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) 172-187

Evaluación mediante simulación de estrategias de infraestructura verde frente al riesgo de inundación local en Mineral de la Reforma, Hidalgo

Evaluating green infrastructure strategies for local flood risk mitigation through simulation in Mineral de la Reforma, Hidalgo

I. Ramírez-Flores [a], E. R. Sánchez-Rojas [a,*], L. Lizárraga-Mendiola [a]

[a]*Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Instituto de Ciencias Básicas E Ingenierías, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.*

Resumen

El cambio climático y la urbanización acelerada han intensificado los eventos de inundación en Mineral de la Reforma, Hidalgo. Este estudio evalúa, mediante el software Storm Water Management Model (SWMM), la viabilidad de implementar Infraestructura Verde (jardines de lluvia, pavimentos permeables y zanjas de infiltración) como estrategia de mitigación en una zona crítica con un 95% de impermeabilidad. Los resultados de la simulación para un periodo de retorno de 10 años muestran una reducción del 9.59% en el caudal máximo, demostrando el potencial de la infraestructura verde para ayudar a recuperar procesos hidrológicos naturales. No obstante, la efectividad de estas soluciones depende del mantenimiento de la red de drenaje existente y de la validación *in situ* de las tasas de infiltración del suelo. Se concluye que la integración de infraestructura verde es técnicamente viable para fortalecer la resiliencia hídrica local frente a eventos pluviales extraordinarios. Debido a que el modelo hidrológico se desarrolló mediante simulación numérica utilizando parámetros obtenidos de bibliografía especializada y criterios técnicos de diseño, sin contar con una calibración y validación mediante eventos hidrológicos históricos observados en la zona de estudio, los resultados deben interpretarse como una evaluación exploratoria del potencial de la infraestructura verde para reducir la escorrentía superficial. En consecuencia, existe un grado de incertidumbre inherente que deberá reducirse mediante futuras campañas de monitoreo y calibración del modelo.

Palabras clave: Ciudades impermeables, Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, Gestión hídrica, Resiliencia urbana.

Abstract

Climate change and accelerated urbanization have intensified flooding events in Mineral de la Reforma, Hidalgo. This study evaluates, through the Storm Water Management Model (SWMM) software, the feasibility of implementing Green Infrastructure—such as rain gardens, permeable pavements, and infiltration trenches—as a mitigation strategy in a critical area with 95% imperviousness. Simulation results for a 10-year return period show a 9.59% reduction in peak flow, demonstrating the potential of green infrastructure to help restore natural hydrological processes. However, the effectiveness of these solutions depends on maintaining the existing drainage network and in situ validation of soil infiltration rates. It is concluded that integrating green infrastructure is technically feasible for strengthening local water resilience against extreme rainfall events. Since the hydrological model was developed through numerical simulation using parameters obtained from specialized literature and technical design criteria, without calibration and validation against observed historical hydrological events in the study area, the results should be interpreted as an exploratory assessment of the potential of green infrastructure to reduce surface runoff. Consequently, there is an inherent degree of uncertainty that should be reduced through future monitoring campaigns and model calibration.

Keywords: Impervious Cities, Sustainable Urban Drainage Systems, Water Resource Management, Urban Resilience

1. Introducción

*Autor para la correspondencia: sa379767@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: sa379767@uaeh.edu.mx (Erik Rogelio Sánchez-Rojas), ra434599@uaeh.edu.mx (Armando Iván Ramírez-Flores), mendiola@uaeh.edu.mx (Liliana Lizárraga-Mendiola)

Historial del manuscrito: recibido el 07/06/2026, última versión-revisada recibida el 26/08/2026, aceptado el 08/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18094

El crecimiento urbano acelerado registrado desde la segunda mitad del siglo XX ha transformado drásticamente los territorios, ocupando espacios naturales y generando graves impactos en los ecosistemas. Este desarrollo, caracterizado por una planificación a menudo insuficiente, ha derivado en la pérdida de biodiversidad y en el deterioro generalizado de la calidad de vida. La situación es especialmente crítica en los países en desarrollo, donde la urbanización ha avanzado sin criterios de sostenibilidad. En América Latina, por ejemplo, el 77% de la población reside en ciudades, lo que intensifica la presión sobre los recursos hídricos y los sistemas de drenaje (CEPAL, 2022). Esta expansión ha alterado las condiciones hidrológicas de las cuencas, reduciendo la capacidad de infiltración del suelo y aumentando los escurrimientos superficiales, lo que obliga a realizar inversiones cada vez mayores en infraestructura convencional —gris— (Banco Mundial, 2026).

En el mundo, las zonas metropolitanas enfrentan los mayores desafíos debido a su alta densidad poblacional y la prevalencia de superficies impermeables. Eventos recientes subrayan esta vulnerabilidad; en México, en septiembre de 2021, en la localidad de Tula de Allende y otros municipios del Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, sufrieron inundaciones severas debido al desbordamiento del río Tula, exacerbadas por la descarga de los sistemas de desagüe de la Ciudad de México y la saturación de la infraestructura existente (Vargas-Martínez et al., 2025). De igual forma, durante 2024, la región de Chalco experimentó inundaciones significativas debido a lluvias intensas y a la pérdida de capacidad del sistema de drenaje en áreas históricamente lacustres (Rivera-González, 2026).

