

Estrategias híbridas de drenaje urbano sostenible en condiciones de baja infiltración: caso Zona Plateada, Pachuca de Soto

Hybrid strategies for sustainable urban drainage under low-infiltration conditions: the case of Zona Plateada, Pachuca de Soto

Nelly Janeth Soriano Chávez

so420733@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0000-5413-5937>
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Humberto Iván Navarro Gómez

humberto_navarro@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Eber Pérez Isidro

eber_perez@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-8500-710X>
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Mauricio Guerrero Rodríguez

mgr@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0002-7364-4686>
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5830>

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5830>

Estrategias híbridas de drenaje urbano sostenible en condiciones de baja infiltración: caso Zona Plateada, Pachuca de Soto

Hybrid strategies for sustainable urban drainage under low-infiltration conditions: the case of Zona Plateada, Pachuca de Soto

Nelly Janeth Soriano Chávez

so420733@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0000-5413-5937>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Humberto Iván Navarro Gómez¹

humberto_navarro@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Eber Pérez Isidro

eber_perez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8500-710X>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Mauricio Guerrero Rodríguez

mgr@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0002-7364-4686>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Mineral de la Reforma – México

Artículo recibido: 03 de enero de 2026. Aceptado para publicación: 07 de mayo de 2026.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Esta investigación tuvo en cuenta enfoques híbridos para el drenaje urbano sostenible bajo condiciones de baja infiltración, adoptadas en la Zona Plateada, Pachuca de Soto, una región de rápida urbanización, con suelos Phaeozem con horizontes pedregosos y subsuelos de toba volcánica no fracturada que impiden severamente la infiltración natural. Debido a la insuficiente efectividad de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) convencionales en este escenario, el estudio adoptó una metodología que combinó análisis geoespacial, evaluación multicriterio, simulaciones hidrológicas y validación de campo. Se realizaron comparaciones entre alternativas como la biorretención con descarga regulada, las trincheras de detención revestidas, el almacenamiento subterráneo y la canalización controlada. Los escenarios con $Tr = 10, 25, 50$ y 100 años demostraron que las soluciones de infiltración no funcionan para $Tr > 10$ años, mientras que las opciones híbridas pueden mantener un rendimiento más consistente hasta $Tr = 50$ años. Se identificaron tres sectores prioritarios y se formuló un plan de acción progresivo. La principal contribución del estudio es mostrar que en entornos de baja infiltración, el drenaje urbano sostenible depende más de una cadena eficiente de captación, laminación, almacenamiento temporal y descarga regulada que de la infiltración

¹ Autor de correspondencia.

profunda.

Palabras clave: SUDS híbridos, inundación pluvial urbana, baja infiltración, infraestructura azul-verde, modelación hidrológica

Abstract

This study analyzed hybrid strategies for sustainable urban drainage under low-infiltration conditions in Zona Plateada, Pachuca de Soto, a rapidly urbanizing area characterized by Phaeozem soils with petric horizons and unfractured volcanic tuff subsoils that severely restrict natural infiltration. Because conventional Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) perform poorly under these site conditions, the research employed an integrated methodology combining geospatial analysis, multi-criteria evaluation, hydrological simulations, and field validation. Alternatives such as bioretention with controlled discharge, lined detention trenches, underground storage, and controlled conveyance were compared. Simulations for return periods of 10, 25, 50, and 100 years showed that infiltration-based solutions lose functionality beyond $Tr > 10$ years, whereas hybrid strategies remain more robust up to $Tr = 50$ years. Three priority sectors were identified, and a phased intervention strategy was formulated. The main contribution of the study was to demonstrate that, in low-infiltration urban settings, sustainable urban drainage performs better when organized as a functional chain of capture, attenuation, temporary storage, and regulated outflow rather than relying on deep infiltration as the dominant control mechanism.

Keywords: hybrid SuDS, urban pluvial flooding, low infiltration, blue-green infrastructure, hydrological modeling

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicado en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons. 

Cómo citar: Soriano Chávez, N. J., Navarro Gómez, H. I., Pérez Isidro, E., & Guerrero Rodríguez, M. (2026). Estrategias híbridas de drenaje urbano sostenible en condiciones de baja infiltración: caso Zona Plateada, Pachuca de Soto. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 7 (2), 2594 – 2614. <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5830>

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas representan uno de los peligros hidrometeorológicos más persistentes en las ciudades intermedias en proceso de urbanización.

En este contexto, la proliferación de superficies impermeables, los cambios en los conductos naturales de escorrentía y los desarrollos viales resultan en flujos máximos de pico, tiempos de concentración más cortos y un mayor potencial de inundaciones en puntos bajos del sistema urbano (Addo-Bankas et al., 2024; Ayoubi Ayoubli et al., 2024; Wen et al., 2025).

Los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) y las estrategias de infraestructura azul-verde han surgido como alternativas al drenaje tradicional, con sus mecanismos descentralizados para la retención, el almacenamiento, la biorretención y la regulación de las escorrentías (Ferreira et al., 2021). Sin embargo, la literatura reciente indica que su rendimiento está significativamente influenciado por la pendiente, la conectividad urbana, la intensidad de las precipitaciones, la disposición espacial, el mantenimiento y, en particular, por las propiedades físicas del suelo y del subsuelo (Cansian et al., 2025; Chen & Chui, 2025; Maglia & Raimondi, 2025; Pachouri et al., 2025; Zhou, 2014).

La Zona Plateada, situada en Pachuca de Soto, Hidalgo, es un ejemplo especialmente pertinente de tal adaptación. De acuerdo con el Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Pachuca de Soto, Hidalgo, el sector forma parte de un entorno urbano cuya dinámica territorial y ambiental exige considerar de manera integrada las restricciones físicas del suelo, la expansión urbana y la funcionalidad de la infraestructura pluvial (Honorable Ayuntamiento de Pachuca de Soto, Hidalgo, & Universidad Autónoma Chapingo, 2020).

Los suelos Phaeozem con horizontes pedregosos y tobas volcánicas no fracturadas en el subsuelo restringen significativamente la profundidad de penetración y la capacidad de las soluciones convencionales de infiltración para operar con éxito. Además, la impermeabilización progresiva, la urbanización rápida y un sistema de aguas pluviales inadecuado ante eventos extremos conducen a una preferencia por depósitos repetidos de agua de lluvia y de escorrentía concentrada (Qi et al., 2025).

A pesar de varios trabajos recientes que documentan el éxito de las prácticas de Desarrollo de Bajo Impacto (LID) y la implementación de SUDS, todavía falta literatura aplicada para su reformulación en entornos con restricciones edafológicas y con acceso intermedio a la información, como los que se encuentran en muchas áreas urbanas mexicanas.

Esta brecha es relevante, ya que la evidencia reciente indica que la optimización espacial, la integración verde-gris y el diseño por cadenas funcionales mejoran el desempeño del sistema solo cuando se adaptan a las condiciones específicas del sitio, y no cuando se transfieren mecánicamente de un contexto a otro (Ambily et al., 2024; Fappiano et al., 2025; Wen et al., 2025; Ye et al., 2025).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el desempeño de distintas alternativas de drenaje urbano sostenible en condiciones de baja infiltración, mediante análisis espacial, evaluación multicriterio y modelación hidrológica, con el fin de proponer una estrategia de intervención territorialmente adaptada, técnicamente viable y funcionalmente compatible con la estructura urbana del área de estudio.

La hipótesis de trabajo plantea que, en la Zona Plateada, las soluciones híbridas basadas en la captación, la detención, el almacenamiento temporal y la descarga regulada ofrecen un desempeño más robusto que los dispositivos centrados exclusivamente en la infiltración. La principal aportación del manuscrito consiste en demostrar esta diferencia de desempeño y en traducirla en una propuesta escalonada de intervención para una ciudad intermedia con restricciones edafológicas severas.

