia un modelo de gestión integral que posicione la lluvia como recurso

estratégico y no como residuo. Una comparación internacional de la eficiencia de distintos sistemas de captación pluvial, y de su contribución potencial a la demanda doméstica se presenta en el gráfico 2.

Gráfico 2. *Comparación internacional de eficiencia en sistemas de captación pluvial*



Fuente: WHO (2022), adaptado por los autores.

Recarga gestionada de acuíferos: MAR, ASR y SAT

Dentro de las modalidades de recarga gestionada de acuíferos, los sistemas de almacenamiento y recuperación en acuíferos (*aquifer storage and recovery*, ASR) constituyen una alternativa de creciente relevancia (Zhang et al., 2020; Dillon et al., 2019). Esta modalidad permite introducir agua previamente acondicionada en el acuífero durante periodos de disponibilidad, almacenarla temporalmente en el subsuelo y recuperarla posteriormente en periodos de mayor demanda o escasez, lo cual reduce la dependencia de presas o trasvases.

Dentro de las modalidades de recarga gestionada, el tratamiento suelo-acuífero (*soil aquifer treatment*, SAT) constituye una alternativa que aprovecha el tránsito del agua a través del suelo y de la zona no saturada como una etapa adicional de tratamiento. Su desempeño depende de la calidad del agua de alimentación, de las condiciones hidrogeológicas locales y del

diseño del sistema, por lo que la selección del sitio, el pretratamiento y, cuando resulte necesario, el tratamiento posterior son factores determinantes de su eficiencia (Sharma y Kennedy, 2017).

En el acuífero Cuautitlán-Pachuca se han desarrollado experiencias piloto de recarga artificial mediante pozos. En el caso de El Caracol, el proyecto incluyó dos pozos de recarga y cuatro de monitoreo, además de ensayos para determinar la capacidad de infiltración bajo diferentes cargas hidráulicas (González y Juárez, 2017). Estas experiencias muestran que la recarga artificial no constituye únicamente un desafío técnico, sino también institucional, pues requiere mecanismos adecuados de regulación, financiamiento y seguimiento.

La etapa de recarga y almacenamiento subterráneo de un sistema ASR, así como su relación con la recarga gestionada del acuífero, se esquematiza en el gráfico 3.

Gráfico 3. *Esquema de las etapas de pretratamiento, recarga y almacenamiento subterráneo en un sistema ASR*



Fuente: elaboración propia con base en Dillon et al. (2019) y Zhang et al. (2020).

Con independencia de la atención o del ajuste de estos desafíos, la recuperación de agua pluvial con fines de infiltración, en concordancia con los criterios establecidos en la NOM-015-CONAGUA-2007, puede alcanzar volúmenes del orden de 1100 m^3 por evento de lluvia en superficies urbanizadas de aproximadamente 7 hectáreas, de acuerdo con cálculos propios basados en la experiencia de los autores en proyectos habitacionales de la zona metropolitana de Pachuca. Este volumen sería suficiente para abastecer a 5500 personas durante un día, considerando una dotación de 200 litros por persona.

Tecnologías híbridas y sinergias entre captación pluvial y recarga gestionada

La integración de la captación pluvial con sistemas de recarga gestionada permite aprovechar el agua de lluvia como fuente para la recarga y el almacenamiento subterráneo, puesto que aumenta las alternativas de gestión frente a periodos de escasez y variabilidad hídrica (Sufyan et al., 2024). Esta visión integra la captación descentralizada de agua de lluvia, su pretratamiento y conducción, así como su incorporación a sistemas de recarga, incluidos los sistemas ASR cuando las condiciones hidrogeológicas y de calidad del agua lo permiten.

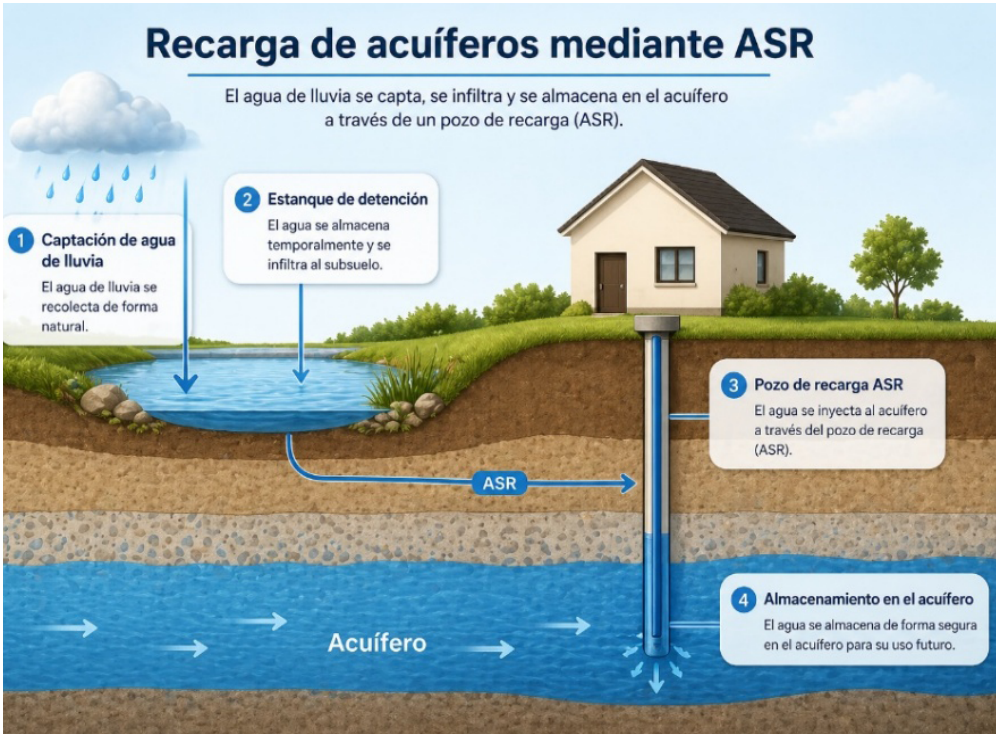
El concepto de sistemas híbridos de abastecimiento hídrico se basa precisamente en la integración de infraestructuras centralizadas con fuentes y soluciones descentralizadas, como la captación de agua de lluvia, el aprovechamiento de escurrimientos y el reúso de agua. Esta combinación puede ampliar la capacidad de los sistemas convencionales y contribuir a mejorar su resiliencia ante el crecimiento de la demanda y la variabilidad climática (Sapkota et al., 2015).

