DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 122-132

Propuesta conceptual de captación pluvial para un parque urbano en Pachuca

Conceptual Rainwater Harvesting Proposal for an Urban Park in Pachuca

J.J. Montes-Serrano[a], H.I. Navarro-Gómez[b, *], V. Volpi-León[a], E. Pérez-Isidro[b]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Cuerpo Académico de Ingeniería Civil Forense, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

Se formuló una propuesta conceptual de manejo del agua pluvial para el parque Jardín Hombres Ilustres, en Pachuca de Soto, Hidalgo, orientada a apoyar el riego de las áreas verdes. La superficie del parque se delimitó en 18,200 m², de los cuales 15,000 m² se consideraron hidráulicamente conectados al sistema. Con un coeficiente de escurrimiento ponderado de 0.482 y eventos de diseño de 5, 10 y 25 años, se estimaron volúmenes potenciales de escurrimiento de 469.95, 592.86 y 759.15 m³ y caudales pico de 100.42, 120.50 y 140.58 L/s, respectivamente. La configuración incluye diez módulos lineales de infiltración con 199.50 m de longitud total y 27.93 m³ de almacenamiento estático en vacíos, una zanja principal de conducción de 0.30 m de ancho y 0.45 m de profundidad total, un estanque impermeable E-01 con volumen útil conceptual de 600 m³ y superficies de concreto permeable. La sección de conducción presenta una capacidad preliminar de aproximadamente 179.8 L/s, superior al caudal de revisión de 25 años bajo los parámetros adoptados. La maqueta se consideró únicamente un recurso demostrativo y no una validación experimental. La propuesta establece una ruta técnica de predimensionamiento, aunque requiere validación de la infiltración, la topografía, la operación y el desempeño constructivo en campo.

Palabras clave: Captación de agua pluvial; parques urbanos; infraestructura verde; desarrollo de bajo impacto; riego

Abstract

A conceptual stormwater management proposal was developed for Jardín Hombres Ilustres Park in Pachuca de Soto, Hidalgo, to support irrigation of its green areas. The park area was delineated as 18,200 m², of which 15,000 m² were considered hydraulically connected to the proposed system. Using a weighted runoff coefficient of 0.482 and 5-, 10-, and 25-year design events, potential runoff volumes of 469.95, 592.86, and 759.15 m³ and peak discharges of 100.42, 120.50, and 140.58 L/s were estimated, respectively. The conceptual configuration comprises ten linear infiltration modules with a total length of 199.50 m and 27.93 m³ of static void storage, a main conveyance trench 0.30 m wide and 0.45 m deep, an impermeable E-01 storage pond with a conceptual useful volume of 600 m³, and pervious-concrete surfaces. The conveyance section provides a preliminary capacity of approximately 179.8 L/s, which exceeds the 25-year review discharge under the adopted parameters. The physical mock-up was treated only as a demonstrative representation and not as experimental validation. The proposal therefore provides a technically traceable preliminary design route, while field validation of infiltration, topography, operation, and constructability remains necessary.

Keywords: Rainwater harvesting; urban parks; green infrastructure; low-impact development; irrigation

1. Introducción

La gestión del agua en las ciudades se ha convertido en un reto técnico y ambiental de primer orden debido al crecimiento urbano, la expansión de superficies impermeables y la presión simultánea sobre el abastecimiento, el drenaje pluvial y la calidad del espacio público (Ferdowsi et al., 2024).

En ese contexto, las tecnologías de bajo impacto y los enfoques de manejo pluvial descentralizado han cobrado mayor relevancia porque permiten retener, infiltrar, conducir y aprovechar el agua de lluvia con una lógica más cercana al funcionamiento hidrológico natural (Addo-Bankas et al., 2024).

Estudios recientes han mostrado que estas estrategias pueden mejorar el manejo del agua en áreas urbanas, contribuir a la recuperación del ciclo hidrológico y disminuir las afectaciones asociadas al escurrimiento superficial y al anegamiento urbano (Kim et al., 2024; Xu, 2024).

Dentro de ese marco, los parques urbanos representan espacios estratégicos para incorporar soluciones de captación y manejo de la lluvia, ya que, además de su función recreativa y paisajística, pueden integrarse a esquemas de infraestructura verde con capacidad para infiltrar, almacenar y redistribuir la lluvia. Esta perspectiva es especialmente pertinente en ciudades con escasez hídrica, donde el mantenimiento de las áreas verdes compite con otros usos prioritarios del agua.

*Autor para la correspondencia: humberto_navarro@uaeh.edu.mx
Correos electrónicos: mo436056@uaeh.edu.mx (Jonathan Jair Montes Serrano), humberto_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto Iván Navarro Gómez), volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi León), eber_perez@uaeh.edu.mx (Eber Pérez Isidro).

Historial del manuscrito: recibido el 25/05/2026, última versión revisada recibida el 31/08/2026, aceptado el 17/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14Especial3.17976

En México, investigaciones recientes sobre sistemas de captación pluvial han señalado que estas soluciones pueden aportar beneficios no solo técnicos, sino también sociales, al fortalecer la autonomía hídrica y favorecer modelos urbanos más sostenibles (Castelán-Cabañas et al., 2024).

A esta condición se suma que la urbanización acelerada y el incremento de eventos de lluvia intensa han obligado a replantear los criterios de resiliencia pluvial en las ciudades.

La evidencia reciente muestra que la combinación de infraestructura verde, lineamientos de adaptación climática y estrategias de aprovechamiento del agua pluvial constituye una vía pertinente para fortalecer la respuesta urbana frente a escenarios de mayor variabilidad hidrometeorológica (Fereshtehpour & Najafi, 2025).

Desde esa perspectiva, los parques urbanos pueden concebirse no solo como espacios de convivencia social, sino también como unidades funcionales de gestión hídrica capaces de contribuir a la regulación del escurrimiento y al uso eficiente del agua de lluvia.

En Pachuca de Soto, Hidalgo, el aprovechamiento del agua pluvial en parques puede constituir una alternativa complementaria para reducir parcialmente la dependencia de las fuentes convencionales de riego. No obstante, su aplicación depende de la precipitación local, de las superficies aportantes, de la topografía, de la capacidad de infiltración del suelo, del drenaje existente y de la demanda hídrica de las áreas verdes.

En particular, las zanjas de infiltración y el concreto permeable destacan como tecnologías con potencial complementario: las primeras favorecen la conducción e infiltración controladas del agua hacia el subsuelo, mientras que el segundo permite reducir los escurrimientos superficiales y facilitar el paso del agua hacia capas inferiores.

Los estudios citados muestran que las medidas de bajo impacto pueden modificar el escurrimiento y favorecer la infiltración; sin embargo, sus resultados no son directamente transferibles al parque sin verificar las condiciones físicas e hidrológicas del sitio (Kim et al., 2024; Xu et al., 2024).