Ante este escenario, surge la necesidad de implementar estrategias de resiliencia que operen en conjunto con la infraestructura convencional. El Banco Mundial (2026) destaca que la inversión en infraestructura resiliente (híbrida: gris + verde) genera un "triple dividendo": evita pérdidas por desastres, crea empleos y reduce el riesgo financiero para futuras inversiones. La Infraestructura Verde (IV) se enfoca en preservar y restaurar espacios naturales para mejorar los servicios ecosistémicos (Chapman y Hall, 2022), mientras que la Infraestructura Azul optimiza la gestión del agua mediante técnicas de infiltración, almacenamiento y retención (Liu et al., 2025). Estas soluciones, conocidas globalmente como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS; Maglia y Raimondi, 2025) o Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN; Kasprzyk et al., 2025), han demostrado su eficacia en diversos contextos.

Las ventajas de estos tipos de infraestructura resiliente se han demostrado en diversos contextos urbanos y con enfoques distintos. Por ejemplo, Chapman y Hall (2022) analizaron una zona urbana en Inglaterra, donde midieron la capacidad de la IV bajo diferentes escenarios de desarrollo y diseños urbanos; además, emplearon distintas métricas para cuantificar su capacidad para proveer servicios ecológicos, su estado ecológico, su conectividad ecológica y su proximidad a la población, con buenos resultados. En China se realizó una evaluación de la resiliencia global en la que se aplicó una metodología adaptada para medir la capacidad de la infraestructura híbrida verde-gris-azul para mitigar inundaciones cuando el software convencional no puede proporcionar resultados confiables (Liu et al., 2025). Los autores simularon eficientemente condiciones en las que es posible determinar la relación entre el área y el potencial de inundación, lo que favorece la formulación de estrategias de gobernanza para prevenir eventos que afecten la infraestructura. Otras alternativas han contemplado estrategias de IV resilientes con fines mixtos: la captación de agua de lluvia para autoconsumo y, al mismo tiempo, la infiltración del agua en el subsuelo como estrategia de reducción de inundaciones, lo que ha dado buenos resultados en eventos climáticos frecuentes (periodos de retorno de 2 años) (Maglia y Raimondi, 2025). La versatilidad de estas estrategias radica en que pueden adaptarse a entornos urbanos ya construidos, como estacionamientos, áreas verdes (parques y jardines), vialidades secundarias, azoteas y muros de edificaciones, entre otros (Kasprzyk et al., 2025).

Para evaluar la viabilidad de estas alternativas como estrategias de resiliencia en contextos urbanos con problemas de inundación, es importante contar con modelos numéricos que permitan analizar hidrológicamente la infraestructura hidráulica existente y su capacidad frente a eventos climáticos recurrentes. Entre las alternativas internacionalmente más conocidas y de libre acceso se encuentra el software SWMM (Storm Water Management Model), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. En un estudio realizado en Marruecos, se evaluó la efectividad del plan de desarrollo urbano de una localidad para mitigar la escorrentía de aguas pluviales y la contaminación (Essamlali et al., 2024). En otro estudio desarrollado en Brasil, se consideraron estrategias de IV, tales como pavimentos permeables, sistemas de biorretención, zanjas de infiltración y sistemas de captación de agua de lluvia, implementados tanto en áreas públicas como en privadas, lo que ayudó a los técnicos a tomar decisiones informadas (Fonseca-Alves et al., 2022).

Estas experiencias internacionales demuestran que la versatilidad de la IV es un área de oportunidad en zonas urbanas con crecimiento desordenado y falta de estrategias operativas eficientes para reducir los problemas de inundación asociados a las lluvias estacionales.

La relevancia de la infraestructura verde radica en su multifuncionalidad en la matriz urbana (SEDATU, 2019). Más allá de proveer conectividad ecológica o espacios recreativos, estas áreas naturales y seminaturales aportan servicios ecosistémicos críticos que complementan las estrategias locales de mitigación y adaptación al cambio climático.

Este estudio evalúa la eficacia técnica de la infraestructura verde (IV) para mitigar las inundaciones en una zona urbana vulnerable, afectada por su topografía y por el desbordamiento del río local. A través de una simulación hidráulica en el software SWMM, se determinan los criterios de diseño adecuados para proponer alternativas resilientes. La investigación se centra en el uso descentralizado de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) para reducir el volumen de escorrentía que requiere bombeo mecánico, abordando de forma integral los severos desafíos del relieve urbano.

La principal contribución de este trabajo consiste en evaluar de manera integrada diferentes estrategias de infraestructura verde aplicadas a una zona urbana específica con alta impermeabilización y antecedentes de inundaciones recurrentes en el estado de Hidalgo. A diferencia de estudios previos enfocados principalmente en la evaluación individual de tecnologías LID, esta investigación analiza su implementación conjunta mediante simulación hidrológica

utilizando condiciones locales, aportando información útil para apoyar la toma de decisiones en materia de planeación urbana y gestión del riesgo por inundaciones.

En la siguiente sección, se describen los principales criterios utilizados para seleccionar la infraestructura verde aplicable a la zona de estudio.