Esta integración puede contribuir a reducir la escorrentía superficial y mitigar las inundaciones urbanas, beneficios ampliamente asociados con la infraestructura verde y las soluciones de bajo impacto (Khodadad et al., 2023). Cuando estas estrategias se articulan con sistemas de recarga gestionada, también pueden favorecer el almacenamiento subterráneo y reducir

la presión sobre las fuentes convencionales de abastecimiento (Dillon et al., 2019; Sufyan et al., 2024).

En el contexto mexicano, estas estrategias pueden complementarse con las disposiciones de la NOM-015-CONAGUA-2007 aplicables a la infiltración artificial de agua pluvial y de escurrimientos superficiales al suelo y al subsuelo, orientadas a proteger la calidad del agua subterránea.

Gráfico 4. *Modelo conceptual de la integración entre la captación pluvial y las etapas de recarga y almacenamiento de un sistema ASR.*



Fuente: elaboración propia con base en Dillon et al. (2019), Sapkota et al. (2015) y Sufyan et al. (2024).

Al articular las normas y las tecnologías, se genera un mayor impacto: se reduce la vulnerabilidad frente a las inundaciones durante las lluvias intensas y se fortalece la seguridad hídrica en épocas de estiaje.

La experiencia internacional muestra que la recarga gestionada de acuíferos se ha desarrollado bajo distintas modalidades en países como India, Israel y Australia, donde su implementación ha contribuido al almacenamiento estratégico de agua y a la resiliencia de los sistemas de abastecimiento frente a condiciones de escasez y variabilidad climática (Dillon et al., 2019).

De cara al futuro, este tipo de esquemas híbridos podría convertirse en una pieza clave de la planeación urbana sustentable en regiones semiáridas y metropolitanas, donde los retos de escasez y de exceso coexisten.

La recarga de acuíferos puede ser natural o gestionada, y se distingue principalmente por la intervención humana. La recarga natural ocurre de forma espontánea a partir de la infiltración de agua de lluvia y de escurrimientos, por lo que depende de factores climáticos y presenta alta variabilidad, aunque no implica costos ni infraestructura.

En contraste, la recarga gestionada consiste en la introducción intencional de agua mediante técnicas como pozos o lagunas de infiltración, lo que permite un mayor control y planificación, pero requiere inversión y monitoreo para evitar riesgos de contaminación.

En general, la primera predomina en entornos con condiciones favorables, mientras que la segunda resulta clave en zonas urbanas con estrés hídrico.

Marco normativo y políticas públicas en México

El marco regulatorio mexicano en materia de captación pluvial y recarga gestionada experimentó una transformación relevante en 2025 con la expedición de la Ley General de Aguas y la reforma de diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2025a, 2025b). La regulación técnica de las obras de infiltración continúa articulándose mediante instrumentos específicos, entre ellos la NOM-015-CONAGUA-2007.

Los fenómenos hidrometeorológicos han generado históricamente impactos sociales y económicos significativos en México. Para el periodo 1980–1999 se estimaron 2767 fallecimientos y daños totales por aproxima-

damente 4537 millones de dólares asociados a este tipo de fenómenos (Salas Salinas y Jiménez Espinosa, 2004). En una evaluación posterior, Cenapred (2019) reportó que el 86.8% de los daños y pérdidas registrados entre 2000 y 2018 fueron de origen hidrometeorológico, con un costo anual promedio estimado en 2357 millones de dólares.

Esta coexistencia de daños asociados a fenómenos hidrometeorológicos y condiciones persistentes de presión sobre la disponibilidad del agua evidencia una doble vulnerabilidad hídrica en México (Cenapred, 2019; Conagua, 2021).

La transición hacia el nuevo marco jurídico no elimina por sí misma los retos de implementación, por lo que resulta necesario articular sus disposiciones con la regulación técnica, los instrumentos de planeación territorial y los mecanismos institucionales y financieros requeridos para la captación pluvial y la recarga gestionada.

La tabla 1 sintetiza comparativamente los principales marcos normativos en materia de captación pluvial y recarga gestionada en distintos países, destacando sus diferencias de enfoque, alcance técnico y grado de desarrollo regulatorio.

Tabla 1. *Comparación de marcos normativos sobre la captación y la recarga gestionada en distintos países.*

País	*Normativa principal*	*Enfoque*	*Observaciones relevantes*
México	Ley General de Aguas (2025)	Regula expresamente la captación de agua pluvial y establece directrices para la implementación de sistemas de captación en obras públicas y privadas.	Incorpora la captación pluvial al marco legal nacional y distribuye las responsabilidades entre los distintos órdenes de gobierno.
México	Ley de Aguas Nacionales, reforma 2025	Mantiene la gestión de las aguas nacionales e incorpora a la política hídrica la infiltración natural y artificial, así como la recarga artificial de acuíferos.	La recarga artificial continúa sujeta a la normatividad y a los instrumentos técnicos aplicables.
México	NOM-015-CONAGUA-2007	Establece especificaciones para la infiltración artificial de agua pluvial y escurrimientos superficiales al suelo y subsuelo.	Constituye el instrumento técnico específico para proteger la calidad del agua subterránea durante la infiltración.
Estados Unidos	Safe Drinking Water Act (SDWA); Underground Injection Control (UIC)	Control de la inyección en acuíferos para evitar la contaminación; incluye proyectos de recarga artificial.	Alto nivel técnico; las regulaciones estatales complementan las federales.

España	Directiva Marco del Agua (2000/60/CE); Real Decreto 1085/2024	Marco integral de gestión hídrica y regulación de la reutilización del agua, incluida la recarga artificial de acuíferos como destino ambiental.	Establece requisitos de calidad diferenciados para la recarga mediante inyección directa y mediante percolación a través del terreno.
Australia	Water Act (2007); National Water Initiative	Enfoque en la sostenibilidad de los acuíferos y en el control de la recarga artificial.	Normativa estricta; experiencias exitosas en Adelaide y Perth.
India	Manual on Artificial Recharge of Groundwater (2013)	Directrices técnicas y legales para proyectos de recarga en regiones semiáridas.	Enfoque en la cosecha de agua pluvial; cumplimiento limitado.
Chile	Código de Aguas, modificaciones recientes (2022)	Reconoce la recarga artificial como uso de agua; regulación incipiente.	Avances recientes, pero falta una reglamentación técnica detallada.
Sudáfrica	National Water Act (1998)	Marco de gestión integrada; incluye recarga artificial como seguridad hídrica.	Regulación general; proyectos localizados con aguas tratadas.