Con base en lo anterior, el presente estudio formula una estrategia conceptual de manejo de agua pluvial para un parque urbano de Pachuca de Soto, integrando los procesos de captación, conducción, infiltración, almacenamiento y reúso para riego. El alcance de esta investigación se delimita al nivel de propuesta conceptual y de diseño preliminar. Sin embargo, la ingeniería a nivel de proyecto ejecutivo, así como la validación experimental y la evaluación cuantitativa del desempeño hidráulico, constituyen etapas subsecuentes que quedan abiertas al desarrollo de futuras fases de investigación y aplicación técnica.

En el caso de Pachuca de Soto, la estacionalidad de la lluvia, la presión sobre el uso urbano del agua y la necesidad de conservar áreas verdes públicas justifican explorar soluciones de captación pluvial a escala de parque. Esta escala permite evaluar alternativas de bajo impacto que no sustituyen la infraestructura hidráulica municipal, pero sí pueden complementar el mantenimiento paisajístico y reducir parcialmente la dependencia de las fuentes convencionales de riego.

El valor principal de este trabajo radica en integrar tecnologías existentes en un sistema funcional continuo, adaptado a las condiciones espaciales de un parque urbano específico. El objetivo fue formular una propuesta conceptual de manejo del agua pluvial para el parque Jardín Hombres Ilustres y definir los criterios y los cálculos requeridos antes de pasar a la etapa de diseño ejecutivo. La metodología es transferible a otros parques, aunque las dimensiones y capacidades deberán recalcularse para cada sitio.

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño y alcance del estudio

La investigación se desarrolló como un estudio aplicado, descriptivo-propositivo y de alcance conceptual. Su producto principal fue una configuración de diseño; por tanto, no se consideró una validación hidráulica, constructiva ni experimental.

El estudio se centró en la formulación técnica de un sistema integrado de captación, conducción, filtración, infiltración y almacenamiento de agua de lluvia para apoyar el mantenimiento de las áreas verdes.

El enfoque metodológico integró la caracterización del sitio, la estimación del escurrimiento potencial, la selección funcional de componentes, su representación espacial y la identificación de verificaciones pendientes. Esta delimitación es consistente con estudios que separan la planeación conceptual de la comprobación cuantitativa posterior del desempeño (Kim et al., 2024; Taheri et al., 2025).

2.2 Caso de estudio y criterios de selección del sitio

La unidad de análisis fue el parque Jardín Hombres Ilustres, ubicado en Pachuca de Soto, Hidalgo.

La ubicación del parque corresponde a Av. Revolución s/n, Col. Periodistas, C.P. 42060, Pachuca de Soto, Hidalgo, México, en el polígono delimitado por Av. Revolución, Vicente Segura y Daniel Cerecedo.

Coordenadas de referencia del parque: 20°07′21″ N, 98°44′08″ O; sistema de referencia WGS84/ITRF08. La delimitación geométrica se realizó mediante cartografía del INEGI y con apoyo de imágenes satelitales.

La superficie total del parque fue delimitada en 18,200 m². Se identificaron 3,200 m² de áreas verdes periféricas con infiltración local no conectadas a la red propuesta, por lo que el área efectiva de aportación se estableció en 15,000 m². Esta superficie comprende 4,550 m² de coberturas impermeables y 10,450 m² de áreas verdes internas hidráulicamente conectadas.

Para el predimensionamiento se definieron diez áreas tributarias internas asociadas a los módulos M-01 a M-10, con una longitud total de módulos de 199.50 m.

Tabla 1. Áreas tributarias internas y longitud de los módulos.

Módulo	Sector	A imp. (m^2)	A perm. (m^2)	Ai (m^2)	Li (m)
M-01	Noroccidente	380	870	1,250	18.5
M-02	Nororiente	450	1,030	1,480	22.0
M-03	Eje norte	310	710	1,020	15.0
M-04	Oriente superior	410	940	1,350	20.0
M-05	Oriente inferior	400	920	1,320	19.0
M-06	Poniente superior	420	960	1,380	20.5
M-07	Poniente inferior	370	850	1,220	18.0
M-08	Surponiente	430	990	1,420	21.0
M-09	Suroriente	440	1,010	1,450	21.5
M-10	Plazoleta/kiosco	940	2,170	3,110	24.0
TOTAL	—	4,550	10,450	15,000	199.5

La pendiente media y las direcciones de flujo se obtuvieron de manera preliminar a partir del Modelo Digital de Elevación CEM 3.0 del INEGI y se representaron en el plano conceptual. La dirección dominante del escurrimiento local se interpreta como de noreste a suroeste, hacia el sistema urbano asociado al Río de las Avenidas; estos valores deberán verificarse mediante un levantamiento topográfico de campo.

La unidad edafológica dominante del contexto regional de Pachuca se identificó como Feozem háplico (Fh) con base en el Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, escala 1:250 000, Serie II, carta F14-11 (INEGI, 2007). Esta cartografía se emplea únicamente como referencia regional y no sustituye la caracterización geotécnica del parque.

Para el predimensionamiento, se adoptó una tasa de infiltración teórica de referencia de 25 mm/h y, de manera conservadora, una tasa de diseño de 12.5 mm/h, aplicando un factor correctivo de 2. Debido a que el suelo urbano puede presentar compactación, rellenos y alteraciones del perfil, estos valores no se interpretan como mediciones del sitio. La tasa de infiltración deberá determinarse en campo en una fase posterior, por ejemplo, mediante ASTM D3385.

Con la tasa de diseño de 12.5 mm/h y una profundidad de almacenamiento en vacíos de 0.175 m, el tiempo teórico de vaciado es aproximadamente 14 h, inferior al criterio conservador de 48 h empleado para el predimensionamiento (Clar et al., 2004).

El drenaje existente se reconoce como una red municipal con elementos de captación en las vialidades colindantes. El nivel freático, los estratos restrictivos y la capacidad real de infiltración deberán verificarse antes de cualquier diseño ejecutivo.

2.3 Selección de tecnologías de bajo impacto

La propuesta se estructuró en cuatro componentes:

i) Módulos lineales de infiltración en áreas verdes.
ii) Zanjas de conducción hacia el almacenamiento.
iii) Concreto permeable en superficies seleccionadas.
iv) Estanque impermeable destinado al riego.

La selección respondió a la separación de funciones hidráulicas. Los módulos de infiltración y el concreto permeable se orientaron a reducir el escurrimiento y favorecer el paso del agua al subsuelo; la zanja de conducción se destinó a transportar los excedentes; y el estanque se reservó exclusivamente para la regulación, el almacenamiento temporal y el reúso.

Lekuona-Orkaizagirre et al. (2025) evaluaron en campo un sistema combinado de pavimento permeable y tanque pluvial y documentaron disminuciones de la turbidez y de los sólidos suspendidos después del paso por el pavimento. En contraste, Kong et al. (2025) analizaron, mediante una lluvia simulada a escala de laboratorio, la capacidad de un pavimento permeable para retener microplásticos. Este último estudio respalda el potencial del pavimento para retener partículas, pero no constituye evidencia de desempeño en campo para sólidos suspendidos convencionales. En conjunto, estos antecedentes respaldan el uso del concreto permeable como componente complementario del sistema, aunque su desempeño específico deberá verificarse en las condiciones del parque.