2. Tipos de infraestructura verde aplicables

La infraestructura verde (IV) es una estrategia de planificación territorial y urbana basada en una red de espacios naturales y seminaturales diseñados para conservar la biodiversidad y proporcionar servicios ecosistémicos que benefician a la sociedad. La investigación científica ha demostrado que la infraestructura verde contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental, la resiliencia climática y el bienestar humano.

La infraestructura verde ha evolucionado desde un concepto centrado en la conservación del paisaje hasta convertirse en un enfoque científico para la planificación territorial y urbana sostenible. Las redes de espacios naturales y seminaturales mejoran la conectividad ecológica, fortalecen la resiliencia de los ecosistemas y proporcionan múltiples servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano. La infraestructura verde debe entenderse como una red integrada y multifuncional, cuya eficacia aumenta cuando es planificada de manera estratégica y no como un conjunto aislado de espacios verdes.

Una de las principales aportaciones científicas de la infraestructura verde consiste en demostrar su capacidad para suministrar simultáneamente servicios ecosistémicos de regulación, soporte, provisión y carácter cultural. Revisiones sistemáticas que analizaron cerca de 200 investigaciones concluyen que la infraestructura verde contribuye a mejorar la regulación del clima urbano, la calidad del aire, la infiltración del agua, la conservación de la biodiversidad y los espacios destinados a la recreación y la salud pública. Además. La evaluación conjunta de múltiples servicios ecosistémicos representa una prioridad para optimizar la planificación ambiental y urbana.

La selección de jardines de lluvia, jardines de microcuenca, zanjas de infiltración y pavimentos permeables respondió a las condiciones físicas existentes dentro del área de estudio. Los jardines de lluvia fueron considerados por la disponibilidad de áreas verdes susceptibles de intervención; las zanjas de infiltración por la presencia de camellones y derechos de vía; los pavimentos permeables por la existencia de vialidades con tránsito ligero; mientras que los jardines de microcuenca fueron seleccionados debido a su capacidad para favorecer la infiltración y disminuir la velocidad del escurrimiento superficial antes de alcanzar el canal principal.

Para abordar los desafíos de inundaciones y gestión hídrica en la zona de estudio, se proponen las siguientes estrategias basadas en infraestructura verde (IV), analizadas desde un enfoque hidrológico e hidráulico (Tabla 1):

Tabla 1: Clasificación y criterios de selección de soluciones de IV (tomado de: IMPLAN, 2020)

Estrategia	Función hidrológica	Mecanismo hidráulico	Aplicabilidad en la zona
Jardin de microcuenca	Retención del 15% al 30% de la lluvia intensa; recarga de acuíferos.	Filtración biológica mediante sustratos y plantas; remoción de nutrientes.	Áreas cercanas a cuerpos de agua o a escurrimientos contaminados.
Jardín de lluvia (Bioretención)	Retención del 40-80% según la intensidad; reducción de los picos.	Infiltración gradual y disminución de la velocidad de la escorrentía superficial.	Zonas urbanas densas, espacios públicos y áreas de mitigación de calor.
Zanja de infiltración	Reducción de la escorrentía directa y recarga *in situ*.	Almacenamiento temporal en zanjas rellenas con material granular poroso.	Vialidades con pendientes moderadas y bordes de los caminos.
Pavimento permeable	Capacidad de infiltración de 120 a 300 L/m² (vacíos del 15 al 25%).	Permite el paso del agua hacia el suelo mediante una estructura porosa.	Banquetas, andadores y calles de tráfico ligero en la zona urbana.

La infraestructura verde ha surgido como una estrategia basada en procesos naturales para restaurar parcialmente el funcionamiento hidrológico previo a la urbanización. A diferencia de la infraestructura gris, cuyo objetivo principal consiste en evacuar rápidamente el agua de lluvia mediante tuberías y canales, la infraestructura verde promueve la infiltración, el almacenamiento temporal, la evapotranspiración y la recarga de acuíferos, reduciendo el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial. Estas funciones permiten disminuir la presión sobre las redes de drenaje y reducir el riesgo de inundaciones durante eventos de precipitación intensa (Prudencio & Null, 2018; Krivtsov, 2025).

Además de sus beneficios hidráulicos, la infraestructura verde proporciona múltiples servicios ecosistémicos que incrementan la resiliencia urbana. Entre ellos destacan la mejora de la calidad del agua mediante procesos de filtración y retención de contaminantes, la reducción del efecto de isla de calor por evapotranspiración, la captura de carbono atmosférico, la conservación de la biodiversidad, la generación de espacios recreativos y el mejoramiento del paisaje urbano. Esta multifuncionalidad representa una ventaja importante respecto a la infraestructura gris convencional, ya que una misma intervención puede generar beneficios ambientales, sociales y económicos de manera simultánea.

La infraestructura verde comprende una red planificada de espacios naturales y seminaturales, diseñada y gestionada para proporcionar servicios ecosistémicos, mejorar la biodiversidad y aumentar la resiliencia de las ciudades frente al cambio climático. Su funcionamiento adecuado depende no solo de un diseño apropiado, sino también de un programa de mantenimiento continuo que garantice la conservación de sus funciones ecológicas, hidrológicas y sociales (Ying et al., 2022).