Fuente: elaboración propia con base en los instrumentos normativos y en los documentos oficiales indicados en la tabla.

La transformación del marco jurídico mexicano abre nuevas posibilidades para institucionalizar estas estrategias; sin embargo, su implementación efectiva requerirá articular las disposiciones legales con criterios técnicos de calidad del agua, con mecanismos de financiamiento y con esquemas de gobernanza adecuados (Unesco, 2022; OECD, 2022).

Perspectivas de sostenibilidad e innovación

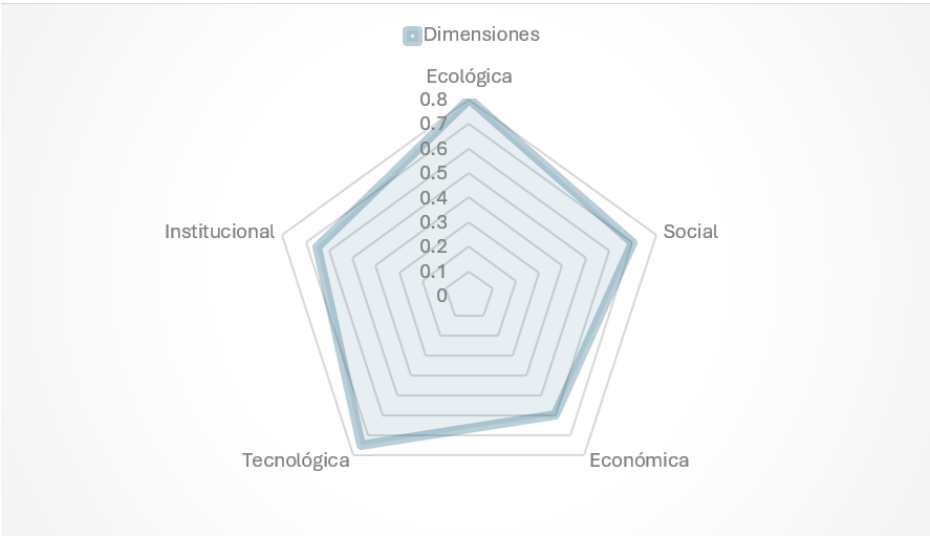
La integración de estas tecnologías no sólo responde a un problema técnico, sino que también se inscribe en un paradigma de sostenibilidad hídrica y justicia territorial (UN–Water, 2021). Este paradigma enfatiza que el acceso equitativo al agua es un derecho humano y un componente esencial de la cohesión social y de la resiliencia comunitaria.

En este contexto, la adaptación de la infraestructura hídrica urbana frente al cambio climático requiere integrar medidas de resiliencia, innovación tecnológica y estrategias de gestión capaces de responder a escenarios de mayor variabilidad y presión sobre los sistemas de abastecimiento (Ferdowsi et al., 2024).

Desde un enfoque de economía circular, el agua de lluvia pasa de ser vista como residuo a constituirse en recurso estratégico (Arciniega-Esparza et al., 2025). Además, la recarga gestionada puede constituir una medida de adaptación climática de bajo arrepentimiento, al contribuir simultáneamente al almacenamiento subterráneo, a la reducción de los impactos asociados a sequías e inundaciones y al fortalecimiento de la capacidad adaptativa de los sistemas hídricos (Henao Casas et al., 2022).

Las dimensiones técnicas, ambientales, sociales e institucionales que integran este enfoque de sostenibilidad hídrica se representan de manera esquemática en el gráfico 5.

Gráfico 5. *Dimensiones de la sostenibilidad hídrica en sistemas híbridos*



Fuente: elaboración propia con base en Henao Casas et al. (2022).

El horizonte de innovación contempla la integración de enfoques de género e interculturalidad, para asegurar que los beneficios de estas tecnologías se distribuyan de manera equitativa y culturalmente pertinente.

De esta forma, las soluciones híbridas dejan de ser únicamente intervenciones técnicas para convertirse en verdaderas estrategias de justicia hídrica y territorial.

Seguridad hídrica y recarga gestionada

El concepto de seguridad hídrica se ha consolidado como eje articulador de las políticas contemporáneas de agua. Organismos internacionales como UN–Water (2021, 2023) y la Unesco(2021) definen la seguridad hídrica como la capacidad de una sociedad para salvaguardar el acceso sostenible a recursos hídricos de calidad aceptable, proteger a la población frente a riesgos relacionados con el agua (inundaciones, sequías, contaminación), y conservar los ecosistemas en los que se sustenta dicha disponibilidad.

Dentro de este enfoque, el agua subterránea desempeña un papel estratégico en la seguridad hídrica debido a su capacidad de almacenamiento y a su función como reserva frente a periodos de variabilidad climática y sequía. Foster y MacDonald (2014) advierten que el papel de los acuíferos debe incorporarse explícitamente al análisis y la planificación de la seguridad hídrica, particularmente en regiones con alta dependencia del abastecimiento subterráneo.

Desde una perspectiva de gestión, la sostenibilidad de los recursos subterráneos requiere equilibrar la explotación con las tasas de recarga, mantener niveles de los acuíferos compatibles con los ecosistemas dependientes del agua subterránea y proteger tanto la disponibilidad como la calidad del recurso (Foster y MacDonald, 2021). La creciente presión sobre los acuíferos y la variabilidad climática refuerzan la necesidad de integrar estas consideraciones en las estrategias contemporáneas de seguridad hídrica (He et al., 2021).

La recarga gestionada de acuíferos (*managed aquifer recharge*, MAR) y los sistemas de captación de agua pluvial se inscriben precisamente en este enfoque. Al reducir la presión sobre las fuentes superficiales, mitigar las inundaciones urbanas y almacenar excedentes hídricos en el subsuelo, estas estrategias contribuyen simultáneamente a la disponibilidad, la protección frente a riesgos y la sostenibilidad ecosistémica.