2.4 Variables y criterios de diseño

Las variables de diseño se agruparon en:

a) Hidrológicas: precipitación, intensidad, área aportante, coeficiente de escurrimiento y caudal pico.
b) Geotécnicas: tasa de infiltración, nivel freático, estratos restrictivos y estabilidad del terreno.
c) Geométricas: ancho, profundidad, longitud, pendiente y volumen útil.
d) Operativas: pretratamiento, acceso, limpieza, tiempo de vaciado y control de excedencias.

Durante la fase de predimensionamiento, las variables métricas se trataron como módulos geométricos preliminares para establecer la integración y distribución espacial del sistema.

Esta definición geométrica inicial representa la primera aproximación del diseño y sienta las bases para el cálculo hidráulico definitivo, el cual integrará los siguientes parámetros operativos: Volumen de diseño, la capacidad de infiltración, la porosidad del medio granular y el tiempo admisible de vaciado.

Para los módulos lineales de infiltración se conservó una sección conceptual de 0.80 m de ancho y 0.50 m de profundidad total. La geometría final no se considera universal: debe comprobarse con el volumen tributario, la tasa de infiltración, la porosidad del medio y el tiempo de vaciado.

La capacidad estática de almacenamiento en vacíos se calculó mediante $V_{cap,i} = L_i \cdot b \cdot h \cdot n_v$, donde Li es la longitud real del módulo, b=0.80 m, h=0.50 m y nv=0.35.

Con estos valores, la capacidad unitaria es 0.14 m^3 por metro lineal.

El coeficiente de escurrimiento ponderado del área conectada se calculó como:

$$C_p = [(0.90)(4{,}550) + (0.30)(10{,}450)] / 15{,}000 = 0.482$$

Para los cálculos globales se utilizó Cp=0.482. Cuando se requiera evaluar un área tributaria individual, puede calcularse Ci=[0.90·Aimp,i + 0.30·Aperm,i]/Ai.

Los diez módulos reales del plano suman 199.50 m de longitud acumulada; su capacidad estática se obtuvo directamente de la geometría representada.

$$V_{cap,i} = L_i \cdot b \cdot h \cdot n_v$$

$$b = 0.80 \text{ m}$$
$$h = 0.50 \text{ m}$$
$$n_v = 0.35$$

$$\text{Capacidad unitaria} = 0.80 \cdot 0.50 \cdot 0.35 = 0.14 \text{ m}^3/\text{m}$$

Tabla 2. Capacidades de almacenamiento por cada módulo.

Módulo	Li (m)	Vcap,i (m³)
M-01	18.5	2.59
M-02	22.0	3.08
M-03	15.0	2.10
M-04	20.0	2.80
M-05	19.0	2.66
M-06	20.5	2.87
M-07	18.0	2.52
M-08	21.0	2.94
M-09	21.5	3.01
M-10	24.0	3.36
TOTAL	199.5	27.93

La capacidad de almacenamiento temporal de los módulos se determinó a partir de su longitud real en planta y de la porosidad del reservorio granular. Para una sección de 0.80 m de ancho, 0.50 m de profundidad y, con n_v=0.35, la capacidad unitaria es 0.14 m³ por metro lineal. Los diez módulos suman 199.50 m y proporcionan una capacidad estática total de 27.93 m³. Este volumen representa almacenamiento en vacíos y no sustituye el proceso de infiltración concurrente durante la tormenta.

M-10 corresponde al sector kiosco/plazoleta; E-01 es un estanque independiente e impermeable.

Para un predimensionamiento conservador se compara el volumen de cada evento con la capacidad estática total de los módulos (27.93 m³). Este cálculo no descuenta la infiltración concurrente y, por ello, sobreestima de manera conservadora el volumen que podría alcanzar la red de conducción.

Tabla 3. Balance estático conservador para el predimensionamiento del estanque.

Tr (años)	V evento (m³)	Vcap módulos (m³)	Residual (m³)	Vu E-01 (m³)	Demasía (m³)
5	469.95	27.93	442.02	600	0
10	592.86	27.93	464.93	600	0
25	759.15	27.93	731.22	600	131.22

El estanque E-01 se definió como un elemento impermeable destinado a la regulación y el almacenamiento temporal. Como predimensionamiento conceptual, se adoptó un volumen útil de 600 m³, redondeado por encima del volumen residual estático del evento operativo de 10 años (564.93 m³). Para el evento de revisión de 25 años, el residual conservador es de 731.22 m³, por lo que se requiere una demasía controlada de aproximadamente 131.22 m³. El balance no descuenta la infiltración concurrente durante la tormenta y, por ello, es deliberadamente conservador; deberá ajustarse con mediciones de infiltración, la condición inicial del estanque y la modelación hidráulica.

Con la tasa preliminar de diseño de 12.5 mm/h, el tiempo teórico de vaciado de la profundidad de almacenamiento en vacíos (0.175 m) es de aproximadamente 14 h, inferior al criterio conservador de 48 h.

Cálculo hidráulico de la zanja mediante Manning

Se adopta el de 10 años como evento operativo y el de 25 años como evento de revisión. Para la zanja principal se obtuvieron Q10=120.50 L/s y Q25=140.58 L/s.

Para la comprobación hidráulica se consideró una sección rectangular con ancho b=0.30 m, pendiente longitudinal S0=0.01 (1%) y revestimiento de concreto con coeficiente de Manning nM=0.013.

$$S_0 = 0.01$$

$$H = 0.45\ m$$

Para Q25=140.58 L/s, la solución de Manning proporciona un tirante normal aproximado y=0.286 m. Con un borde libre mínimo de 0.10 m, la profundidad requerida es aproximadamente 0.386 m; se adopta H=0.45 m como profundidad total preliminar.

Como verificación de capacidad, con y=0.35 m (dejando 0.10 m de borde libre en una sección total de 0.45 m):

$$A = by$$
$$A = 0.30 \cdot 0.35 = 0.105 \text{ m}^2$$
$$P = 0.30 + 2(0.35) = 1.00 \text{ m}$$
$$R = A/P = 0.105 \text{ m}$$

La ecuación de Manning es:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}$$

Verificación de capacidad con tirante de 0.35 m:

$$Q = \frac{1}{0.013}(0.105)(0.105)^{\frac{2}{3}}(0.01)^{\frac{1}{2}}$$

Para el caudal de revisión Q25, el tirante normal calculado es:

$$y \approx 0.286 \text{ m}$$

La sección 0.30 × 0.45 m presenta una capacidad aproximada de 179.8 L/s; dado que 179.8 L/s > 140.58 L/s, satisface preliminarmente el evento de revisión de 25 años bajo los parámetros adoptados.

Se considera un borde libre mínimo de:

$$BL = 0.10 \text{ m}$$

La profundidad hidráulica requerida es:

$$Hreq = y + BL$$
$$Hreq = 0.286 + 0.10 = 0.386 \text{ m} \approx 0.39 \text{ m};$$

se adopta H = 0.45 m.