A diferencia de la infraestructura gris, cuyos componentes permanecen prácticamente invariables, la infraestructura verde

está conformada por organismos vivos y procesos ecológicos dinámicos, por lo que su desempeño depende directamente del estado de la vegetación, el suelo y las condiciones ambientales (Ying et al., 2022).

El mantenimiento debe concebirse como una estrategia preventiva y no únicamente correctiva. Cuando las actividades de conservación se realizan de manera periódica, la infraestructura mantiene su capacidad para infiltrar agua, regular la temperatura, capturar contaminantes y sostener comunidades vegetales saludables. En cambio, la ausencia de mantenimiento ocasiona disminución de la cobertura vegetal, compactación del suelo, obstrucción de los sistemas de drenaje, pérdida de biodiversidad y reducción significativa de los servicios ecosistémicos que originalmente motivaron su construcción (Purumal et al., 2021; Knapik et al., 2023).

Uno de los componentes más importantes del mantenimiento corresponde al manejo de la vegetación. Esta actividad comprende la poda sanitaria y de formación de árboles, arbustos y herbáceas, con el propósito de eliminar ramas secas o enfermas, mejorar la estabilidad estructural de las plantas, favorecer su crecimiento y evitar riesgos para la población o interferencias con redes eléctricas, luminarias, vialidades o edificaciones (Purumal et al. 2021). En los parques urbanos y corredores verdes también se realizan podas para mantener la visibilidad, facilitar el tránsito peatonal y conservar las características paisajísticas del sitio. La literatura indica que las podas deben efectuarse considerando el ciclo biológico de cada especie, ya que intervenciones excesivas pueden disminuir la capacidad fotosintética, incrementar la susceptibilidad a plagas y reducir la captura de carbono (Minixhofer y Stangl, 2021)

Otra práctica habitual consiste en la reposición de vegetación. Durante los primeros años posteriores a la construcción de una infraestructura verde es común que algunas especies no sobrevivan debido al estrés hídrico, condiciones edáficas desfavorables o eventos climáticos extremos. Por ello, las investigaciones recomiendan realizar inspecciones periódicas para identificar individuos muertos o con bajo desarrollo y sustituirlos por ejemplares de la misma especie o por especies mejor adaptadas a las condiciones locales (Ferrini et al. 2017) Esta actividad permite mantener la cobertura vegetal originalmente diseñada y evitar espacios desnudos que favorezcan la erosión o la colonización por especies invasoras.

Esta combinación es particularmente viable en el contexto urbano de la zona de estudio, donde la heterogeneidad del uso del suelo permite integrar tanto la captación pluvial en zonas residenciales como los pavimentos permeables en vialidades secundarias y los jardines de lluvia en espacios públicos. Al evaluar estas alternativas mediante modelos hidrodinámicos como el SWMM, es posible optimizar su diseño y su ubicación espacial, asegurando que la reducción de las inundaciones no sea solo puntual, sino también sostenible.

3. Descripción del área de estudio

Mineral de la Reforma se localiza en el centro del estado de Hidalgo, como se aprecia en la Figura 1. Se localiza en el centro del territorio hidalguense, entre los paralelos 19°58’ y 20°09’ de latitud norte y los meridianos 98°39’ y 98°47’ de longitud oeste (ubicación entre estas 2 coordenadas, georreferenciadas en Google maps), con una altitud de entre 2400 y 2900 m.s.n.m. Este municipio tiene una superficie de 112.50 km² y representa el 0.54% de la superficie del estado (INEGI, 2025).

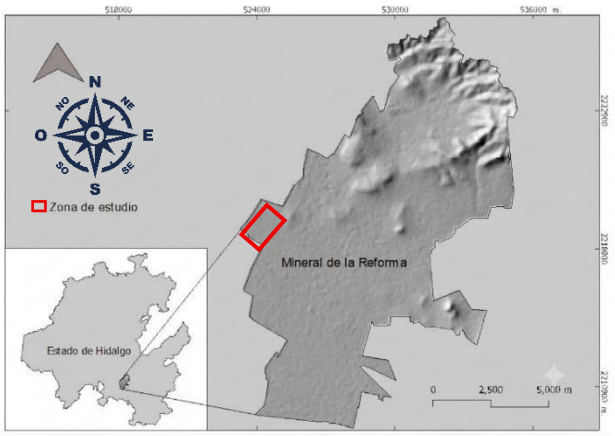


Figura 1: ubicación de Mineral de la Reforma, Hidalgo.

3.1 Descripción de la problemática local

A nivel metropolitano, se han identificado sectores con alta susceptibilidad a inundaciones, entre ellos la zona sur de la ciudad, una de las más críticas, esto debido a la precaria infraestructura que se tiene en la zona, además de la mala cultura de la sociedad de tirar basura en calles, ocasionando el taponamiento de alcantarillas y desagües, además de esto, la ubicación, topografía y geografía del lugar afecta a la zona debido a que todo el escurrimiento que capta el rio aguas arriba se junta a lo largo de su trayecto, ocasionando mayor caudal y mayor altura, aunado a esto, se debe mencionar que en esta zona hay una transición de un rio de la avenidas hecho con concreto a uno de tierra natural, disminuyendo el coeficiente de Manning y por ende la velocidad del caudal . Dentro de este contexto, la colonia Los Tuzos (Figura 2) se ha seleccionado como el área de estudio principal debido a una condicionante física determinante: su cota de terreno se ubica 1.5 metros por debajo del nivel de la obra hidráulica encargada de conducir los excedentes hacia el cauce natural del río.