El fortalecimiento de la seguridad hídrica, por tanto, depende tanto del diseño técnico de las obras como de la existencia de marcos normativos claros y de una gobernanza que garantice accesos equitativos (UN–Water, 2021). En contextos como el de la región de Hidalgo, donde convergen acuíferos sobreexplotados, expansión urbana acelerada y episodios severos de inun-

dación, la articulación entre la captación pluvial, el MAR y la planeación urbana resiliente representa una vía concreta para avanzar hacia niveles más altos de seguridad hídrica. Este capítulo analiza dicha articulación como componente central de las soluciones basadas en la naturaleza orientadas al cumplimiento del ODS 6.

Metodología

La investigación se diseñó con un enfoque metodológico mixto que combinó herramientas cuantitativas y cualitativas para evaluar de manera integral la recuperación de agua pluvial como estrategia para fortalecer la seguridad hídrica en contextos urbanos de México.

Se trató de un estudio de carácter exploratorio-descriptivo con componentes comparativos, pues, por un lado, buscó identificar vacíos normativos, tecnológicos y sociales en torno a la captación y el aprovechamiento de la lluvia y, por otro, permitió caracterizar y contrastar experiencias previas a nivel nacional e internacional.

El diseño exploratorio se justificó porque en México los esquemas de recarga y aprovechamiento del agua pluvial aún se encuentran en fase incipiente y cuentan con una documentación sistemática limitada, lo que obliga a abrir líneas de análisis novedosas.

El componente descriptivo permitió detallar las características técnicas de los sistemas implementados, mientras que la dimensión comparativa buscó establecer similitudes y diferencias en términos de eficiencia, costos, aceptación social y respaldo normativo entre casos mexicanos y referentes internacionales, siguiendo la perspectiva planteada por Dillon et al. (2020) en torno a la recarga gestionada de acuíferos (*managed aquifer recharge*, MAR).

Para cumplir con este objetivo, la investigación recurrió a diversas fuentes de información. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión documental y normativa de la Ley de Aguas Nacionales, de los reglamentos estatales de gestión hídrica y de los planes de ordenamiento urbano vigentes. Este ejercicio se complementó con la consulta de documentos técnicos de referencia, entre los que destacan *The United Nations World Water Development*

Report 2022: Groundwater: Making the Invisible Visible (Unesco, 2022) y la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (European Parliament & Council of the European Union, 2000).

En segundo lugar, se integraron datos provenientes de informes oficiales y bases de datos estadísticas de organismos nacionales e internacionales, como la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2023) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2016). Asimismo, se sistematizaron estudios de caso representativos, tanto en México como en el extranjero, con el fin de contrastar las condiciones hidrogeológicas, los diseños técnicos y los arreglos institucionales que sustentan cada experiencia.

La selección de casos se centró en tres contextos relevantes. A nivel nacional se consideraron la Ciudad de México, donde se han desarrollado proyectos piloto de pozos de infiltración pluvial, y la zona metropolitana de Pachuca, caracterizada por la construcción de lagunas y tanques de regulación con funciones de recarga indirecta.

A nivel internacional, se incorporó la experiencia de Gujarat, India, donde diversos esquemas comunitarios de captación pluvial y de recarga gestionada de acuíferos han sido documentados como estrategias relevantes ante la escasez hídrica. La selección de este caso se justificó por la diversidad de condiciones hidrogeológicas y climáticas, su exposición a estrés hídrico estacional y la disponibilidad de información verificable que permite contrastarlo con contextos urbanos y semiurbanos del centro de México (Maheshwari et al., 2014).

El análisis se estructuró en torno a tres grandes dimensiones: técnica, social y normativa. La dimensión técnica consideró indicadores de eficiencia de la infiltración, costos unitarios y requerimientos de mantenimiento. Para la interpretación del comportamiento hidrológico de las medidas de gestión pluvial, se consideraron, además, componentes del balance hídrico, como las entradas, salidas, almacenamiento e infiltración, cuya medición y seguimiento son fundamentales para evaluar su desempeño (Fletcher et al., 2021). Asimismo, se consideró la revisión de Rentachintala et al. (2022), como referente para identificar criterios asociados a la gestión pluvial urbana sostenible y resiliente.

La dimensión social se centró en el grado de aceptación comunitaria, la percepción del riesgo asociado a la calidad del agua y los niveles de partici-

pación ciudadana en la gestión de los sistemas, aspectos que la literatura reciente ha identificado como determinantes del éxito de los proyectos de recarga (Sufyan et al., 2024).

Por su parte, la dimensión normativa-institucional evaluó la existencia de marcos regulatorios claros, la disponibilidad de incentivos fiscales y la presencia de esquemas de financiamiento. Para este análisis se consideraron tanto referentes internacionales de gobernanza del agua (OECD, 2016) como antecedentes del debate nacional sobre los rezagos y las necesidades de transformación de la política hídrica mexicana, incluida la posición de la Asociación Mexicana de Hidráulica ante la Cámara de Diputados en 2022 (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2022).

El procedimiento metodológico se desarrolló en cuatro fases sucesivas: la primera correspondió a la caracterización técnica, en la cual se sistematizaron indicadores de rendimiento, eficiencia y costos de las experiencias nacionales e internacionales, con base en datos documentados en publicaciones recientes (Dillon et al., 2020; Ross, 2022). La segunda fase implicó una comparación internacional, en la que los casos se contrastaron mediante una matriz comparativa que permitió identificar fortalezas y limitaciones tanto en los ámbitos técnico y social como regulatorio. La tercera fase se centró en el análisis normativo, en el que se revisaron a detalle los vacíos legales y las limitaciones institucionales que restringen la implementación de esquemas de recarga en México, en comparación con los marcos regulatorios de Europa y de la India. La cuarta fase consistió en integrar una propuesta metodológica de evaluación que combina indicadores técnicos, sociales e institucionales y puede replicarse en otros contextos urbanos mexicanos.

Con el propósito de garantizar la validez de los resultados, se recurrió a un proceso de triangulación metodológica, mediante la cual los hallazgos de la revisión documental se contrastaron con la literatura científica reciente y con la opinión de especialistas en hidrología urbana y en derecho ambiental. La validación externa permitió ajustar la propuesta y reducir posibles sesgos derivados de la limitada disponibilidad de información oficial en México.

Resultados y discusión

Los resultados de la investigación permiten identificar la viabilidad y los retos de la recuperación de agua pluvial en contextos urbanos de México, a partir del análisis técnico, social y normativo de las experiencias revisadas.