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

El estudio se llevó a cabo con un diseño mixto, que incorpora enfoques Cualitativo-Descriptivo y cuantitativo-exploratorio, para combinar la observación territorial, el estudio espacial georreferenciado y la evaluación técnico-normativa de las estrategias de intervención de aguas pluviales.

Dicho diseño de estudio se aplicó debido a la naturaleza multidimensional del fenómeno estudiado, un escenario caracterizado por interacciones entre variables geológicas, del suelo, hidráulicas, urbanas y operativas que no pueden interpretarse satisfactoriamente con un único marco metodológico. En cuanto al diseño de la investigación, no fue experimental, ya que examina las condiciones existentes del área de estudio sin manipular variables independientes.

Unidad de análisis y fuentes de información

Zona Plateada y entorno inmediato de escorrentía en la cuenca urbana de Pachuca, sectores funcionales (donde pueden converger flujos superficiales y se registran acumulaciones recurrentes de aguas pluviales). Fuentes cartográficas, normativas y de campo respaldaron el estudio.

Las fuentes utilizadas incluyen el Modelo Digital de Elevación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022), la cartografía temática del área, las directrices técnicas del Manual de Drenaje Urbano de Aguas Pluviales de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2017) y la observación directa realizada durante los viajes de campo.

Métodos de recolección y análisis

La metodología se basó en el análisis espacial mediante sistemas de información geográfica (SIG), el examen multicriterio, la observación y el modelado hidrológico mediante escenarios de diseño. Se utilizó un receptor GPS Garmin Etrex 32x para la detección en campo de puntos clave de escorrentía, obstrucciones, caminos de flujo preferenciales y deficiencias visibles en los sistemas de aguas pluviales existentes, y para registrarlos. La información adquirida permitió el análisis comparativo de los datos cartográficos con la naturaleza del terreno y la interpretación refinada del comportamiento del agua superficial.

Procedimiento de análisis espacial y evaluación multicriterio

El análisis espacial se centra en distintas áreas de exposición al riesgo de escorrentía superficial. En este sentido, se sumaron pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, uso del suelo y distancia a los canales receptores bajo una lógica de evaluación multicriterio. Estos parámetros fueron elegidos por su influencia en la generación, la concentración y la conducción de la escorrentía urbana. Al incorporar variables, se hizo posible la priorización espacial de áreas con diferentes prioridades de intervención, y así se permitió la delimitación de sectores funcionales dentro del sistema local de aguas pluviales.

Evaluación técnica comparativa de alternativas

Posteriormente, se realizó una evaluación técnica comparativa de alternativas de drenaje urbano sostenible adaptadas a contextos de baja infiltración. Las opciones evaluadas fueron; trincheras de biorretención con cobertura parcial, zanjas vegetadas con sustrato artificial, cisternas subterráneas lineales y canales vegetados con sobreancho. Evaluamos estas alternativas según la capacidad hidráulica, la constructibilidad, la compatibilidad vial, la replicabilidad, la facilidad de mantenimiento, el costo relativo, así como la funcionalidad técnica e ingenieril en suelos duros. Esta comparación permitió identificar la aplicación funcional de cada solución antes de su uso geográfico.

Modelado hidrológica y escenarios de diseño

Por último, se implementó una etapa de modelado hidrológico con series de precipitaciones sintéticas basadas en el método CONAGUA (2017), con el objetivo de simular el rendimiento del sistema en eventos con periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Los parámetros de escorrentía superficial se definieron en función del tipo de suelo, la cobertura urbana, la pendiente y los coeficientes de escorrentía considerados relevantes por las normativas técnicas.

Este enfoque permitió comparar los posibles rendimientos de soluciones infiltrantes y no infiltrantes, considerando diferentes escenarios de demanda hidráulica y criterios de diseño compatibles con un entorno urbano de baja infiltración, basados en criterios de modelado hidrológico, los cuales se aplicaron a estudios de calibración de parámetros en subcuencas (Anaya Espinoza, 2017). De manera similar, como directriz técnica, los canales urbanos en áreas densamente pobladas se diseñan, como mínimo, para un periodo de retorno de 50 a 100 años, según las directrices de CONAGUA (2017).

DESARROLLO

Causas de inundación en zonas urbanas

Los impactos del cambio climático y de la urbanización se manifiestan con claridad en los sistemas hidrológicos urbanos, al modificar la producción, la concentración y la evacuación del escurrimiento (Chen & Chui, 2025). En ciudades sometidas a transformaciones rápidas en el uso del suelo, las inundaciones ya no responden solo a la magnitud de la lluvia, sino también a la combinación de sellado superficial, pérdida de áreas de almacenamiento, alteración de los cauces y sobredemanda sobre la infraestructura pluvial existente (Addo-Bankas et al., 2024; Ayoubi Ayoublu et al., 2024; Wen et al., 2025).

La urbanización es uno de los procesos más transformadores en la relación entre la sociedad y el medio físico, pues sustituye las coberturas vegetales por superficies impermeables, como el concreto, el asfalto y las techumbres (Shrestha et al., 2025). Ello modifica el ciclo del agua al incrementar el escurrimiento superficial, acelerar la respuesta hidrológica y trasladar rápidamente los excedentes hacia los puntos de acumulación.

Esta lógica se intensifica en entornos con pendientes, alta conectividad vial o restricciones de infiltración, donde los daños por anegamiento suelen explicarse mejor por la configuración territorial del sistema que por la lluvia considerada de forma aislada (Chen & Chui, 2025; Fappiano et al., 2025).

En el caso local, además de las limitaciones físicas del terreno, la deficiente operación del sistema pluvial y la obstrucción de las coladeras agravan el problema durante la temporada de lluvias.

La evidencia periodística y los reportes institucionales permiten contextualizar que la acumulación de residuos sólidos y el mantenimiento insuficiente también contribuyen a la recurrencia de anegamientos, aunque no explican por sí solos la vulnerabilidad estructural del sector (El Universal Hidalgo, 2024).

Enfoques y modelos de drenaje urbano sostenible

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) constituyen un enfoque integral cuyo objetivo es, en la medida de lo posible, aproximarse al comportamiento hidrológico previo a la urbanización mediante estrategias de retención, tratamiento, laminación y reutilización del agua de lluvia (CIRIA, 2015; EPA, 2021).

La literatura reciente reconoce que estos sistemas no deben concebirse como elementos aislados, sino como trenes o cadenas de tratamiento articuladas con la infraestructura convencional y

dimensionadas según las condiciones locales de operación (Barranco-Mejía, 2024; Cansian et al., 2025; Maglia & Raimondi, 2025; Zhou, 2014).

Esta noción de encadenamiento funcional resulta central para el presente estudio, ya que permite pasar de la lógica de dispositivos sueltos a la lógica de sistema (Chen & Gaspari, 2023).

Como se muestra en la Figura 1, el manejo integral del agua pluvial requiere organizar etapas sucesivas de captación, transporte, control de sólidos, almacenamiento y regulación de las salidas para distribuir mejor las cargas hidráulicas en el medio urbano (Medina Piza et al., 2018; Addo-Bankas et al., 2024).