La selección de la colonia Los Tuzos como caso de estudio se fundamenta en la recurrencia de eventos de inundación registrados durante temporadas de lluvia, así como en las condiciones topográficas que favorecen la acumulación de escurrimientos superficiales. La combinación entre alta impermeabilización, deficiencias del drenaje pluvial y baja capacidad de desalojo hidráulico incrementa significativamente la vulnerabilidad de esta zona frente a eventos de precipitación intensa. Se recomienda que investigaciones futuras incorporen información cuantitativa sobre frecuencia, duración y daños ocasionados por las inundaciones para fortalecer la caracterización del riesgo.



Figura 2: Ubicación del área de estudio. En color verde se resalta la localización de la obra hidráulica (canal orientado en dirección NO-SE)

Esta configuración topográfica genera una dependencia crítica del bombeo o de la eficiencia del sistema de drenaje para evitar inundaciones prolongadas. El sistema de drenaje superficial existente se compone de un canal artificial orientado en dirección noroeste–sureste (NO-SE), cuya función principal es interceptar y conducir la escorrentía superficial generada en las vialidades y áreas urbanizadas circundantes hacia el cauce receptor. Este canal constituye el principal elemento hidráulico de desalojo en el sector estudiado debido a la ausencia de una red pluvial independiente. Durante el reconocimiento de campo se observó que presenta deterioro físico asociado a la acumulación de sedimentos, residuos sólidos urbanos y vegetación espontánea, lo que reduce su capacidad hidráulica efectiva. Estas condiciones incrementan las pérdidas locales de carga y favorecen procesos de desbordamiento durante eventos de precipitación intensa, lo que aumenta el riesgo de inundación en zonas topográficamente deprimidas.

3.2 Clima

El régimen climático dominante en el municipio es el semiárido templado, que abarca el 93.27% de la superficie territorial. Esta variante se distingue por veranos cálidos y una marcada estacionalidad pluvial, con una precipitación media anual de 581.4 mm. La actividad pluvial se concentra principalmente entre mayo y septiembre, mientras que las precipitaciones invernales son marginales y representan únicamente el 4.5% del volumen anual total (INEGI, 2025). En cuanto al perfil térmico, la temperatura media anual se sitúa en 17.5 °C, **con una oscilación de 6.7 °C**; el periodo de marzo a septiembre registra promedios entre 18 y 20 °C, alcanzando su valor máximo en mayo, con una media de 20.5 °C (INEGI, 2025).

3.3 Tipo de suelo

El sustrato predominante en el área de estudio corresponde a un suelo tipo Phaeozem Háplico, caracterizado por su alto contenido de materia orgánica y su versatilidad topográfica al presentarse en diversos niveles de pendiente. Desde una perspectiva física, se consideran suelos de profundidad media (entre 40 y 100 cm), con alta capacidad para sostener diversos tipos de vegetación y marcada aptitud agrícola, especialmente en las regiones centro y sur del municipio (INEGI, 2025). No obstante, debe tenerse en cuenta que cuando estos suelos se ubican en zonas densamente urbanizadas, su sellado les confiere impermeabilidad y los vuelve susceptibles a inundaciones (Cram et al., 2008).

3.4 Usos de suelo

Como se ilustra en la cartografía de uso actual del suelo (Figura 3), existe una marcada incompatibilidad territorial derivada del crecimiento industrial y urbano. La proliferación de zonas habitacionales, el equipamiento de servicios y la ocupación de los derechos de vía han fragmentado la vegetación circundante. La sustitución de estas áreas naturales por superficies impermeables actúa como factor común de impermeabilización en los alrededores, disminuyendo el porcentaje de infiltración pluvial y provocando un aumento significativo de la escorrentía durante la época de lluvias.

Adicionalmente, el análisis del uso del suelo (Figura 3) revela una marcada fragmentación urbana, manifestada en 412.92 hectáreas de lotes baldíos que generan significativos vacíos al interior de la ciudad. Si bien estos espacios representan el 3.71% de la superficie total del término municipal, su verdadero impacto se multiplica al considerar que el área urbanizada de Mineral de la Reforma constituye solo el 17.22% del territorio (INEGI, 2025). Esta dispersión del tejido urbano perpetúa zonas desestructuradas que complican la gestión del escurrimiento superficial en la periferia, como es el caso de estudio.

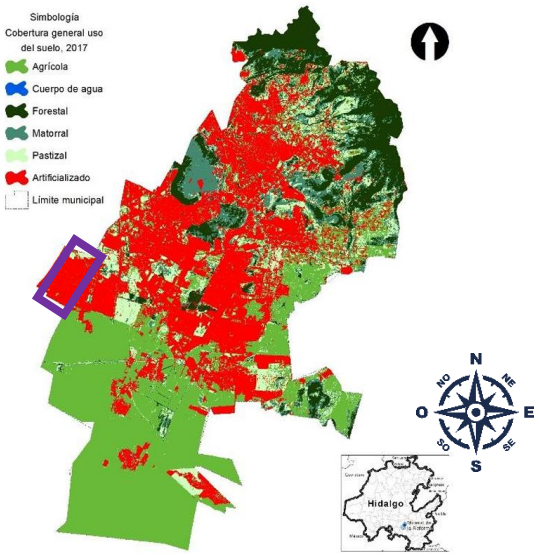


Figura 3: Urbanización de nuestra área de estudio.