La información recolectada se sistematizó en matrices comparativas que integran evidencia técnica, económica, social y normativa, con el fin de ofrecer un panorama general del estado actual y de las posibilidades de aplicación de estos sistemas en distintos contextos.

Desde una dimensión técnica, la eficiencia de los sistemas de captación pluvial y recarga gestionada dependen de factores como las condiciones hidrogeológicas, el régimen de precipitación, la capacidad de almacenamiento, la calidad del agua de recarga y los requerimientos de operación y mantenimiento. La literatura especializada muestra que no existe un desempeño único aplicable a todos los contextos, pues la respuesta de estos sistemas varía en función de las condiciones climáticas, territoriales y tecnológicas de cada caso (Jing et al., 2017; Rentachintala et al., 2022; Sufyan et al., 2024).

Desde la dimensión económica, la viabilidad de los sistemas de recarga gestionada no depende únicamente de la inversión inicial, sino también del tipo de tecnología empleada, la escala del proyecto, la fuente del agua de recarga y el uso final del recurso almacenado. Por ello, su evaluación requiere considerar conjuntamente los costos de implementación y de operación, así como los beneficios económicos, sociales y ambientales asociados a estos sistemas (Ross, 2022).

Estos elementos adquieren especial importancia en contextos en los que el financiamiento de la infraestructura hídrica depende en gran medida de recursos públicos y existen dificultades para incorporar mecanismos de inversión complementarios.

En un contexto más amplio, la International Water Association (IWA, 2024) identifica, entre las principales barreras para atraer financiamiento comercial al sector hídrico, la incertidumbre regulatoria, las limitaciones en la preparación de proyectos financiables y las debilidades en los esquemas

de gobernanza y gestión, al mismo tiempo que destaca la necesidad de desarrollar modelos innovadores de financiamiento.

En la dimensión social, la aceptación y la sostenibilidad de los proyectos de captación pluvial y recarga gestionada dependen no solo de su desempeño técnico, sino también de la percepción del riesgo, de la confianza en la calidad del agua, de la transparencia de la información y de la participación de los actores locales. En los sistemas MAR, el involucramiento de las comunidades y de las partes interesadas desde las etapas de planeación, implementación y seguimiento constituye un elemento relevante para favorecer su aceptación y su sostenibilidad a largo plazo (Sufyan et al., 2024).

En cuanto a la dimensión normativa, el análisis revela que, al menos hasta 2024, México carecía de un marco jurídico específico que regulara de manera integral la recarga gestionada de acuíferos y el uso del agua pluvial en entornos urbanos. De hecho, en 2025, el marco jurídico mexicano en materia de captación pluvial, infiltración y recarga gestionada se encontraba distribuido entre la Ley de Aguas Nacionales, su reglamento, diversas normas oficiales mexicanas y las disposiciones de distintos ámbitos de competencia, lo que generaba una regulación fragmentaria que dificultaba su incorporación integral en la planeación hídrica y urbana. Este escenario normativo se modificó con la reforma simultánea de diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales y la expedición de la Ley General de Aguas, ambas publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 11 de diciembre de 2025 (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2025a, 2025b).

La reforma constituye un cambio sustantivo en la organización del marco jurídico del agua en México, aunque su alcance específico respecto de la captación pluvial y la recarga gestionada deberá valorarse a partir de su desarrollo reglamentario y de su articulación con las normas técnicas aplicables.

Por el contrario, la Unión Europea cuenta con un marco consolidado de política hídrica establecido por la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE), orientado a la protección de las aguas superficiales y subterráneas, así como al uso sostenible de los recursos hídricos. Asimismo, India ha desarrollado programas gubernamentales para fomentar la captación de agua de lluvia y la recarga artificial de aguas subterráneas, incluidos esquemas de apoyo y subsidios para la construcción e implementación de

estructuras de recarga (European Parliament & Council of the European Union, 2000; Ministry of Water Resources, River Development and Ganga Rejuvenation, Government of India, 2016).

Tabla 2. *Síntesis técnica de experiencias de captación pluvial y recarga gestionada analizadas*

Contexto	***Tipo de infraestructura***	***Evidencia técnica documentada***	***Aspectos relevantes***
Ciudad de México	Pozos de absorción pluvial	Experiencias de infiltración de agua pluvial con resultados positivos para recarga y reducción de inundaciones	El desempeño puede disminuir por azolvamiento y requiere mantenimiento
Zona metropolitana de Pachuca	Captación e infiltración pluvial	Experiencias de los autores indican potencial de recuperación del orden de 1100 m^3 por evento de lluvia en superficies urbanizadas de aproximadamente 7 hectáreas	Resultado dependiente de precipitación, superficie de captación y condiciones locales
Gujarat (India)	Sistemas de recarga gestionada	La implementación de MAR contribuye al almacenamiento subterráneo, especialmente durante años húmedos	En años secos, la disponibilidad de escurrimiento y la capacidad de almacenamiento limitan su desempeño

Fuente: elaboración propia con base en antecedentes documentados para la Ciudad de México, en las experiencias de los autores en la zona metropolitana de Pachuca y en la literatura sobre MAR en Gujarat, India.

Tabla 3. *Evidencia social y participación comunitaria asociadas a sistemas de captación pluvial y gestión del agua subterránea*

Contexto	***Evidencia social documentada***	***Aspectos relevantes***
Ciudad de México	Alta aceptación de sistemas de captación pluvial entre usuarios evaluados	Calidad del agua, mantenimiento y continuidad de uso
Pachuca (ZM)	No se identificó en esta revisión una medición publicada de aceptación social	Requiere evaluación específica de percepción y participación local
Gujarat (India)	Participación comunitaria documentada en la gestión y monitoreo del agua subterránea	Involucramiento comunitario como componente de la gestión y recarga

Fuente: elaboración propia con base en Sufyan et al. (2024), Castelán-Cabañas et al. (2024) y Maheshwari et al. (2014).

Nota: los hallazgos se presentan de manera resumida en las tablas 2 y 3, que sintetizan la información técnica, económica, social y normativa de los sistemas analizados.

Discusión e interpretación de resultados

El análisis de la integración de la captación pluvial con estrategias de recarga gestionada de acuíferos (MAR), incluidas modalidades como ASR en la región de Hidalgo, revela un escenario de oportunidades y retos que dialoga tanto con la literatura internacional como con la evidencia local. El gráfico 1 muestra el incremento sostenido del déficit hídrico nacional, mientras que la tabla 1 evidencia las diferencias entre los marcos regulatorios analizados.