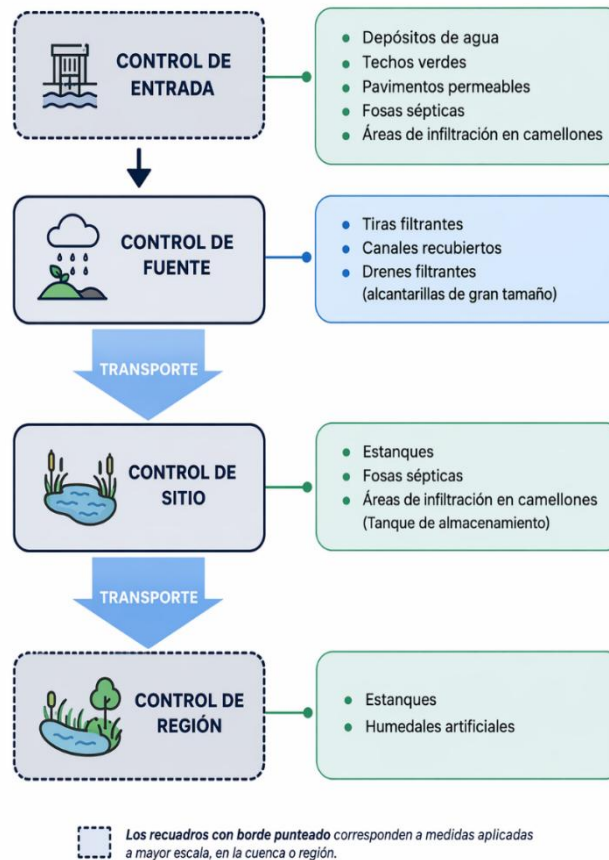
Bajo esta perspectiva, pueden distinguirse al menos dos principios complementarios:

El primero es la infraestructura verde en red, según la cual el sistema debe mantener una conexión espacial que permita flujos sociales, ambientales y biológicos, e integre elementos como jardines de lluvia, pavimentos permeables, canales vegetados y zonas de amortiguamiento distribuidos a lo largo del tejido urbano (Loaiza Maldonado, 2022; Giménez-García et al., 2023).

El segundo es el enfoque resiliente, que considera escenarios de cambio climático y eventos extremos, y diseña soluciones flexibles y adaptativas con base en simulaciones de precipitación y de capacidad hidráulica excedente (Caro Becerra, 2022).

Figura 1

Tren de manejo integral urbano del agua



Fuente: tomado de Barranco-Mejía (2024), adaptado por el autor y editado con apoyo de Canva.

Desempeño diferencial de los SUDS en contextos urbanos complejos

La evidencia reciente ha mostrado que el desempeño de los SUDS y de las prácticas LID no depende únicamente del tipo de dispositivo implementado, sino también de la interacción entre la intensidad de lluvia, la morfología urbana, la densidad de urbanización, la conectividad hidráulica, la pendiente, la operación y el mantenimiento.

Estudios basados en modelación hidrológica, metaanálisis y optimización espacial han demostrado que la combinación de infraestructura verde y gris incrementa la resiliencia del drenaje urbano cuando las intervenciones se ubican estratégicamente y no como soluciones aisladas (Ayoubi Ayoublu et al., 2024; Qi et al., 2025; Wen et al., 2025; Ye et al., 2025).

Del mismo modo, la literatura reciente sobre biorretención, diseño integrado y soluciones basadas en la naturaleza indica que los beneficios en la reducción del escurrimiento y en la mejora de la calidad del agua son significativos, pero su magnitud depende del contexto físico y de la severidad del evento de diseño (Sabbagh et al., 2025; Fappiano et al., 2025; Maglia & Raimondi, 2025).

Desarrollo de bajo impacto (LID)

El desarrollo de bajo impacto LID (por sus siglas en inglés) es un enfoque utilizado principalmente en EE. UU. En Nueva Zelanda, este enfoque busca minimizar el costo de la gestión de las aguas pluviales mediante un diseño en armonía con la naturaleza. Este término se usó para distinguir el diseño en el sitio y el enfoque de cuenca convencional de gestión de aguas pluviales (Sarabia Sánchez, 2022).

Estos enfoques requieren adaptarse a las condiciones específicas del entorno urbano-natural, especialmente en ciudades intermedias, donde las características del suelo y el uso del territorio dificultan su implementación mecánica.

Condicionantes edafológicos y geológicos

La efectividad de los SUDS está directamente condicionada por las propiedades físicas del suelo y del subsuelo. En Zona Plateada, predominan suelos Phaeozem dúricos y un subsuelo conformado por toba volcánica no fracturada, lo que resulta en una capacidad de infiltración prácticamente nula, (Mérida, 2021; Caro Becerra, 2022).

Este tipo de perfil impide la percolación profunda y favorece la acumulación superficial del escurrimiento, lo que genera saturación y posibles colapsos si se aplican sistemas diseñados para suelos permeables. Ante este escenario, resulta indispensable replantear las soluciones tradicionales y avanzar hacia estrategias de almacenamiento temporal, de derivación controlada y de descarga diferida (Boers et al., 2018).

Adaptación morfo-hidrológica local

El diseño de sistemas de drenaje debe considerar la morfología del territorio y sus patrones de escurrimiento. En zonas de urbanización acelerada, con pendientes pronunciadas y una cobertura urbana creciente, la conducción superficial puede resultar más viable que la infiltración.

Autores como Addo-Bankas et al. (2024) señalan que muchos lineamientos normativos presuponen una infiltración básica del suelo, lo que excluye automáticamente grandes sectores del territorio latinoamericano. Por ello, proponen una "regionalización del drenaje sostenible", ajustando los diseños al entorno físico, social y normativo locales.

Esta perspectiva implica sustituir soluciones estandarizadas por sistemas contextualizados, híbridos y menos dependientes del subsuelo, lo cual resulta especialmente relevante para zonas urbanas con expansión reciente en terrenos volcánicos o edáficamente limitados.

Evaluación multicriterio y uso de SIG

La planificación y la localización de infraestructura pluvial sostenible requieren metodologías integradas. El uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite integrar variables como el uso del suelo, la pendiente, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la accesibilidad y la proximidad a cauces o redes existentes.

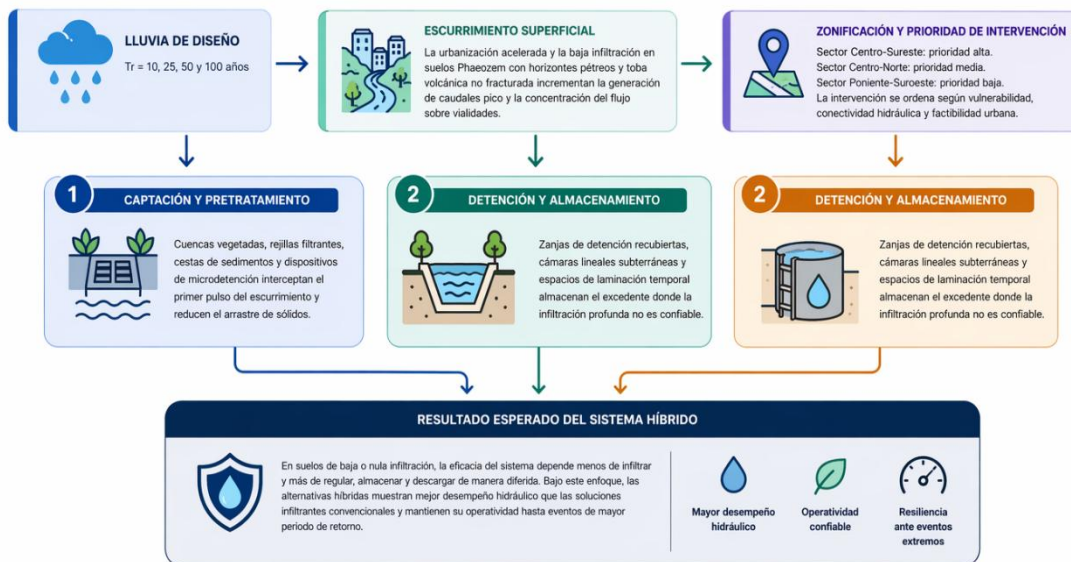
Mediante análisis multicriterio, es posible establecer zonas prioritarias de intervención, con base en indicadores cuantificables y mapas de riesgo (Xu et al., 2026; Giménez-García et al., 2023; Sánchez Rodríguez, 2020).