El diagnóstico local del área de estudio incluye la identificación de las zonas más propensas a inundaciones. A través de la cartografía de vulnerabilidad (Figura 4 y figura 5), se analizan los puntos críticos expuestos a inundaciones recurrentes, lo que además permite discriminar con precisión

aquellos sectores que, por sus condiciones topográficas o de ubicación, se encuentran exentos de afectaciones.

En la figura 4 muestra la topografia del area de estudio, esta muestra las curvas de nivel las cuales muestran zonas mas altas que otras, ocasionando que el escurrimiento en epoca de lluvias siga ese recorrido, juntandose todo este en el canal que sirve de drenaje pluvial el cual se muestra en la zona de color rojo.



Figura 4: Topografía de la zona de estudio



Zona 0% vulnerable

Zona 50% vulnerable

Zona 100% vulnerable

Figura 5: Zonas de riesgo

Las resientes lluvias en la zona muestran la seriedad del problema de anegaciones por lluvias en la zona, en la figura 6, 7 y 8 se muestran fotografías de la zona de estudio en tiempos de lluvia cuando esta es abundante y prolongada, esto afecta al comercio local y la movilidad de las personas debido al peligro que es caminar por la zona, mencionan locatarios lo difícil que es caminar por la posible caída en alcantarillas destapadas (el sol de Hidalgo, 2024)



Figura 6: Anegamientos en la zona de estudio (el sol de Hidalgo, 2024)



Figura 7: Anegamientos en la zona de estudio (el universal de Hidalgo, 2024)



Figura 8: Anegamientos en la zona de estudio (la silla rota, 2025)

La clasificación de vulnerabilidad presentada se construyó considerando variables topográficas, la cercanía al canal principal, la dirección preferencial del flujo y los antecedentes históricos de inundación. La categoría de 0 % vulnerable corresponde a zonas ubicadas en elevaciones superiores o alejadas de las principales trayectorias de escurrimiento. La categoría de 50 % de vulnerabilidad corresponde a sectores con una susceptibilidad moderada. Finalmente, la categoría 100 % vulnerable identifica áreas críticas ubicadas en depresiones topográficas o en sectores donde convergen los flujos superficiales.

3.5 Delimitación de la microcuenca

Mediante el sitio web de SIATL v4 se obtuvieron los datos de la microcuenca. Este sitio se utilizó para el modelado de la zona de estudio, que arrojó una pendiente media de 3.0662% y un caudal pico de 91.98 m³/s.

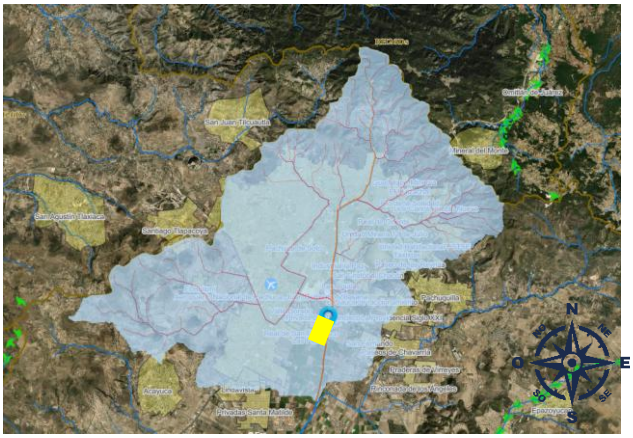


Figura 9: Vista de la cuenca y zona de estudio (SIATLV V4)



Figura 10: Área de estudio desde la cuenca.

La figura 9 muestra la vista general de la cuenca y el cuadro amarillo es la zona donde se localiza la zona de estudio, el área de la cuenca es de 43662.05 km² (SIATL V4, 2026), mientras que el área de la zona de estudio es de 0.392 km² (0.0008% de la superficie total).
A continuación, se muestra la tabla 2 que describe en general la cuenca.

Tabla 2: detalles generales de la cuenca donde se localiza el área de estudio (SIATLV v4)

Propiedad	Valor
Elevación máxima	2970 m
Elevación media	2657 m
Elevación mínima	2345 m
Longitud	20383 m
Pendiente media	3.0662 %
Área drenada	204.63 km²
Coeficiente de escurrimiento de 05 a 10%	135.68 km²
Coeficiente de escurrimiento de 10 a 20%	68.21 km²
Urbano construido	79.47 km²
Agricultura de temporal anual	40.92 km²
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicuale	12.08 km²
Agricultura de temporal anual y permanente	10.96 km²
Pastizal inducido	10.42 km²
Matorral desértico rosetófilo	10.4 km²
Agricultura de riego anual y semipermanente	10.13 km²
Bosques de encino.	6.41 km²
Agricultura de temporal semipermanente y permanente	6.37 km²
Bosque de oyamel	4.12 km²
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de tescate	3.85 km²
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	3.12 km²
Área desprovista de vegetación	2.76 km²
Matorral crasicuale	1.46 km²
Bosque de tascate	0.51 km²

3.6 Infraestructura existente para gestionar la escorrentía

Dentro del área de estudio coexisten estructuras construidas y espacios permeables que actúan como zonas de captación de agua. El sistema de drenaje superficial se compone de un canal encargado de evacuar el agua pluvial proveniente de las distintas vialidades, complementado con una serie de camellones; no obstante, estos elementos de la infraestructura pública muestran un grave deterioro físico debido a la falta de gestión y conservación por parte de las autoridades competentes (Figuras 11 y 12).