A escala global, los sistemas de agua subterránea están experimentando modificaciones en sus procesos de recarga, descarga, flujo, almacenamiento y distribución como consecuencia tanto del cambio climático como de las actividades antropogénicas (Kuang et al., 2024).

Este contexto refuerza la necesidad de desarrollar estrategias de gestión capaces de incrementar la resiliencia de los acuíferos y de adaptar las soluciones de recarga a las condiciones hidrogeológicas de cada región. La integración de la captación pluvial con estrategias de recarga gestionada, incluidas modalidades como ASR cuando las condiciones hidrogeológicas y de calidad del agua lo permitan, constituye una alternativa híbrida capaz de disminuir la presión sobre acuíferos sobreexplotados, siempre que se acompañe de procesos de tratamiento previo, monitoreo de la recarga y mecanismos adecuados de gobernanza.

La experiencia internacional muestra que la sostenibilidad de la gestión de las aguas subterráneas no depende exclusivamente de soluciones técnicas, sino también de arreglos institucionales, mecanismos de gobernanza y formas de participación de los usuarios adaptadas a las condiciones locales (Petit et al., 2021). En los contextos latinoamericanos, la implementación de estrategias de recarga gestionada requiere adaptar los esquemas de operación, monitoreo y gobernanza a las condiciones hidrogeológicas e institucionales locales, como lo muestran las experiencias documentadas en México y en otros contextos internacionales (González y Juárez, 2017; Sufyan et al., 2024).

Otro hallazgo relevante es que los beneficios de los sistemas híbridos no se limitan a la dimensión hidrológica. Como lo muestra el gráfico 5, su evaluación debe considerar también las dimensiones ambientales, sociales

e institucionales, así como su contribución a la resiliencia climática (Henao Casas et al., 2022). Esto coincide con los planteamientos de la ONU sobre la Agenda 2030 y el ODS 6, que enfatizan el acceso equitativo al agua como eje de la justicia ambiental (United Nations, 2021).

En Hidalgo, donde la expansión urbana de Pachuca y su zona metropolitana incrementa la presión sobre la disponibilidad de agua, la incorporación de estrategias de gestión hídrica resiliente debe articularse con instrumentos de planeación climática urbana que integren adecuadamente las etapas de diagnóstico, planificación, implementación y monitoreo (Aboagye y Sharifi, 2024).

La gestión de los acuíferos también debe considerar los efectos asociados a su explotación intensiva. La disminución prolongada de los niveles piezométricos puede generar pérdida de almacenamiento subterráneo, reducción de las aportaciones a cuerpos de agua superficiales, deterioro de la calidad del agua y, en determinados sistemas acuíferos, procesos de subsidencia e intrusión salina (Alley et al., 1999).

En este contexto, la recarga gestionada constituye una de las estrategias que pueden contribuir a mejorar la sostenibilidad del almacenamiento subterráneo, siempre que su diseño y operación se sustenten en una adecuada caracterización hidrogeológica y en controles de calidad del agua.

Sin embargo, no deben minimizarse los riesgos asociados a la recarga gestionada. Una caracterización insuficiente del sitio, una calidad inadecuada del agua de recarga o un monitoreo deficiente pueden favorecer procesos de obstrucción, alteraciones geoquímicas y el deterioro de la calidad del agua subterránea, por lo que la implementación de sistemas MAR requiere procedimientos sistemáticos de evaluación y gestión del riesgo (Imig et al., 2022; Zhang et al., 2020). Por ello, resulta indispensable articular su implementación con protocolos de calidad, monitoreo continuo y políticas integrales de gestión territorial.

La discusión también debe considerar la dimensión social, ya que la aceptación de los sistemas MAR depende de la percepción del riesgo, de la transparencia de la información y de la participación de los actores locales. El involucramiento de las comunidades y de las partes interesadas en la planeación, implementación y seguimiento de estos sistemas constituye un

elemento relevante para favorecer su aceptación y su sostenibilidad a largo plazo (Sufyan et al., 2024).

En síntesis, la integración de la captación pluvial con estrategias de recarga gestionada de acuíferos es técnicamente viable, ambientalmente pertinente y socialmente posible, siempre que se implemente mediante esquemas de planeación adaptativa, monitoreo permanente y cooperación entre la academia, el gobierno y la sociedad civil. El caso de Hidalgo puede convertirse en un referente nacional si logra capitalizar las lecciones internacionales y adaptarlas a su contexto territorial específico.

Conclusiones

El presente estudio muestra que la integración de sistemas de captación pluvial con estrategias de recarga gestionada de acuíferos (MAR), incluidas modalidades como ASR cuando las condiciones hidrogeológicas y de calidad del agua lo permitan, constituye una estrategia prometedora para enfrentar el creciente déficit hídrico en la región de Hidalgo y en contextos semiáridos similares en México. A lo largo del análisis se evidenció que, mientras el país mantiene una tendencia descendente en la disponibilidad *per cápita* de agua, persiste la oportunidad de revertir parcialmente esta tendencia mediante tecnologías híbridas basadas en la ciencia y la gobernanza.

Primero, los resultados confirman que la captación pluvial, por sí sola, tiene un impacto limitado cuando no se articula con estrategias de almacenamiento subterráneo. No obstante, al integrarse con estrategias de recarga gestionada, puede mejorar el aprovechamiento del recurso, reducir pérdidas por evaporación superficial y favorecer el almacenamiento estratégico de agua en los acuíferos. Esta integración es clave en ciudades en crecimiento como Pachuca, donde la presión demográfica y la urbanización acelerada exacerban la sobreexplotación de los mantos acuíferos.

En segundo lugar, se concluye que el éxito de estos sistemas depende directamente de la calidad normativa y del marco institucional. La comparación internacional muestra que los países con protocolos robustos logran una mayor eficiencia y un menor riesgo sanitario. En México, el nuevo marco jurídico representa un avance relevante, pero su efectividad depen-

derá de su desarrollo reglamentario, de su articulación con las normas técnicas aplicables y del fortalecimiento de las capacidades de monitoreo y fiscalización.