Esta metodología ofrece ventajas significativas para entornos urbanos en transformación, donde se requiere una asignación eficiente de recursos e intervenciones escalonadas.

La Figura 2 resume la lógica conceptual adoptada en este estudio para organizar la infraestructura híbrida como una cadena funcional de captación, pretratamiento, almacenamiento y descarga regulada, en lugar de depender únicamente de la infiltración.

Figura 2

Esquema conceptual de infraestructura híbrida para la gestión de la lluvia en la Zona Plateada



Nota: El esquema sintetiza la secuencia funcional propuesta para el área de estudio: captación distribuida, pretratamiento, detención temporal, almacenamiento subterráneo y descarga regulada, articulados según la prioridad territorial y las condiciones de baja infiltración.

Fuente: elaborada con base en información propia y editada con apoyo de Canva.

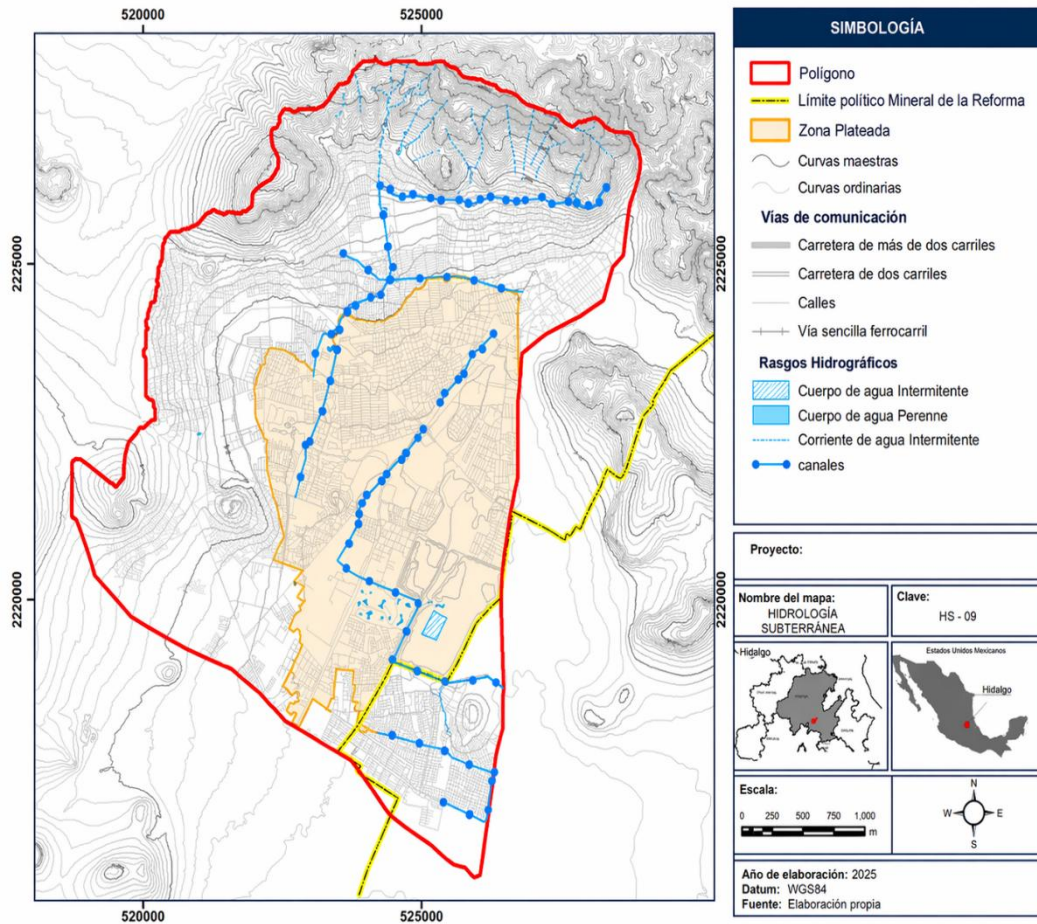
Infraestructura híbrida y estrategias no infiltrantes

Diversos estudios han demostrado que la combinación de estrategias no infiltrantes puede resultar altamente eficiente en contextos de baja permeabilidad. En ciudades y sectores urbanos con restricciones físicas o hidráulicas se han implementado dispositivos como zanjas de detención con recubrimiento impermeable, sistemas de biorretención con sustratos artificiales, cámaras subterráneas de almacenamiento temporal y canales vegetados con descarga regulada. Estos sistemas constituyen una forma de infraestructura híbrida, que combina elementos verdes y grises con criterios de sostenibilidad, operatividad técnica y compatibilidad urbana.

La Figura 3 localiza la Zona Plateada dentro del sistema de escurrimiento de la cuenca urbana de Pachuca y permite comprender por qué la posición topográfica del sector condiciona la acumulación de flujos y la necesidad de una respuesta territorialmente diferenciada.

Figura 3

Ubicación de la Zona Plateada dentro del sistema de escurrimiento de la cuenca urbana de Pachuca, Hidalgo



Fuente: Elaboración propia con base en la cartografía del INEGI (Modelo de Elevación Digital 2022), Municipio de Pachuca de Soto (2025) y en delimitaciones hidrológicas obtenidas con SIG.

La literatura reciente ha mostrado que la integración verde-gris mejora el desempeño del drenaje urbano cuando el diseño considera explícitamente el contexto de impermeabilización, la conectividad del sistema y los escenarios futuros de lluvia (Andrade, 2016; Caro Becerra, 2022; Ye et al., 2025).

En particular, su diseño debe considerar parámetros como el periodo de retorno (T_r) de los eventos de lluvia, conforme a normativas nacionales, como el Manual de Drenaje Pluvial Urbano (CONAGUA, 2017), que recomienda valores de T_r entre 50 y 100 años en zonas densamente urbanizadas.

En conjunto, estos antecedentes sustentan que la evaluación de alternativas para la Zona Plateada debe combinar criterios hidrológicos, espaciales y operativos, en lugar de asumir la viabilidad general de las soluciones infiltrantes.