Figura 11: Canal en la zona de estudio.



Figura 12: Camellones en la zona de estudio.

4. Metodología

Con el propósito de fundamentar las propuestas técnicas de este estudio, se realizó una caracterización hidrológica detallada del área de interés. Para ello, se generaron hietogramas de diseño asociados a periodos de retorno a partir de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) actualizadas para la región (SCT, 2025). Asimismo, la delimitación de la cuenca y el análisis del sistema de drenaje se realizaron mediante el simulador de flujos de agua SIATL v4.0. Esta plataforma, al integrar datos geoespaciales validados por el INEGI, garantiza la precisión en la obtención de los parámetros geomorfológicos y topográficos indispensables para la modelación.

Dicha modelación incorporó la geometría de los canales y tuberías existentes (Figura 13). Cabe destacar que la zona de estudio carece de una red de drenaje pluvial independiente; las descargas pluviales domesticas se conectan directamente a la red sanitaria o, en su defecto, vierten directamente en la vía pública, aunque cabe mencionar que, en nuevas zonas habitacionales, es más común que se pida que el drenaje pluvial que baja de las viviendas sea distribuido directamente al jardín para evitar el colapso del drenaje de la zona. En consecuencia, el agua pluvial es conducida por la pendiente hacia el canal principal. El objetivo de esta investigación fue evaluar, mediante modelación hidrológica con el software SWMM v5.2, el efecto de diferentes estrategias de infraestructura verde sobre la reducción del caudal máximo de escorrentía superficial en una zona urbana altamente impermeabilizada de Mineral de la Reforma, Hidalgo. Se analizaron como variables principales el caudal máximo de salida, el volumen de escorrentía y la capacidad de infiltración generada por diferentes tecnologías LID, con la finalidad de determinar su viabilidad técnica como medida complementaria para disminuir el riesgo de inundación urbana.

Debido a la ausencia de registros hidrológicos continuos y mediciones de caudales observados en la zona de estudio, no fue posible realizar un proceso formal de calibración y validación del modelo. En consecuencia, el presente trabajo debe considerarse como un estudio de carácter exploratorio cuyo propósito es evaluar el comportamiento potencial de diferentes estrategias de infraestructura verde bajo condiciones representativas de diseño.

La eficiencia de las estrategias propuestas depende del adecuado mantenimiento del sistema de drenaje existente y de las propias obras de infraestructura verde. Asimismo, las tasas de infiltración utilizadas corresponden a valores reportados en la literatura especializada; por ello, se recomienda que futuras investigaciones realicen ensayos de infiltración in situ para validar estos parámetros y reducir la incertidumbre asociada a la modelación hidráulica.

4.1 Proceso de modelado hidrodinámico en SWMM 5.2

Con base en las directrices técnicas del Manual de Usuario de SWMM v.5.2 (2022), el proceso de simulación se estructuró en dos fases principales. En la primera, se configuraron los parámetros de diseño del proyecto, determinando el sistema de unidades, el periodo de análisis y los intervalos de tiempo. Asimismo, se seleccionaron el Número de Curva (CN) para representar la capacidad de infiltración del terreno (Núñez-Guzmán, 2020) y el modelo de enrutamiento hidráulico de onda dinámica, este último con el fin de modelar con precisión los efectos de remanso y las condiciones de flujo a presión en el sistema.

En la segunda fase, se conceptualizó la configuración de la red hidráulica mediante la digitalización de subcuencas, pozos de visita, estructuras de almacenamiento y sitios de vertido. Finalmente, estos elementos se interconectaron mediante conductos (tanto tuberías como canales abiertos), lo que definió la topología de la red encargada de transportar los caudales pluviales (Figura 13).

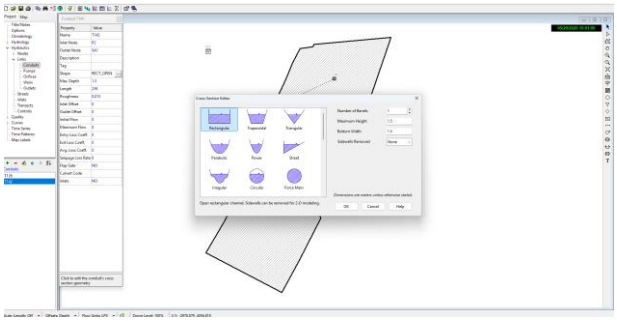


Figura 13: Creación de conductos SWMM V5.2

La siguiente etapa consistió en alimentar el modelo con los parámetros hidrológicos e hidráulicos. A las subcuencas se les atribuyeron propiedades de área, pendiente, grado de impermeabilización y rugosidad superficial. Asimismo, en los nodos y tramos de conducción se ingresaron las elevaciones de plantilla, las dimensiones geométricas, las longitudes y la fricción interna. Con estos datos, el modelo matemático reproduce con precisión el comportamiento físico del entorno analizado.