Tercero, la dimensión social emerge como un factor crítico. Sin aceptación comunitaria, ningún sistema de recarga puede sostenerse a largo plazo. La participación de las comunidades locales, acompañada de procesos de educación ambiental y de mecanismos de transparencia, constituye una condición necesaria para garantizar la sostenibilidad social de los proyectos.

En cuarto lugar, este trabajo enfatiza que la recarga gestionada no es una solución única ni aislada, sino que forma parte de un enfoque integral de gestión hídrica. Debe complementarse con medidas de eficiencia en el uso urbano, agrícola e industrial, así como con políticas de protección de los ecosistemas que aseguren la recarga natural de los acuíferos.

Finalmente, se concluye que la experiencia en Hidalgo puede escalarse a nivel nacional como un modelo de innovación hídrica, siempre que se articule con agendas globales como la transición hídrica justa, la seguridad hídrica urbana y la resiliencia climática. El reto no es únicamente técnico, sino también político y social.

La consolidación de sistemas híbridos que integren la captación pluvial con estrategias de recarga gestionada de acuíferos puede marcar una diferencia significativa en el futuro de la seguridad hídrica de México, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a la construcción de territorios más justos y resilientes.

Referencias

Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (1999). *Sustainability of groundwater resources* (U.S. Geological Survey Circular 1186). U.S. Geological Survey.

Aboagye, P. D., & Sharifi, A. (2024). Urban climate adaptation and mitigation action plans: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189*, 113886. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113886

Arciniega-Esparza, S., Hernández-Espriú, A., Salinas-Calleros, G., & González-Ortigoza, S. (2025). Análisis de la recarga potencial en la Cuenca de México usando datos

abiertos de la plataforma BM-Recharge. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 77*(1), A071124. https://doi.org/10.18268/BSGM2025v77n1a071124

Ávila-Carrasco, J. R., Hernández-Hernández, M. A., Herrera, G. S., & Hernández-García, G. de J. (2023). Urbanization effects on the groundwater potential recharge of the aquifers in the southern part of the Basin of Mexico. *Hydrology Research, 54*(5), 663-685. https://doi.org/10.2166/nh.2023.103

Barrera-de-Calderón, M. L., Garfias, J., Martel, R., & Salas-García, J. (2021). Impacto urbano en la calidad y la recarga del agua subterránea mediante trazadores hidrogeoquímicos y ambientales en el acuífero de San Salvador. *Tecnología y Ciencias del Agua, 12*(5), 1-52. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-05-01

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2022, 2 de junio). De la Comisión de Recursos Hidráulicos, Agua Potable y Saneamiento, relativa a la tercera reunión ordinaria, celebrada el miércoles 8 de diciembre de 2021. *Gaceta Parlamentaria, 6037*. https://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/65/2022/jun/20220602.html.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2025a, 11 de diciembre). Ley de Aguas Nacionales. Texto vigente. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2025b 11 de diciembre). Ley General de Aguas. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGAg.pdf.

Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research, 115*, 195-209. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056

Castelán-Cabañas, R., Padilla-Rivera, A., Muñoz-Villarreal, C., & Güereca-Hernández, L. P. (2024). Advancing urban water autonomy: A social life cycle assessment of rainwater harvesting systems in Mexico City. *Cleaner Environmental Systems, 13*, 100193. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100193

Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred). (2019). *Desastres en México: Impacto social y económico* [Infografía]. Cenapred. https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/318-INFOGRAFADESASTRESENMXICO-IMPACTOSOCIALYECONMICO.PDF

Conagua. (2011). *Agenda del Agua 2030*. Comisión Nacional del Agua. https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-10-12baja.pdf

Conagua. (2021). *Estadísticas del agua en México 2021*. Comisión Nacional del Agua. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf

Conagua. (2023). *Atlas del agua en México 2023*. Comisión Nacional del Agua. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/AMA2023.pdf

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., … Sapiano,

M. (2019). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, *27*(1), 1-30. https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z

Dillon, P., Fernández Escalante, E., Megdal, S. B., & Massmann, G. (2020). Managed aquifer recharge for water resilience. *Water, 12*(7), 1846. https://doi.org/10.3390/w12071846

European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities, L 327*, 1-73. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/

Ferdowsi, A., Piadeh, F., Behzadian, K., Mousavi, S.-F., & Ehteram, M. (2024). Urban water infrastructure: A critical review on climate change impacts and adaptation strategies. *Urban Climate, 58*, 102132. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102132

Fletcher, T. D., Bertrand-Krajewski, J.-L., Bonneau, J., Burns, M. J., Poelsma, P. J., & Thom, J. K. (2021). Measuring the water balance in stormwater control measures. In J.-L. Bertrand-Krajewski, F. Clemens-Meyer, & M. Lepot (Eds.), *Metrology in urban drainage and stormwater management: Plug and pray* (pp. 105-134). IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789060119_0105

Foster, S., & MacDonald, A. M. (2014). The "water security" dialogue: Why it needs to be better informed about groundwater. *Hydrogeology Journal, 22*, 1489–1492. https://doi.org/10.1007/s10040-014-1157-6

Foster, S., & MacDonald, A. M. (2021). Groundwater management. In R. Ferrier & A. Jenkins (Eds.), *Handbook of catchment management* (2nd ed., pp. 125–152). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119531241.ch6

González, S., & Juárez, M. A. (2017). Recarga artificial de acuíferos: Un caso de estudio en la zona de El Caracol, ubicado en el municipio de Ecatepec de Morelos, en el Estado de México. En O. A. Escolero Fuentes, C. Gutiérrez Ojeda, & E. Y. Mendoza Cázares (Eds.), *Manejo de la recarga de acuíferos: Un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 303-353). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Gould, J., & Nissen-Petersen, E. (1999). *Rainwater catchment systems for domestic supply: Design, construction and implementation*. Intermediate Technology Publications. https://practicalactionpublishing.com/book/1761/rainwater-catchment-systems-for-domestic-supply

He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications, 12*, 4667. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3

Henao Casas, J. D., Fernández Escalante, E., Calero Gil, R., & Ayuga, F. (2022). Managed aquifer recharge as a low-regret measure for climate change adaptation: Insights from Los Arenales, Spain. *Water, 14*(22), 3703. https://doi.org/10.3390/w14223703

Imig, A., Szabó, Z., Halytsia, O., Vrachioli, M., Kleinert, V., & Rein, A. (2022). A review on risk assessment in managed aquifer recharge. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *18*(6), 1513-1529. https://doi.org/10.1002/ieam.4584