Comprobación de la velocidad para Q25, el área hidráulica correspondiente al tirante normal es:

$$A = b \cdot y$$
$$A = 0.30 \cdot 0.286$$
$$A = 0.0858 \text{ m}^2$$

La velocidad media se obtiene mediante:

$$V = Q/A$$
$$V = 0.14058/0.0858 \approx 1.64 \text{ m/s}$$

Los medios de infiltración deberán especificarse como agregados limpios y lavados, con porosidad determinada o documentada, pretratamiento para sedimentos y una transición granulométrica o geotextil que evite la migración de finos sin sellar la superficie de infiltración.

La sección conceptual corregida se muestra en la Figura 1.

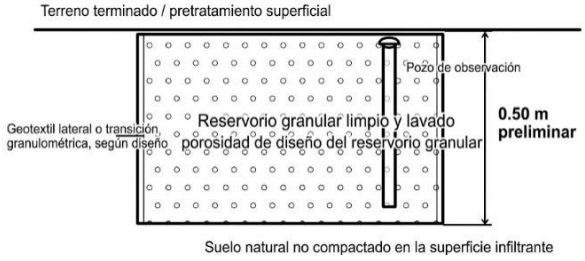


Figura 1. Sección conceptual corregida del módulo lineal de infiltración para áreas ajardinadas.

Fuente: Elaboración propia. Dimensiones preliminares sujetas a verificación hidrológica y geotécnica.

Las guías de diseño de la U.S. EPA establecen que la profundidad admisible y el volumen de una práctica infiltrante deben relacionarse con la tasa de infiltración, la porosidad del reservorio y el tiempo de vaciado; por ello, una medida geométrica no puede transferirse como un valor universal entre sitios (Clar et al., 2004).

La Figura 2 presenta la sección conceptual corregida de la zanja principal de conducción, con un ancho de 0.30 m y una profundidad total de 0.45 m.

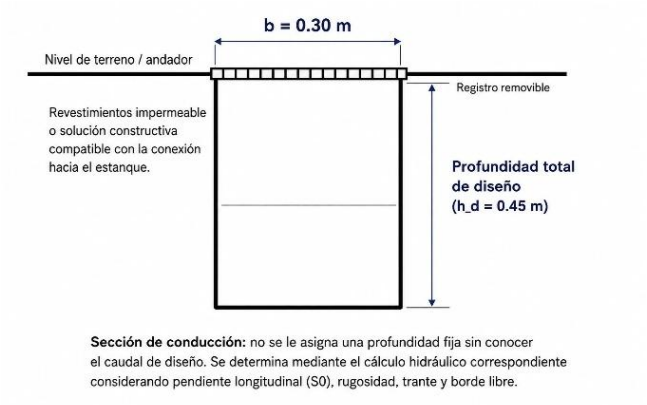


Figura 2. Sección conceptual corregida de la zanja de conducción hacia el estanque.

Fuente: Elaboración propia. Dimensiones de predimensionamiento sujetas a verificación topográfica y constructiva.

2.5 Criterios para captación y aprovechamiento del agua pluvial

El sistema se concibió para recibir el escurrimiento de las áreas tributarias internas, almacenar temporalmente una fracción en los módulos de infiltración y conducir los excedentes al estanque E-01. La distribución conceptual de A1-A10, M-01 a M-10, entradas, flujo, estanque y demasía se muestra en la Figura 3.

El estanque E-01 se definió exclusivamente como elemento impermeable de regulación y almacenamiento temporal para reúso. Su volumen útil conceptual se fijó en 600 m³ para cubrir el residual estático conservador del evento operativo de 10 años; el evento de revisión de 25 años requiere una demasía controlada.

Para estimar de manera preliminar el potencial de apoyo al riego, se comparó la disponibilidad pluvial climatológica de marzo-mayo con una demanda bruta de paisaje bajo un escenario moderado.

Mundo-Molina (2014) reportó valores mensuales de ETo para Pachuca que suman aproximadamente 379.07 mm de marzo a mayo. Como escenario de referencia, se adoptó un coeficiente de paisaje KL=0.50, conforme al método del coeficiente de paisaje de Costello et al. (2000), aclarando que no constituye una calibración local para el parque.

Con Averde = 13,650 m², la demanda bruta preliminar del paisaje es de aproximadamente 2,587.15 m³ para marzo-mayo.

Con la precipitación climatológica acumulada P=27.4 mm, A=15,000 m² y Cp=0.482, el volumen potencial capturable es de aproximadamente 198.10 m³.

La relación entre el volumen potencial capturable y la demanda bruta estimada es de aproximadamente 7.66%. Este indicador no constituye un déficit neto de riego, porque no descuenta la precipitación efectiva sobre la vegetación ni incorpora la eficiencia real del sistema de riego.

Para la operación conceptual se considera un pretratamiento mediante desarenado y retención de hojas y sedimentos antes del estanque, así como una salida de riego y una demasía controlada.

La literatura sobre captación para riego urbano muestra que el almacenamiento debe analizarse conjuntamente con la demanda hídrica y la variabilidad de la precipitación, no únicamente a partir de la capacidad geométrica del depósito (Li et al., 2025; Cauteruccio y Lanza, 2022).

2.6 Herramientas de representación y modelado

La propuesta se representó mediante herramientas digitales de dibujo, modelado y visualización, específicamente AutoCAD, Revit y Twinmotion. Estas herramientas se emplearon para generar plantas, alzados, esquemas de distribución y vistas tridimensionales del sistema propuesto, con el fin de verificar su integración espacial en el parque y comunicar su configuración técnica.

Su uso respondió a la necesidad de traducir los criterios de diseño a una solución espacialmente coherente y visualmente interpretable, condición indispensable en propuestas de infraestructura urbana con componentes superficiales y subsuperficiales articulados.

2.7 Procedimiento metodológico

El procedimiento se organizó en seis etapas:

1) Delimitación del problema y del alcance conceptual;
2) Caracterización geométrica, hidrológica y funcional del parque;
3) Estimación del volumen de escurrimiento y, cuando proceda, del caudal pico;
4) Selección y separación funcional de los componentes;
5) Representación digital de la configuración;
6) Elaboración de una maqueta demostrativa, sin extrapolación hidráulica.

La caracterización geométrica y la cuantificación hidrológica se completaron a nivel de predimensionamiento con áreas tributarias, coeficiente ponderado y eventos de diseño. La maqueta se utilizó únicamente para comunicar la disposición de los componentes y no sustituyó las mediciones de campo ni de laboratorio.

La secuencia metodológica distingue el producto efectivamente logrado una propuesta conceptual con predimensionamiento de las verificaciones requeridas para convertirla en proyecto ejecutivo.

2.8 Descripción y alcance de la maqueta demostrativa

La maqueta se utilizó exclusivamente como recurso de representación espacial del arreglo conceptual. Debido a que no se conservan registros fotográficos, bitácora de construcción ni mediciones experimentales reproducibles, no se empleó para validar el desempeño hidráulico, la infiltración, la filtración ni la remoción de contaminantes.

Estas variables deberán evaluarse mediante un protocolo experimental específico en una etapa posterior.