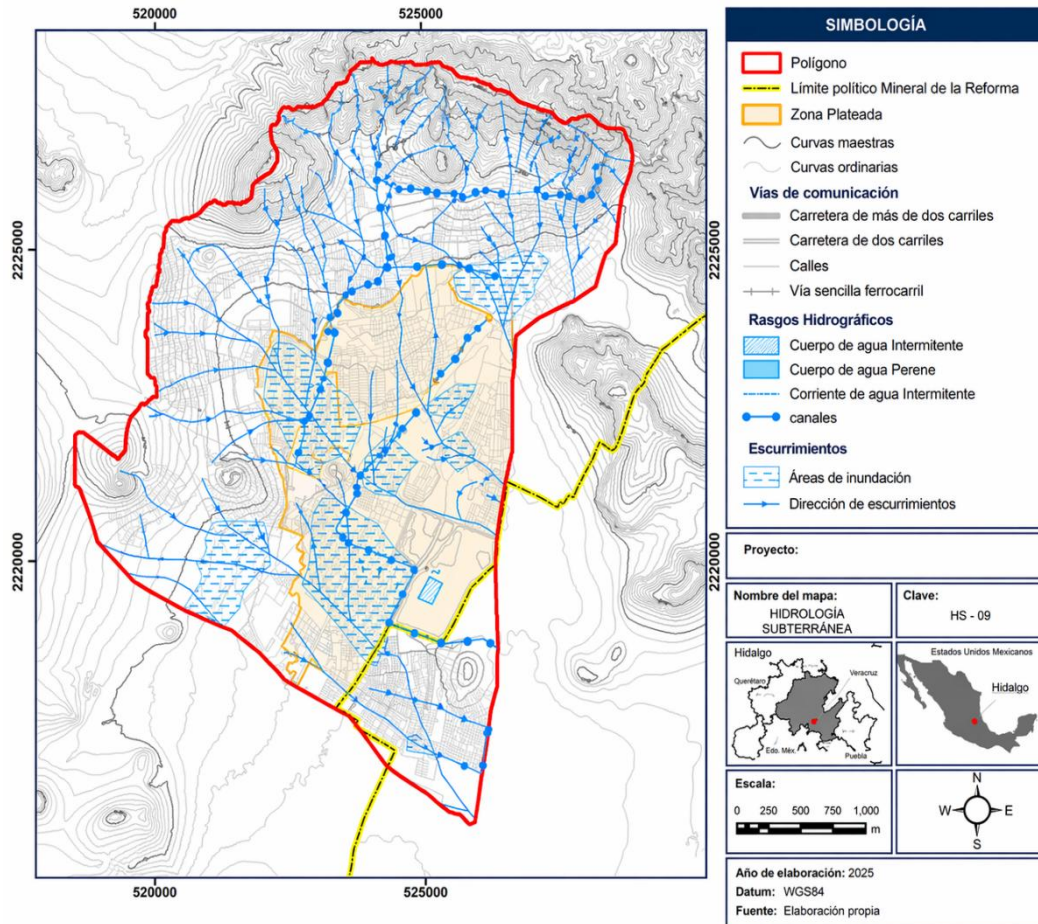
RESULTADOS

Zonas críticas de escurrimiento y análisis espacial

La evaluación espacial mediante sistemas de información geográfica permitió identificar tres sectores con distintos niveles de vulnerabilidad frente al riesgo de escurrimiento superficial (véase la Figura 4).

Figura 4

Mapa de zonas críticas de escurrimiento en la Zona Plateada



Nota: Clasificación espacial de los sectores según la prioridad de intervención derivada del análisis multicriterio (pendiente, impermeabilidad, cobertura y riesgo reportado).

Fuente: elaboración propia con base en el INEGI (2022), el Municipio de Pachuca de Soto (2025) y recorridos de campo.

Esta diferenciación se sustentó en la interacción entre las pendientes, los suelos de muy baja permeabilidad y los procesos recientes de urbanización. Asimismo, se observó que varias calles funcionan como trayectorias preferenciales del flujo, por lo que actúan como canales secundarios capaces de conducir y transportar la lluvia incluso durante precipitaciones de baja intensidad. Los criterios de análisis incluyeron el tipo de suelo (Phaeozem dúrico), la pendiente, la cobertura vegetal, el uso del suelo y la distancia a los cauces receptores, con base en procedimientos reportados por Giménez-García et al. (2023) y Sánchez Rodríguez (2020).

El sector Centro-Sureste fue la de mayor prioridad para la intervención en la región y en la cuenca, tanto en profundidad como en confluencia, así como en la cuenca local aguas abajo de la Zona Plateada, donde varios flujos convergen desde el norte y el oeste hacia los canales. Las condiciones topográficas y la urbanización descontrolada facilitan la escorrentía y, por lo tanto, la acumulación de agua de lluvia.

El sector Centro-Norte mostró solo una prioridad intermedia, con pendientes <2%, escorrentía intermitente y drenaje pluvial inadecuado en arterias principales, como el Camino Real de la Plata.

Notablemente en esta región, la escorrentía de la barranca Cembo provoca una pérdida repentina de continuidad a la altura del fraccionamiento Valle del Mayab, originando una zona de inundación que toca el Residencial "La Excelencia", Colonia Independencia, Colonia Valle del Palmar, Fraccionamiento San Carlos, Zona Plateada y el Boulevard Ramón G. Bonfil (Rico, 2025). La zona Oeste-Suroeste tenía una prioridad relativamente menor, pero con la reciente expansión urbana y sin infraestructura preventiva, se indica que es una sección de riesgo en desarrollo.

El patrón ilustró que la gestión de aguas pluviales en la Zona Plateada no puede resolverse mediante un sistema único para todo el polígono, sino que debería implementarse una asignación geográfica altamente diferenciada de cada una de las medidas de gestión de aguas pluviales, de acuerdo con la lógica espacial de la escorrentía y la capacidad hidráulica de los diversos tipos de sectores.

Evaluación técnica comparativa de diferentes alternativas

Específicamente, se evaluaron cinco soluciones del tipo SUDS adaptadas a contextos de baja infiltración según criterios presentados en la literatura especializada (CIRIA, 2015; Caro Becerra, 2022; Giménez-García et al., 2023; Boers et al., 2018). Comparación de la capacidad hidráulica, la compatibilidad con la infraestructura vial, la facilidad de mantenimiento, el costo relativo y la aplicabilidad técnica en suelos dúricos.

Tabla 1

Matriz comparativa de soluciones SUDS adaptadas a suelos de baja permeabilidad

Alternativa	Capacidad hidráulica	Compatibilidad vial	Mantenimiento	Costo relativo	Aplicabilidad en suelos dúricos
Zanjas de infiltración tradicional	Baja	Media	Baja	Medio	No aplicable
Zanjas de detención con recubrimiento	Alta	Alta	Media	Medio-alto	Alta
Biorretención con descarga regulada	Media	Alta	Alta	Medio	Media-alta
Almacenamiento urbano subterráneo	Alta	Alta	Alta	Alto	Alta
Canalización vegetada controlada	Media-alta	Media	Media	Medio	Alta

Fuente: Elaboración propia con base en CIRIA (2015), Boers et al. (2018), Caro Becerra (2022) y Giménez-García et al. (2023).

La Tabla 1 resume los resultados de la matriz comparativa, que demuestran que los enfoques de infiltración directa resultan ineficaces en suelos de baja permeabilidad (por ejemplo, en zanjas abiertas sin revestimiento). Las estrategias híbridas de detención convencional, canalización regulada y almacenamiento subterráneo han mostrado una mayor funcionalidad y versatilidad en contextos urbanos, en consonancia con los enfoques de Wen et al. (2025) y Ye et al. (2025).

Propuesta de intervención escalonada

Con base en la zonificación de riesgos, se desarrolló una estrategia de intervención territorial en fases, priorizando las áreas más afectadas y considerando criterios de compatibilidad técnica, operativa y regulatoria. Esta secuencia de intervención se resume en la Figura 5 e ilustra que se requiere un conjunto distinto de medidas para cada sector, según su papel en el sistema de escorrentía.

Figura 5

Esquema técnico de intervención en cuencas urbanas



Nota: Estrategia de intervención estructurada en fases para mitigar las inundaciones y mejorar el desempeño hidráulico en la Zona Plateada de Pachuca de Soto.

Fuente: elaboración propia con base en el diagnóstico territorial, la evaluación multicriterio y el análisis de factibilidad técnica, editada con apoyo de Canva.

Criterios de integración

Los cuatro criterios principales delinearon la propuesta. Primero se evaluó la jerarquía de control: donde la captura en propiedades y carreteras tendría prioridad sobre la captura de galerías subterráneas/canales existentes. El segundo fue que las limitaciones del espacio urbano debían tenerse en cuenta, por lo que se preferían zanjas vegetadas, galerías subterráneas y pavimentos permeables.