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

International Water Association. (2024, May 21). *Unlocking commercial financing for digital transformation of the water sector*. https://www.iwa-network.org/blogs/unlocking-commercial-financing-for-digital-transformation-of-the-water-sector

Jing, X., Zhang, S., Zhang, J., Wang, Y., & Wang, Y. (2017). Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling, 126*, 74-85. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027

Khodadad, M., Aguilar-Barajas, I., & Khan, A. Z. (2023). Green infrastructure for urban flood resilience: A review of recent literature on bibliometrics, methodologies, and typologies. *Water, 15*(3), 523. https://doi.org/10.3390/w15030523

Kuang, X., Liu, J., Scanlon, B. R., Jiao, J. J., Jasechko, S., Lancia, M., Biskaborn, B. K., Wada, Y., Li, H., Zeng, Z., Guo, Z., Yao, Y., Gleeson, T., Nicot, J.-P., Luo, X., Zou, Y., & Zheng, C. (2024). The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science, 383*(6686), eadf0630. https://doi.org/10.1126/science.adf0630

Lepcha, R., Patra, S. K., Ray, R., Thapa, S., Baral, D., & Saha, S. (2024). Rooftop rainwater harvesting: A solution to water scarcity: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, *26*, 101305. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101305

Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G., Blanco-Piñón, A., Rangel-Martínez, Y., & González-Sandoval, M. (2015). Estimating the rainwater potential per household in an urban area: Case study in Central Mexico. *Water, 7*(9), 4622–4637. https://doi.org/10.3390/w7094622

Maheshwari, B., Varua, M., Ward, J., Packham, R., Chinnasamy, P., Dashora, Y., Dave, S., Soni, P., Dillon, P., Purohit, R., Hakimuddin, Shah, T., Oza, S., Singh, P., Prathapar, S., Patel, A., Jadeja, Y., Thaker, B., Kookana, R., … Rao, P. (2014). The role of transdisciplinary approach and community participation in village-scale groundwater management: Insights from Gujarat and Rajasthan, India. *Water, 6*(11), 3386–3408. https://doi.org/10.3390/w6113386

Matta-Ortíz, A. F., Güiza-Valdes, I. A., Trujillo-González, J. M., Rojas-Peña, J. I., Torres-Mora, M. A., García-Navarro, F. J., & Jiménez-Ballesta, R. (2024). Assessing rainwater quality and harvesting potential: A spatial analysis in a medium-sized city of Colombia. *Water, 16*(23), 3411. https://doi.org/10.3390/w16233411

Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes. (2024, 23 de octubre). Real Decreto 1085/2024, de 22 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de reutilización del agua y se modifican diversos reales decretos que regulan la gestión del agua. *Boletín Oficial del Estado*, (256), 135409-135460. Recuperado de https://www.boe.es/eli/es/rd/2024/10/22/1085

Ministry of Water Resources, River Development and Ganga Rejuvenation, Government of India. (2016). *Initiatives taken to promote rainwater harvesting and artificial recharge of groundwater*. Government of India. https://www.jalshakti-dowr.gov.in/static/uploads/2024/05/2023022050-1.pdf

OECD. (2016). *Water governance in cities*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264251090-en

OECD. (2022). *Financing a water secure future*. OECD Publishing. https://doi.org-10.1787/a2ecb261-en

Olcina Cantos, J. (2020). Ordenación del territorio para la gestión del riesgo de inundaciones: Propuestas. En M. I. López Ortiz & J. Melgarejo Moreno (Eds.), *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes* (pp. 501-516). Universidad de Alicante.

Petit, O., Dumont, A., Leyronas, S., Ballin, Q., Bouarfa, S., Faysse, N., Kuper, M., Molle, F., Alcazar, C., Durand, E., Ghoudi, R., Hubert, A., Le Visage, S., Messaoudi, I., Montginoul, M., Ndao, S., Richard-Ferroudji, A., Rinaudo, J.-D., Trottier, J., … Salgues, E. (2021). Learning from the past to build the future governance of groundwater use in agriculture. *Water International, 46*(7-8), 1037-1059. https://doi.org/10.1080/02508060.2021.2006948

Rentachintala, L. R. N. P., Reddy, M. J., & Mohapatra, P. K. (2022). Urban stormwater management for sustainable and resilient measures and practices: A review. *Water Science and Technology, 85*(4), 1120-1140. https://doi.org/10.2166/wst.2022.017

Ross, A. (2022). Benefits and costs of managed aquifer recharge: Further evidence. *Water, 14*(20), 3257. https://doi.org/10.3390/w14203257

Salas Salinas, M. A., & Jiménez Espinosa, M. (2004). *Inundaciones*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. ISBN 970-628-870-8. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/06/INUNDACIONES_CENAPRED.pdf

Sapkota, M., Arora, M., Malano, H., Moglia, M., Sharma, A. K., George, B., & Pamminger, F. (2015). An overview of hybrid water supply systems in the context of urban water management: Challenges and opportunities. *Water, 7*(1), 153-174. https://doi.org/10.3390/w7010153

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2009, 18 de agosto). *Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua*. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5105754

Sharma, S. K., & Kennedy, M. D. (2017). Soil aquifer treatment for wastewater treatment and reuse. *International Biodeterioration & Biodegradation, 119*, 671-677. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.013

Sufyan, M., Martelli, G., Teatini, P., Cherubini, C., & Goi, D. (2024). Managed aquifer recharge for sustainable groundwater management: new developments, challenges, and future prospects. *Water, 16*(22), 3216. https://doi.org/10.3390/w16223216

Unesco. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing water*. Unesco. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751

Unesco. (2022). *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible*. Unesco. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721

UN–Water. (2021). *Summary progress update 2021: SDG 6—Water and sanitation for all*. United Nations. https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-all

UN–Water. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partner-*

ships and cooperation for water. Unesco. https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023

United Nations. (2021). *The Sustainable Development Goals Report 2021*. United Nations. https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/

World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064

Yannopoulos, S., Giannopoulou, I., & Kaiafa-Saropoulou, M. (2019). Investigation of the current situation and prospects for the dev8elopment of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. *Water, 11*(10), 2168. https://doi.org/10.3390/w11102168

Zhang, H., Xu, Y., & Kanyerere, T. (2020). A review of the managed aquifer recharge: Historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 118*, 102887. https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887