2.9 Tratamiento de la información

El tratamiento de la información fue descriptivo y de predimensionamiento.

Se integraron la revisión técnica, la cartografía, los criterios de diseño, la cuantificación hidrológica y la representación espacial; las validaciones de campo permanecen pendientes.

No se realizaron pruebas normalizadas de campo ni de laboratorio para medir la infiltración, los caudales reales, la turbidez, los sólidos suspendidos, la colmatación ni el comportamiento mecánico del concreto permeable.

En consecuencia, el alcance metodológico corresponde a una propuesta conceptual con predimensionamiento hidráulico. Los cálculos presentados no constituyen una validación experimental ni un proyecto ejecutivo.

Este tipo de delimitación es coherente con estudios que distinguen entre el diseño estratégico de sistemas de captación pluvial y su posterior validación hidráulica o de sostenibilidad mediante indicadores específicos (Li et al., 2025; Castelán-Cabañas et al., 2024).

2.10 Estimación preliminar de captación pluvial

La caracterización climatológica se basó en la normal 1981-2010 de la estación Pachuca (Observatorio), clave 13022, y los eventos de diseño se obtuvieron de la cartografía de isoyetas de la SICT para Hidalgo.

Estación de referencia: Pachuca (Observatorio), clave CONAGUA/SMN 13022.
Coordenadas: 20°05′16″ N, 98°44′59″ O.
Distancia aproximada al parque: 4.3 km.
Periodo climatológico de referencia: 1981-2010.

La normal publicada se utilizó como referencia climatológica; no se reconstruyó ni completó una serie diaria propia para el análisis de extremos.

Fuente climatológica: SMN/CONAGUA.
Fuente de eventos de diseño: isoyetas SICT 2024.

El volumen potencial de escurrimiento se calculó como $V = (P/1000) \cdot A \cdot Cp$, donde P es la precipitación máxima en 24 h, A el área efectiva conectada y Cp el coeficiente ponderado.

El caudal pico se estimó mediante $Qp = Cp \cdot i \cdot A/3600$, donde Qp está en L/s, i en mm/h y A en m². Para la intensidad, se adoptó una duración cartográfica de 30 min; este intervalo no corresponde ni al tiempo de concentración medido ni al calculado.

Parámetros Fijos del Sitio:

Área aportante

El área total del parque es de 18,200 m²: 4,550 m² corresponden a superficies impermeables y 13,650 m² a superficies verdes. De estas últimas, 3,200 m² se consideran periféricas y no conectadas, por lo que el área efectiva de aportación es 15,000 m².

Las diez áreas tributarias internas A1-A10 se delimitaron en el plano conceptual y se asociaron a los módulos M-01 a M-10; no se consideró una cuenca regional externa porque no se identificó un cauce superficial que aportara directamente al parque.

Tabla 4. Eventos de diseño adoptados a partir de las isoyetas SICT para Hidalgo.

Tr (años)	P24 (mm)	i 30 min (mm/h)	V (m^3)	Qp (L/s)
5	65	50	469.95	100.42
10	82	60	592.86	120.50
25	105	70	759.15	140.58

Los valores P24 e i(30 min) se leyeron de las cartas de isoyetas de altura de lluvia máxima en 24 h e intensidad-duración-periodo de retorno publicadas por la SICT para Hidalgo. Para Pachuca se adoptaron P24=65, 82 y 105 mm e intensidades aproximadas i(30 min) = 50, 60 y 70 mm/h para periodos de retorno de 5, 10 y 25 años, respectivamente. Con A=15,000 m² y Cp=0.482, los volúmenes potenciales son 469.95, 592.86 y 759.15 m³, y los caudales pico son 100.42, 120.50 y 140.58 L/s.

3. Resultados y discusión

3.1 Configuración propuesta del sistema

La propuesta conceptual integró cuatro componentes:

i) Módulos lineales de infiltración en áreas ajardinadas.
ii) Zanjas de conducción hacia el almacenamiento.
iii) Un estanque impermeable para el agua destinada al riego.
vi) Concreto permeable en andadores o superficies seleccionadas.

En términos geométricos, se mantuvo una sección preliminar de 0.80 m × 0.50 m en los módulos de infiltración. Para la zanja principal de conducción se adoptó una sección de 0.30 m de ancho y 0.45 m de profundidad total, verificada preliminarmente mediante la ecuación de Manning para el evento de revisión de 25 años.

El estanque se definió como un elemento impermeable y se eliminó la propuesta de construirlo con concreto permeable. También se retiró la dosificación numérica del concreto, ya que no fue fabricada ni ensayada. En una etapa posterior, el proporcionamiento y la verificación del concreto permeable deberán basarse en ACI PRC-522-23 y considerar, según el alcance del proyecto, ASTM C1688/C1688M, ASTM C1754/C1754M y ASTM C1701/C1701M (ACI Committee 522, 2023; ASTM International, 2023, 2025, 2026).

Desde el punto de vista funcional, esta configuración permitió plantear una secuencia lógica de manejo del agua pluvial: captación, conducción, filtración, infiltración y almacenamiento.

Los componentes se sintetizan en la Tabla 5 según su función, geometría preliminar y condición de validación. Los valores representan un predimensionamiento y deberán verificarse antes de su aplicación constructiva.

La articulación entre pavimentos permeables, dispositivos infiltrantes y almacenamiento puede aportar funciones complementarias, pero el desempeño depende del dimensionamiento, de las condiciones del suelo, del control de sedimentos y del mantenimiento (Bonciarelli et al., 2025; Franco et al., 2025; Huang et al., 2025).

Tabla 5. Componentes técnicos del sistema propuesto.

Componente	Función	Dimensión / valor	Resultado preliminar	Estado
Módulos de infiltración	Almacenar temporalmente e infiltrar	10 módulos; 199.50 m; 0.80×0.50 m	Vcap total = 27.93 m^3	Predimensionamiento; infiltración de campo pendiente
Zanaja principal	Conducir excedentes hacia E-01	0.30×0.45 m; S0=1%	Qcap ≈ 179.8 l/s > Q25 = 140.58 l/s	Parámetros preliminares
Estanque E-01	Regulación y almacenamiento temporal	Vu conceptual = 600 m^3	Cubre residual Tr = 10; demasía Tr = 25	Impermeable; modelación posterior
Concreto permeble	Reducir escurrimiento en áreas seleccionadas	Área/epesor por definir	Componente coceptual	Mezcla/pavimento pendientes de ensayo

Fuente: Elaboración propia con base en el diseño conceptual del sistema de aprovechamiento pluvial para el parque Jardín Hombres Ilustres.

La Tabla 5 muestra una configuración integrada de infiltración, conducción, almacenamiento y pavimento permeable. Los módulos, la zanja y el estanque cuentan con valores de predimensionamiento; permanecen pendientes la validación de la infiltración, el levantamiento topográfico de detalle, la modelación dinámica del almacenamiento y el diseño estructural del concreto permeable.

3.2 Resultado espacial de la propuesta

El resultado espacial es un esquema de distribución conceptual que incorpora las áreas tributarias A1-A10, los módulos M-01 a M-10, las direcciones de flujo, las entradas, el estanque E-01 y la demasía del sistema.