En tercer lugar, se reconoce la condición edáfica del sitio, caracterizada por Phaeozem con horizontes pedregosos; por lo tanto, se sugiere favorecer la laminación temporal y la microinfiltración superficial

siempre que las obras subterráneas sean precedidas por sedimentación y estén ubicadas en áreas con permeabilidad comprobada. Finalmente, se incluyó el criterio de alta densidad poblacional, lo que permitió utilizar cada medida de manera modular, escalable y distribuida.

Fases de intervención

En la Fase 1, referida a la región Centro-Sureste, el objetivo principal era mitigar las inundaciones en el área más crítica, gestionar los flujos de agua y desarrollar sistemas de retención subterráneos. Para lograr esto, se propuso la implementación de zanjas verdes con sustrato artificial, la rehabilitación de colectores con rejillas filtrantes y cestas de sedimentos, la aplicación de pavimento permeable en medianas y estacionamientos, y la construcción de galerías subterráneas de infiltración de aguas pluviales en franjas disponibles.

En la Fase 2, en el área norte, el objetivo era reducir la velocidad de escorrentía, controlar la erosión y prevenir la contribución de materiales sólidos al centro de la cuenca. Las medidas recomendadas fueron: zanjas vegetadas con desbordamiento controlado, cámaras de almacenamiento lineales bajo franjas de carreteras secundarias, pavimento permeable en medianas centrales y sistemas de biorretención a pequeña escala en áreas residenciales.

La Fase 3, que corresponde al sector Oeste-Suroeste, incluyó el concepto de introducir infraestructura verde mixta en urbanizaciones recientes e implementar medidas preventivas para controlar la escorrentía antes de que la urbanización consolide nuevos puntos de acumulación.

Comportamiento hidrológico y desempeño funcional de las alternativas

La encuesta combinada de información espacial y de caracterización del suelo, junto con la modelización hidrológica, indicó que la respuesta a la lluvia de la Zona Plateada no depende de un solo factor, sino de la interacción entre la impermeabilización urbana, la conectividad vial y una infiltración efectiva muy baja.

Las superficies selladas, las rutas ideales de escorrentía, así como las formaciones limitadas de suelo-subsuelo promueven una alta concentración de flujo en puntos bajos y en carriles receptores (Cotler et al., 2022). En términos de hidrología, las simulaciones revelaron una diferencia marcada entre las soluciones de infiltración convencionales y las alternativas orientadas a la detención, el almacenamiento y la liberación regulada de efluentes.

Para eventos con un período de retorno (T_r) de 10 años, las medidas de infiltración inmediata permitieron solo una reducción parcial de la escorrentía, pero esto se observó en comparación con los niveles ≥ 25 años, que mostraban signos de saturación temprana, pérdida de funcionalidad y una transferencia más rápida del exceso a puntos más bajos (Han et al., 2026). Tal comportamiento está en línea con observaciones más recientes que afirman que, en ecosistemas propensos a pendientes, entornos urbanos densamente poblados y regiones con baja conductividad hidráulica, la infiltración deja de ser efectiva si no se combina con otras medidas de control (Chen & Chui, 2025; Qi et al., 2025; Maglia & Raimondi, 2025; Wen et al., 2025).

En una microcuenca de 18.2 ha con una pendiente promedio de alrededor del 7%, se ha trazado un gráfico de precipitación de 83 mm y un volumen de escorrentía estimado en 10,920 m³ en el campo norte para $T_r = 50$ años. Este nivel representa más del 60 por ciento del potencial de la infraestructura original, lo que evidencia una insuficiencia estructural ante fenómenos extremos. Bajo ese escenario, las trincheras de detención revestidas y las cámaras lineales subterráneas y los canales vegetados con salidas controladas produjeron menos flujo pico y mayor excedente al mismo tiempo que las alternativas de infiltración.

La biorretención con descarga regulada también es útil, principalmente como captura inicial y regulación del primer pulso de escorrentía. Este hallazgo se alinea con la evidencia internacional de grandes reducciones en el volumen y el flujo pico asociados a la biorretención que ocurren cuando los dispositivos de biorretención están integrados en circuitos funcionales más amplios, mediante salidas controladas o reguladas, en lugar de dispositivos aislados (Sabbagh et al., 2025; Al Amin et al., 2025).

DISCUSIÓN

Los resultados proporcionan evidencia de que la principal limitación para el uso convencional de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) de la Zona Plateada no es la falta de soluciones técnicas, sino la transferencia acrítica de tipologías destinadas a aplicarse en entornos con mayor potencial de infiltración.

Basado en la literatura reciente, se dice que los SUDS y las prácticas de Desarrollo de Bajo Impacto (LID) son efectivas al predecir el impacto en la intensidad de la lluvia, la forma urbana, la conectividad del drenaje, la pendiente y las propiedades del suelo, en lugar de solo el nombre del dispositivo en el rendimiento (Cansian et al., 2025; Chen & Chui, 2025; Pachouri et al., 2025; Zhou, 2014).

En esta línea, Cansian et al. (2025) enfatizan que tanto el dimensionamiento como el monitoreo de soluciones basadas en la naturaleza deben tener en cuenta las condiciones operativas locales y no suposiciones generales; complementariamente, Pachouri et al. (2025) proponen integrar tanto el rendimiento hidráulico como la adaptación climática con la viabilidad de implementación para desarrollar la resiliencia del agua urbana en los SUDS.

Chen y Chui (2025) identificaron problemas de mala captura, menor capacidad de retención e impactos geotécnicos asociados a la implementación de SUDS en entornos inclinados, lo que ayuda a dilucidar por qué, en la Zona Plateada, la infiltración profunda no puede considerarse el mecanismo de control principal.

La comparación con la literatura anterior permite cuantificar el grado en que el caso de la Zona Plateada contribuyó. Ambily et al. (2024) desarrollaron un marco de planificación espacial resiliente con infraestructura verde azul y criterios de capacidad, conectividad y diversidad; de manera convergente, este trabajo proporciona evidencia de que la priorización espacial mediante SIG y análisis multicriterio debe considerarse para evitar intervenciones homogéneas en áreas hidrológicamente desiguales.

Fappiano et al. (2025) establecieron que la planificación estratégica de la infraestructura verde-azul se realiza mejor cuando se planifica adecuadamente en una etapa mucho más temprana y cuando la asignación espacial adecuada está bien estructurada; de manera similar, You et al. (2025) mostraron cierto apoyo experimental con configuraciones verde-gris espacialmente optimizadas.

En la Zona Plateada, este enfoque podría aplicarse primero involucrándose en el Centro Sureste, reforzando el Centro Norte y actuando proactivamente en el Oeste-Suroeste antes de que la urbanización acumule un mayor riesgo. De manera similar, Ye et al. (2025) han demostrado que la integración de infraestructura verde y gris mejorará el rendimiento del drenaje pluvial futuro cuando las medidas se centren en subcuencas muy impermeables y no uniformes. Las características hidráulicas de las medidas son similares a las de otros estudios recientes, que indican mejoras cuando las prácticas LID se combinan y se optimizan en contextos urbanos. Ayoubi Ayoublu et al. (2024) informaron reducciones sustanciales en el riesgo pluvial mediante una combinación de acciones de bajo impacto, y Wen et al. (2025) encontraron que la asignación adecuada de instalaciones LID aumenta la mitigación del riesgo para contextos muy urbanizados.

Qi et al. (2025) sugirieron que la tasa de éxito de las prácticas LID en ciudades costeras depende de la estructura urbana y del régimen de lluvias, lo cual coincide con sus hallazgos aquí: los sistemas de infiltración fallan a medida que el tiempo de retorno se alarga en una Zona Plateada, mientras que la detención cubierta, el almacenamiento subterráneo y la descarga programada continúan actuando mejor (Murali et al., 2025). Complementariamente, Al Amin et al. (2025) confirmaron que el diseño de la salida impacta significativamente tanto en la reducción del volumen como en el flujo máximo a escala de la parcela, lo que respalda la inclusión de mecanismos de control de salida en el plan local.