La disposición deberá comprobarse mediante un levantamiento topográfico de campo y la verificación constructiva de las superficies aportantes y de las conexiones.

Este tipo de planteamiento es coherente con la evidencia reciente sobre LID (Low-Impact Development / desarrollo de bajo impacto) y SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems / sistemas urbanos de drenaje sostenible), en la que la eficacia del sistema no depende únicamente de un dispositivo, sino de cómo varios componentes trabajan de manera complementaria en un sitio urbano.

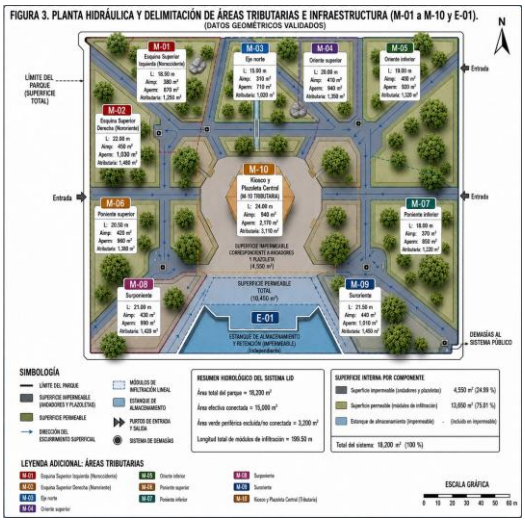


Figura 3. Planta hidráulica conceptual y delimitación de áreas tributarias e infraestructura (A1-A10, M-01 a M-10 y E-01).

Fuente: Elaboración propia con apoyo de la cartografía del INEGI y de la delimitación del SIG. La figura incluye el norte, las áreas tributarias, las direcciones de escurrimiento y la escala gráfica.



Figura 4. Relación topográfica del parque y dirección general del escurrimiento hacia el cauce receptor más cercano.

Fuente: Elaboración propia con base en la cartografía del INEGI y en el ortofoto 2026 de IMIPE, Pachuca de Soto. Sistema de referência: UTM zona 14N, datum WGS84/ITRF08.

3.3 Alcance de la maqueta demostrativa

Se construyó una maqueta demostrativa que representaba la disposición general de los componentes. Sin embargo, el modelo fue posteriormente desmontado o destruido y no se conservan registros fotográficos, bitácora de construcción ni mediciones experimentales. Por esta razón, su descripción se limita a la información proporcionada por los autores y no se utiliza como evidencia del desempeño hidráulico, de la infiltración, de la filtración ni de la retención de contaminantes.

Esto es metodológicamente honesto y congruente con el propio manuscrito, que ya establece que, sin bitácoras, mediciones y evidencia, la maqueta debe conservarse únicamente como recurso demostrativo.

3.4 Discusión del desempeño esperado

El primer resultado del estudio fue proponer que el parque se gestione como una unidad funcional capaz de captar, conducir, infiltrar y almacenar una parte del agua de lluvia. Esta reinterpretación constituye un producto de diseño conceptual y no una demostración de desempeño.

El segundo aspecto consistió en separar las funciones de infiltración, conducción y almacenamiento, evitando que el estanque impermeable se confundiera con los elementos destinados a la infiltración.

Custódio y Ghisi (2023) modelaron una cuenca residencial del sur de Brasil con HEC-HMS para evaluar el efecto del almacenamiento de agua de lluvia sobre el escurrimiento. El estudio reportó reducciones del caudal pico entre 2.7 % y 14.3 % en las subcuencas analizadas, lo que evidencia que la magnitud del efecto depende de la escala y de la configuración del área tributaria. Por ello, estos resultados constituyen un antecedente metodológico para el presente estudio.

El concreto permeable se mantuvo como componente complementario en los andadores, no como solución única ni como material del estanque. Su desempeño puede disminuir debido a la colmatación, por lo que el diseño debe incluir control de sedimentos y mantenimiento.

Chen et al. (2025) documentaron durante cuatro años una disminución del desempeño de una banqueta permeable, y Lu et al. (2024) analizaron procesos de colmatación de corto y largo plazo. Estos antecedentes justifican que el mantenimiento se incluya desde la etapa de diseño.

A partir de ello, el uso de concreto permeable en este estudio debe entenderse como una medida de apoyo al sistema general y no como un sustituto total de las zanjas infiltrantes.

Esta interpretación es congruente con revisiones recientes que destacan que el mejor desempeño urbano se obtiene cuando el pavimento permeable se integra con otros componentes de infraestructura verde y con criterios explícitos de conservación hidráulica a lo largo del tiempo (Franco et al., 2025; Bonciarelli et al., 2025).

3.5 Alcance hidrológico y ambiental de la propuesta

El alcance potencial de la propuesta no se limita al riego; los elementos infiltrantes y de almacenamiento pueden modificar localmente el escurrimiento. Sin embargo, el

presente estudio no cuantificó reducciones del caudal pico, de la recarga o del alivio a la red, por lo que dichos beneficios se plantean únicamente como hipótesis de trabajo.

La posible contribución a la recarga depende del suelo y del subsuelo, del nivel freático, de la calidad del agua y de las restricciones ambientales. Por esta razón, no debe afirmarse la recarga efectiva hasta que se realice la caracterización correspondiente.

Los estudios de Canteiro et al. (2023, 2025) muestran la relevancia de analizar la relación entre áreas verdes y acuíferos someros en contextos mexicanos, pero sus resultados no sustituyen la evaluación específica de Pachuca.

Desde una perspectiva ambiental más amplia, también resulta pertinente considerar que la captación pluvial no solo debe evaluarse por el volumen retenido, sino también por su equilibrio global entre beneficios y cargas.

Evaluaciones recientes del ciclo de vida han mostrado que estos sistemas pueden reducir los impactos en varias categorías ambientales del sistema urbano del agua, aunque su conveniencia depende del material empleado, de la operación y del contexto de uso. Esto refuerza la necesidad de que las futuras etapas del proyecto incluyan evaluación hidráulica y evaluación ambiental integrada, y no solo la verificación geométrica o conceptual (Teston et al., 2024).

3.6 Limitaciones del estudio

La principal limitación del estudio es la ausencia de validación de campo y experimental.

Aunque se realizaron estimaciones preliminares de volúmenes de escurrimiento, caudales pico, capacidad estática de los módulos y capacidad de conducción, estos resultados dependen de parámetros de predimensionamiento que deben comprobarse mediante levantamiento topográfico detallado, medición de infiltración, verificación del nivel freático y seguimiento del comportamiento bajo lluvia real.

No se midieron experimentalmente caudales, turbidez, sólidos suspendidos, eficiencia de remoción, colmatación ni desempeño estructural del concreto permeable.

En consecuencia, los cálculos presentados constituyen una base de diseño conceptual y no una validación hidráulica o constructiva definitiva.

Tabla 6. Alcance y validación pendiente del sistema propuesto.

Elemento	Alcance logrado	Validación pendiente	Implicación
Captación pluvial	V y Q para Tr = 5, 10, 25	Validar lecturas cartográficas y lluvia real	Cuantificación preliminar
Infiltración	Módulos y capacidad estática predimensionados	Medir infiltración in situ y nivel freático	No confundir vacíos con infiltración real
Conducción	Sección 0.30×0.45 m verificada con Manning	Confirmar S0 y acabado constructivo	Predimensionamiento hidráulico
Almacenamiento	E-01: Vuconceptual 600 m^3	Modelación dinámica, condición inicial y demasías	Regulación temporal
Maqueta	Representación demostrativa	Nuevo prototipo para validación experimental	No usar como evidencia de desempeño
Concreto permeable	Componente conceptual	Diseño de mezcla, vacíos, infiltración, resistencia y colmatación	Validación futura

Fuente**:** Elaboración propia, con base en el alcance metodológico del estudio y en las necesidades de validación hidráulica, ambiental y constructiva del sistema.

La Tabla 6 confirma que el manuscrito corresponde a una propuesta conceptual.

La etapa posterior deberá incluir mediciones de infiltración, levantamiento topográfico detallado, verificación del nivel freático, evaluación de la calidad del agua, modelación dinámica del estanque y seguimiento del mantenimiento necesario para conservar la funcionalidad del sistema.

Esta distinción evita presentar el esquema como un proyecto ejecutivo. La validación posterior deberá incluir el comportamiento ante lluvia real, la capacidad efectiva de infiltración, la calidad del agua, la operación de demasías, el desempeño del almacenamiento y la variación temporal de los componentes.

Incluso estudios recientes sobre la modelación de inundaciones urbanas han mostrado que la precisión geométrica del terreno puede alterar significativamente la estimación de las áreas inundadas y las profundidades de flujo, lo que incide directamente en la confiabilidad del diseño (Zandsalimi et al., 2024; Rostamzadeh et al., 2025).

En conjunto, el objetivo se cumplió en la etapa de formulación conceptual y de representación espacial, pero no en la de validación hidráulica.

La principal fortaleza fue integrar componentes con funciones diferenciadas y establecer una cadena de cálculo trazable. La principal limitación es la ausencia de validación topográfica, geotécnica e hidráulica de campo y de evidencia experimental reproducible.

Ese tránsito de la propuesta conceptual a la validación cuantitativa coincide con la ruta seguida por investigaciones recientes sobre infraestructura pluvial urbana y pavimentos permeables (Huang et al., 2025; Lekuona-Orkaizagirre et al., 2025; Franco et al., 2025).

4. Conclusiones

El estudio permitió estructurar una propuesta conceptual de manejo pluvial para el parque Jardín Hombres Ilustres mediante la integración funcional de la infiltración distribuida, la conducción, el almacenamiento temporal y las superficies permeables. La delimitación de 15,000 m² de área efectiva conectada y el uso de un coeficiente de escurrimiento ponderado de 0.482 permitieron cuantificar, de forma preliminar, eventos de 5, 10 y 25 años. Con P24 de 65, 82 y 105 mm se estimaron volúmenes potenciales de 469.95, 592.86 y 759.15 m³; con intensidades de 50, 60 y 70 mm/h durante 30 min se obtuvieron caudales pico de 100.42, 120.50 y 140.58 L/s. Los diez módulos de infiltración suman 199.50 m de longitud y una capacidad estática de 27.93 m³ en sus vacíos. La zanja principal, de 0.30 m de ancho y 0.45 m de profundidad total, presenta una capacidad preliminar de aproximadamente 179.8 L/s, superior al caudal de revisión de 25 años.

El estanque E-01 se definió como elemento impermeable de regulación y almacenamiento temporal, con un volumen útil conceptual de 600 m³ para cubrir el residual estático conservador del evento operativo de 10 años y una demasía controlada para el evento de 25 años. La maqueta se reconoce únicamente como representación demostrativa. Por tanto, el trabajo demuestra coherencia en el diseño y trazabilidad de los cálculos, pero no constituye un proyecto ejecutivo ni una validación hidráulica en campo. La siguiente etapa debe centrarse en medir la infiltración real, verificar la topografía y las pendientes, ajustar el balance dinámico del estanque, evaluar la calidad del agua y validar el concreto permeable.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron Grammarly Plus para la revisión gramatical y ortográfica, así como para mejorar la claridad y la redacción del texto. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

ACI Committee 522. (2023). Pervious concrete—Report (ACI PRC-522-23). American Concrete Institute. https://www.concrete.org/store/productdetail?ItemID=52223

Addo-Bankas, O., Wei, T., Zhao, Y., Bai, X., Núñez, A. E., & Stefanakis, A. (2024). Revisiting the concept, urban practices, current advances, and future prospects of green infrastructure. Science of The Total Environment, 954, 176473. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176473

Ali, S., Sang, Y., Yang, M., & Naeem, M. (2025). Influences of rainfall characteristics on the water-saving and stormwater-control performance of rainwater harvesting systems. Journal of Environmental Management, 375, 124318. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124318

ASTM International. (2018). ASTM D3385-18, Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D3385-18

ASTM International. (2023). ASTM C1701/C1701M-17a(2023), Standard test method for infiltration rate of in-place pervious concrete. https://doi.org/10.1520/C1701_C1701M-17AR23

ASTM International. (2025). ASTM C1754/C1754M-25, Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. https://doi.org/10.1520/C1754_C1754M-25

ASTM International. (2026). ASTM C1688/C1688M-26, Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete. https://doi.org/10.1520/C1688_C1688M-26

Bonciarelli, L., Orlandi, F., Muscas, D., & Fornaciari, M. (2025). Sustainable stormwater management and bioretention: An overview of reviews of the last 10 years. Land, 14(4), 736. https://doi.org/10.3390/land14040736

Breulmann, M., Müller, R., & van Afferden, M. (2024). Modelling urban stormwater and irrigation management with coupled blue-green infrastructure in the context of climate change. Blue-Green Systems, 6(1), 100–113. https://doi.org/10.2166/bgs.2024.101

Cansian, A. R., Guzmán, D. A., Rosa, A., & de Toledo Machado, J. (2025). Nature-based solutions for urban drainage: A systematic review of sizing and monitoring methods. Water, 17(17), 2524. https://doi.org/10.3390/w17172524

Canteiro, M., Arellano-Aguilar, O., Becerril Bravo, J. E., & Zambrano, L. (2023). Urban green spaces and their relationship with groundwater quality: The case of a shallow aquifer in the south of Mexico City. Sustainable Water Resources Management, 9, 156. https://doi.org/10.1007/s40899-023-00935-x

Canteiro, M., Prado, B., Fernández, T., & Zambrano, L. (2025). The relation between urban green spaces, shallow aquifers, and water availability for cities: A case study in Mexico City. PLOS Water, 4(4), e0000324. https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000324

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

Cauteruccio, A., & Lanza, L. G. (2022). Rainwater harvesting for urban landscape irrigation using a soil water depletion algorithm conditional on daily precipitation. Water, 14(21), 3468. https://doi.org/10.3390/w14213468

Chen, C.-F., Lin, C.-H., & Lin, J.-Y. (2025). A 4-year field experiment on an urban permeable sidewalk on its runoff and surface temperature performance. Urban Science, 9(11), 473. https://doi.org/10.3390/urbansci9110473

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.