La particularidad del manuscrito es que, para suelos Phaeozem con horizontes pétreos y toba volcánica no fracturada, la sostenibilidad del drenaje urbano no requiere maximizar la infiltración, sino que los SUDS pueden reconstruirse para ser de más de un tipo, híbridos y jerárquicos.

Esta observación se suma a lo descrito por Sabbagh et al. (2025), quienes, en un meta-análisis, demostraron que la biorretención urbana reduce la escorrentía y mejora la calidad del agua, pero su rendimiento real dependerá de la ubicación y la operación del sitio.

En las instancias actuales, la biorretención fue útil; sin embargo, no constituyó una solución autónoma; su mayor efecto se obtuvo junto con una cadena funcional que incluía pretratamiento, almacenamiento temporal y regulación de la salida.

Hasta ahora, podemos entender que la contribución del artículo es doble: en primer lugar, proporcionar evidencia aplicada sobre los efectos diferenciales y los resultados comparativos de las alternativas en un contexto de baja infiltración; y, en segundo lugar, interpretar la evidencia en una propuesta de gestión pública local territorialmente escalonada.

Otro factor relacionado son las dimensiones operativas de la propuesta. Mientras que numerosos trabajos internacionales se centran en la optimización de configuraciones urbanas con capacidad considerable para obtener información, el presente estudio presenta una metodología también adecuada para una ciudad mexicana intermedia, cuya disponibilidad no es suficiente, pero la coordinación de una cartografía oficial, la validación de campo y las simulaciones de diseño siguen siendo prometedoras.

A través de esta lente, este documento proporciona no sólo una discusión sobre la eficacia relativa de algunos dispositivos, sino también el enfoque metodológico y operativo para adaptar los SUDS en entornos donde la vulnerabilidad es heterogénea y las decisiones están escalonadas geográficamente. Esta integración de análisis espacial, comparación técnica y propuesta escalonada constituye el logro principal de los hallazgos en comparación con los de la literatura reciente.

El estudio también, finalmente, tiene relevancia para la planificación urbana y la gestión pública local. En este sentido, la propuesta desarrollada es congruente con la necesidad de articular la gestión pluvial con los instrumentos locales de ordenamiento ecológico y territorial del municipio, que reconocen la importancia de orientar el crecimiento urbano conforme a las limitaciones y capacidades ambientales del territorio (Honorable Ayuntamiento de Pachuca de Soto, Hidalgo, & Universidad Autónoma Chapingo, 2020).

Con base en la información generada, se anticipa que las reglas y regulaciones de los sistemas municipales y de aguas pluviales deben reconocer de manera más amplia la heterogeneidad edafológica y la conectividad vial de la escorrentía superficial.

El enfoque escalonado preparado para la Zona Plateada proporciona una estructura científicamente respaldada para la priorización de recursos, alivio de la carga de sobrecarga de la red actual y promoción de medidas preventivas de nuevas (Coordinación General de Planeación y Proyectos [UPLAPH], 2024).

Se necesitan estudios futuros sobre pruebas detalladas de conductividad hidráulica, calibración con resultados observados y diseño de ejecución detallado, pero los resultados de su análisis son suficientes respecto del éxito general para abogar por la adopción de una solución híbrida, territorializada y en progreso, en lugar de un enfoque regular en una reiteración de medidas convencionales de infiltración.

CONCLUSIONES

El estudio encontró que las soluciones convencionales basadas en la infiltración, derivadas de estos datos, no pudieron resolver directamente el problema del agua de lluvia en la Zona Plateada. Las condiciones edafológicas del sitio —suelos Phaeozem con horizontes pedregosos y un subsuelo de toba volcánica no fracturada— llevaron a una infiltración muy reducida hacia las profundidades y orientaron la consideración de la gestión del agua de lluvia hacia la recolección, la detención, el almacenamiento interino y la liberación regulada.

El uso de análisis espacial, evaluación multicriterio, validación de campo y modelado hidrológico permitió una interpretación territorialmente diferenciada del problema. A partir de esto, fue posible determinar sectores con diferentes niveles de exposición al riesgo, apreciar su función en el sistema de escorrentía y desarrollar un diseño de intervención escalonado adecuado tanto a las características urbanas como a las físicas de la región estudiada.

En este sentido, la contribución metodológica a nuestro trabajo fue la conversión de un diagnóstico general de inundaciones en estrategias de intervención, determinadas según criterios claramente definidos de prioridad, viabilidad y rendimiento hidráulico.

Los hallazgos indicaron que las alternativas de detención cubierta, almacenamiento subterráneo y transporte controlado resultaban más robustas que los métodos convencionales de infiltración tras someterlos a eventos más severos.

La principal contribución del manuscrito fue demostrar que, en condiciones urbanas, debido a limitaciones en la infiltración, la eficiencia del drenaje urbano sostenible no era tanto una función de la infiltración profunda como un resultado de la coordinación entre las medidas complementarias. La cadena jerárquica de recolección distribuida, pretratamiento, laminación, almacenamiento temporal y descarga diferida presentó un esquema organizado para rediseñar el sistema de gestión de lluvias en la Zona Plateada.

En este sentido, el estudio ofreció no solo una comparación de dispositivos, sino también un medio para organizar funcionalmente el sistema de agua de lluvia, lo que facilitó la correlación entre el análisis técnico y una solución territorialmente relevante. Prácticamente, la investigación proporcionó una valiosa base técnica para dirigir la gestión del agua de lluvia en una ciudad de tamaño medio en el centro de México con expansión urbana acelerada, extensas conexiones viales y severas limitaciones edafológicas.

La propuesta por fases permitió priorizar el sector más afectado, fortalecer la zona de comportamiento intermedio y tomar una medida preventiva en un área que había crecido recientemente, lo que contribuyó a elevar su valor para la gestión pública local.

En resumen, la Zona Plateada evidenció el fracaso del modelo de infiltración para adaptarse al contexto local. La investigación reveló que la transición hacia una gestión resiliente del agua de lluvia no significaba abandonar el método SUDS, sino territorializarlo, reducirlo y plantearlo como infraestructura convencional cuando las condiciones físicas en ese sitio lo requerían. En este sentido, el estudio proporcionó una referencia metodológica y operativa para otras ciudades de tamaño medio que

atraviesan procesos comparables de impermeabilización, de vulnerabilidad a la escorrentía y de limitaciones edafológicas.

REFERENCIAS

Addo-Bankas, O., Wei, T., Zhao, Y., Bai, X., Esteve Núñez, A., & 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>

Al Amin, M. B., Sujono, J., & Triatmadja, R. (2025). Enhancing urban stormwater resilience through lot-scale outlet strategies. *Environmental Challenges*, 21, 101372. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101372>

Ambily, P., Chithra, N. R., & Mohammed Firoz, C. (2024). A framework for resilient urban pluvial-flood spatial planning through blue-green infrastructure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 103, 104342. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104342>

Anaya Espinoza, J. L. (2017). Calibración de los parámetros hidrológicos en la subcuenca del río Quilcay empleando los modelos del Soil Conservation Service (SCS) y Snyder [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <https://hdl.handle.net/20.500.12404/9250>

Ayoubi Ayoublu, S., Vafakhah, M., & Pourghasemi, H. R. (2024). Efficiency evaluation of low-impact development practices on urban flood risk. *Journal of Environmental Management*, 356, 120467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120467>.