Clar, M. L., Barfield, B. J., & O'Connor, T. P. (2004). Stormwater best management practice design guide: Volume 2, vegetative biofilters (EPA/600/R-04/121A). U.S. Environmental Protection Agency. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=901X0B00.TXT

Comisión Nacional del Agua. (2020). Normales climatológicas por estado: Hidalgo (Estación 13022 Pachuca). Servicio Meteorológico Nacional, Gobierno de México. https://smn.conagua.gob.mx/

Costello, L. R., Matheny, N. P., & Clark, J. R. (2000). Estimating the irrigation water needs of landscape plantings in California: Part 1, The landscape coefficient method. En A Guide to Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California: The Landscape Coefficient Method and WUCOLS III. University of California Cooperative Extension / California Department of Water Resources.

Custódio, D. A., & Ghisi, E. (2023). Impact of residential rainwater harvesting on stormwater runoff. Journal of Environmental Management, 326, 116814. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116814

Dmitrović, V., Ignjatijević, S., Vapa Tankosić, J., Prodanović, R., Lekić, N., Pavlović, A., Čavlin, M., Gardašević, J., & Lekić, J. (2025). Sustainability of urban green spaces: A multidimensional analysis. Sustainability, 17(9), 4026. https://doi.org/10.3390/su17094026

Dobkowitz, S., Bronstert, A., & Heistermann, M. (2025). Water retention by green infrastructure to mitigate urban flooding: A meta-analysis. Urban Water Journal, 22(5), 477–492. https://doi.org/10.1080/1573062X.2025.2472325

Fariz-Salinas, E. A., Acuña-Bedoya, J. D., Fonseca Rodríguez, R. I., Turrén-Cruz, T., & López Zavala, M. Á. (2025). Definition of potential sites to implement urban rainwater harvesting systems in water-stressed cities by integrating GIS and AHP tools. Urban Climate, 64, 102639. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102639

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

Fereshtehpour, M., & Najafi, M. R. (2025). Urban stormwater resilience: Global insights and strategies for climate adaptation. Urban Climate, 59, 102290. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102290

Franco, E., Ghisi, E., Vaz, I. C., & Thives, L. P. (2025). Permeable pavements: An integrative review of technical and environmental contributions to sustainable cities. Water, 17(22), 3323. https://doi.org/10.3390/w17223323

Haselbach, L., Fountain, M., Toosi, G., & Hariri Asli, H. (2024). Efficacy of underground aggregate infiltration beds under a permeable pavement system. Discover Water, 4, 117. https://doi.org/10.1007/s43832-024-00175-w

Huang, Y., Li, D., Li, Q., Xu, K.-Q., Xie, J., Qiang, W., Zheng, D., Chen, S., & Fan, G. (2025). Optimization of low-impact development layouts for urban stormwater management: A simulation-based approach using a multi-objective scatter search algorithm. Water, 17(6), 840. https://doi.org/10.3390/w17060840

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007). Conjunto de datos vectoriales edafológico escala 1:250 000 serie II (Continuo Nacional): Pachuca F14-11. INEGI. https://www.inegi.org.mx/

Kim, J., Park, J., Cha, S., & Kwon, S. (2024). Applying low-impact development techniques for improved water management in urban areas. Water, 16(19), 2837. https://doi.org/10.3390/w16192837

Kong, J., Jeong, S., Lee, J., & Jeong, S. (2025). Permeable pavement blocks as a sustainable solution for managing microplastic pollution in urban stormwater. Science of The Total Environment, 966, 178649. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178649

Lekuona-Orkaizagirre, A., Meaurio, M., Madrazo-Uribeetxebarria, E., Garmendia Antín, M., & 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, 662, 133906. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133906

Li, S., Liu, Y., Nguyen, A. H., Wu, Z., Al-Farsi, M. Z., Choi, T., Zhou, L., Her, Y., Li, F., Ren, D., & Xue Romeiko, X. (2025). A framework for creating sustainable rainwater harvesting and reuse strategies for urban landscape irrigation in a changing climate. Journal of Environmental Management, 392, 126852. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126852

Lu, C., Zheng, M., Lei, B., Zhu, R., & Su, Y. (2024). Simulation test of short-term and long-term clogging of permeable pavement. Environmental Science and Pollution Research, 31, 28734–28753. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33067-6

Mundo-Molina, M. (2014). Kp pan evaporation and ETo monthly maps using information of 60 weather observatories included in the Climate Normals (1941-1970) from Mexico. Journal of Water Resource and Protection, 6, 1475-1500. https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.615136

Muttuvelu, D. V., Wyke, S., & Vollertsen, J. (2024). Measuring infiltration rates in permeable asphalt pavement in urban landscapes. KSCE Journal of Civil Engineering, 28(11), 5255–5265. https://doi.org/10.1007/s12205-024-0014-y

Rostamzadeh, S., Malekmohammadi, B., Mashhadimohammadzadehvazifeh, F., & Arsanjani, J. J. (2025). The effects of low-impact development best management practices on reducing stormwater caused by land use changes in urban areas: A case study of Tehran City, Iran. Land, 14(1), 28. https://doi.org/10.3390/land14010028

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (s. f.). Isoyetas de intensidad-duración-periodo de retorno e isoyetas de altura de lluvia máxima en 24 h para Hidalgo. Dirección General de Servicios Técnicos, SICT. https://micrs.sct.gob.mx/infraestructura/dirección-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/hidalgo/

Servicio Meteorológico Nacional, & Comisión Nacional del Agua. (2010). Información climatológica por estación: Normal climatológica 1981-2010, estación 13022 Pachuca (OBS), Hidalgo. CONAGUA-SMN, Banco Nacional de Datos Climatológicos (CLICOM). https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales8110/hgo/nor8110_13022.txt

Taheri, P., Alavi-Moghaddam, M. R., & Piadeh, F. (2025). Sustainability assessment of low-impact development methods for urban stormwater management: A multi-criteria decision-making approach. Sustainable Cities and Society, 118, 106025. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106025

Teston, A., Ghisi, E., Martins Vaz, I. C., Piccinini Scolaro, T., & Severis, R. M. (2024). Modular life cycle assessment approach: Environmental impact of rainwater harvesting systems in urban water systems. Science of The Total Environment, 908, 168281. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168281

Xu, D., Liu, D., Xu, Q., & Yan, Z. (2024). Mitigating the effects of low-impact development on waterlogging and non-point pollution under different confluence relationships. Water, 16(24), 3721. https://doi.org/10.3390/w16243721

Zandsalimi, Z., Feizabadi, S., Yazdi, J., & Salehi Neyshabouri, S. A. A. (2024). Evaluating the impact of digital elevation models on urban flood modeling: A comprehensive analysis of flood inundation, hazard mapping, and damage estimation. Water Resources Management, 38, 4243–4268. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03862-4