Ayuntamiento de Pachuca de Soto. (2025). Plan Municipal de Desarrollo 2024-2027. <https://datos.pachuca.gob.mx/docs/PMD-2024-2027.pdf>

Barranco-Mejía, N. (2024). Gestión de las aguas pluviales y sustentabilidad urbana. Una revisión. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 15(3), 423–460. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-03-10>

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>

Cerrato Torres, L. H. (2020). Sistemas urbanos de drenajes sostenibles [Trabajo de fin de máster, Universidad de Alcalá]. https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/44050/TFM_Cerrato_Torres_2020.pdf?sequence=1

Chen, B., & Chui, T. M. F. (2025). A review on implementing sustainable drainage systems in sloping environments: Understanding, approaches, and opportunities. *Journal of Hydrology*, 661, 133577. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133577>

Chen, Y., & Gaspari, J. (2023). Exploring an integrated system for urban stormwater management: A systematic literature review of solutions at building and district scales. *Sustainability*, 15(13), 9984. <https://doi.org/10.3390/su15139984>

CIRIA. (2015). The SuDS manual (C753). Construction Industry Research and Information Association. https://www.ciria.org/CIRIA/Books/Free_publications/C753F.aspx

Comisión Nacional del Agua. (2017). Manual de drenaje pluvial urbano. Comisión Nacional del Agua. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro20.pdf>

Coordinación General de Planeación y Proyectos (UPLAPH). (2024, abril 15). Actualización del Programa de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial de la Zona Metropolitana de Pachuca.

Sistema de Análisis de Impacto Regulatorio del Estado de Hidalgo.
<https://sair.hidalgo.gob.mx/Mir/DetallePublico/1843>

Cotler, H., Lara, J. A., Cram, S., Guevara, A., Galván, E. L., Ramírez, A., & Núñez, J. M. (2022). Assessment of unintended effects of ditches on ecosystem services provided by Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park, Mexico. *Acta Universitaria*, 32, e3647. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3647>

El Universal Hidalgo. (2024, julio 10). El 80% de las inundaciones en la metrópoli se deben a taponamientos de basura en las coladeras. *El Universal Hidalgo*. <https://www.eluniversalhidalgo.com.mx/metropoli/el-80-de-las-inundaciones-en-la-metropoli-son-por-taponamientos-de-basura-en-coladeras/>

Fappiano, F., Maurer, M., & Leitão, J. P. (2025). Blue-green infrastructure for pluvial flood risk reduction in rapidly urbanizing peri-urban areas: Strategic planning for uncertain futures. *Journal of Environmental Management*, 395, 127843. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127843>

Ferreira, C. S. S., Potočki, K., Kapović-Solomun, M., & Kalantari, Z. (2021). Nature-based solutions for flood mitigation and resilience in urban areas. In C. S. S. Ferreira, Z. Kalantari, T. Hartmann, & P. Pereira (Eds.), *Nature-based solutions for flood mitigation (The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 107)*. Springer. https://doi.org/10.1007/698_2021_758

Han, Y., Wu, X.-L., Liu, Q., Wang, R., & Cao, L. (2026). Comprehensive characterization and evaluation of coupled LID system responses to extreme rainfall events. *Urban Climate*, 66, 102835. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102835>

Honorable Ayuntamiento de Pachuca de Soto, Hidalgo, y Universidad Autónoma Chapingo. (2020). Programa de Ordenamiento Ecológico Local de Pachuca de Soto, Hidalgo. https://datos.pachuca.gob.mx/sipot/1/PDFS/Programa_de_Ordenamiento_Ecologico_Local_de_Pachuca_de_Soto.pdf

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>

Huq, M. E., López-Carr, D., Mohd Isa, N. K., Mahat, H., Ibrahim, M. H., Nayan, N., Muhamad -Ismail, M. I., Jumadi, J., Hossain, M. K., Islam-Sarker, M. N., Wu, X., Hossain, M. S., AbalKhail, A. A., & Almutlaq, F. (2026). Emerging insights into low-impact development (LID) strategy for urban flood resilience under climate change. *Environmental Development*, 58, 101430. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2026.101430>

Maglia, N., & Raimondi, A. (2025). A new approach on design and verification of integrated sustainable urban drainage systems for stormwater management in urban areas. *Journal of Environmental Management*, 373, 123882. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123882>

Medina Piza, D. L., Aguilar-Rojas, L. Y., & Calderón-Gómez, A. (2018). Análisis comparativo de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): Caso de estudio de las carreras 4 y 5 entre las calles 68 y 71, en el sector Chapinero Alto, Bogotá, Colombia [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22379/1/TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>

Moreno Pulido, P. A., Roa Granja, L. J., & Vela Prieto, S. J. (2021). Análisis para la implementación de un sistema urbano de drenaje sostenible que mitigue el riesgo de rebosamiento del alcantarillado en el

barrio Santa Cecilia de la localidad de Suba [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad Piloto de Colombia. <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/10917>

Murali, K. V., Srinivasan, K., & Nayana, M. D. (2025). Urban flood risk under climate change: Modeling and LID-based solutions. *Cornous Environmental Sciences*, 2(1), 11–21. <https://doi.org/10.37446/ces/ra/2.1.2025.11-21>

Pachouri, V., Kothari, P., Kathuria, S., Gehlot, A., Singh, R., Thakur, A. K., Gupta, L. R., Dogra, S., Priyadarshi, N., & Mohamed, H. G. (2025). Revolutionizing urban water resilience: Innovative strategies and advancements in sustainable urban drainage systems (SuDS). *Desalination and Water Treatment*, 323, 101407. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101407>

Pérez Hurtado, O. F. (2020). Uso de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en el municipio de Paipa [Trabajo de pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio Institucional UPTC. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/8865>

Rico, J. L. (2025, junio 4). En Pachuca, ¿qué colonias se inundan y cuáles no, según vecinos? Periódico AM. <https://www.am.com.mx/zona-metropolitana/2025/06/04/en-pachuca-que-colonias-se-inundan-cuales-no-segun-vecinos-742028.html>

Sabbagh, M., Browne, D., Pickering, L., Lintern, A., & Winfrey, B. (2025). Urban stormwater bioretention reduces runoff and improves water quality: A global meta-analysis of field studies. *Journal of Hydrology*, 663, 134163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134163>

Shrestha, B. B., Rasmy, M., Tamakawa, K., Joshi, S., & Kuribayashi, D. (2025). Impact of urbanization on flooding and risk based on hydrologic–hydraulic modeling and analytic hierarchy process: A case of Kathmandu Valley of Nepal. *Hydrology*, 12(11), 283. <https://doi.org/10.3390/hydrology12110283>

Wen, F., Rong, Q., Gu, Z., Xie, Y., & Su, M. (2025). Urban flooding risk assessment and mitigation strategies based on optimal allocation of low-impact development facilities. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106652. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106652>

Xu, W., Guo, X., Proverbs, D. G., & Han, P. (2026). A GIS-based multi-criteria decision analysis of urban flood risk. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 44(3), 638–657. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-11-2024-0233>

Ye, C., Gao, J., Nachabe, M., Charkhgard, H., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2025). Optimization of green and grey infrastructure to enhance the performance of the urban drainage system under future conditions. *Journal of Environmental Management*, 376, 124518. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124518>

You, J., Wang, S., Ha, M., Kang, A., Lei, X., Chen, B., Yu, Y., & Chai, B. (2025). Comparative hydrologic performance of cascading and distributed green-gray infrastructure: Experimental evidence for spatial optimization in urban waterlogging mitigation. *Journal of Hydrology*, 662, 133979. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133979>

Zhou, Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water*, 6(4), 976–992. <https://doi.org/10.3390/w6040976>

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 