4.2 Periodo de retorno

A partir de las isoyetas de intensidad proporcionadas por la SCT (2025), se caracterizó la tormenta de diseño empleando un periodo de retorno (Tr) de 10 años, conforme a los criterios exigidos por la CONAGUA (2019) para la infraestructura pluvial en zonas urbanas. Las variables necesarias para el hietograma se resumen en la Tabla 3. La duración del evento meteorológico se fijó en 240 minutos debido a los límites de rangos de tiempo que proporcionan las isoyetas de la SCT;| no obstante, este periodo es suficiente para cubrir el tiempo de concentración en la subcuenca Los Tuzos y analizar la respuesta hidrodinámica de la red de drenaje en el entorno de SWMM.

Se seleccionó un periodo de retorno de diez años debido a que corresponde al criterio recomendado para el diseño de infraestructura pluvial urbana. No obstante, el desempeño de las estrategias de infraestructura verde puede variar ante eventos hidrológicos de mayor magnitud, por lo que resulta conveniente evaluar escenarios asociados a diferentes periodos de retorno en trabajos posteriores, valores como el coeficiente de Manning varían según el tipo de material sobre el cual corre el agua, dando mayor o menor coeficiente de rugosidad (Manning) y así mismo, varia el caudal que la corriente lleva.

Tabla 3: Intensidad de precipitación para un retorno de 10 años (SCT,2025).

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)
5	120.00
10	96.00
15	81.00
20	70.00
30	57.00
40	48.00
60	37.00
90	27.00
120	22.00
150	18.00
180	15.00
210	13.00
240	12.00

La distribución de la intensidad de la lluvia a lo largo del tiempo se determinó mediante el método de bloques alternos, siguiendo la metodología de la CONAGUA (2025) en su manual MAPAS. A través de este método se desagregó la lámina de precipitación en intervalos de tiempo específicos para conformar el hietograma de diseño (Figura 14). Dentro de esta distribución, el bloque asociado al minuto 210 presenta un valor nulo, una particularidad numérica derivada de la tasa de cambio de las curvas de intensidad-duración-frecuencia en ese tramo de la tormenta.

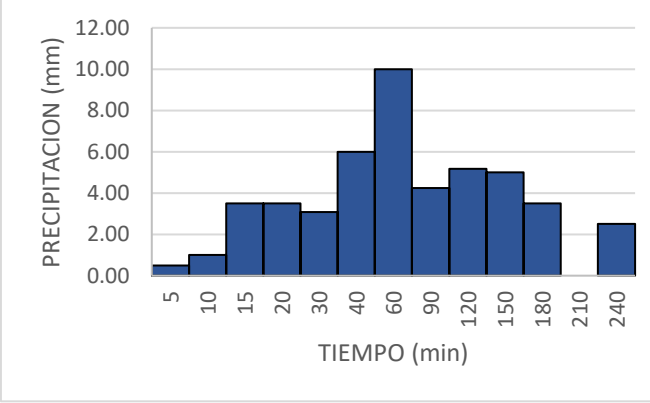


Figura 14: Hietograma (CONAGUA,2026)

La estructuración de este evento es un requisito técnico indispensable para alimentar el módulo de lluvia-escurrimiento del software SWMM v.5.2. El hietograma resultante tiene una duración total de 240 minutos, alineándose con la resolución temporal de la información cartográfica proporcionada por la SCT (2025) y garantizando que el tiempo de simulación cubra la respuesta hidrodinámica completa de la subcuenca en estudio.

4.3 Características de la cuenca.

La tabla 4 muestra las características del área de estudio, entre las que se incluyen la geometría de la cuenca, el uso del suelo, la cobertura vegetal, la pendiente y la dirección del flujo.

Tabla 4: Parámetros del área de estudio. (SCT, 2025).

Parámetros	Cantidad
Área de la zona de estudio	391,156 m^2
Zona impermeable del área de estudio	333,680 m^2
Número de curva (CN) del área de estudio	98
Zona permeable de la cuenca	57,475.6 m^2
Pendiente promedio del área de estudio	3.0662%
Longitud del área de estudio	1,152 m
Ancho del área de estudio	1,118 m
Coeficiente de rugosidad de Manning (n) impermeable	0.011
Coeficiente de rugosidad de Manning (n) del área permeable	0.15

La estimación del área impermeable se determinó restando la superficie de las zonas permeables (áreas verdes) del área total analizada, mientras que la longitud característica se fijó a lo largo del trazo del canal colector pluvial. Asimismo, los coeficientes de rugosidad de Manning se diferenciaron entre superficies permeables e impermeables según el material de cobertura (Núñez-Guzmán, 2020). Por otra parte, la clasificación del terreno mediante el Método del Número de Curva (CN) se empleó para estimar la escorrentía superficial directa, integrando las propiedades edáficas, el uso del suelo, las condiciones previas de humedad y las pendientes obtenidas mediante la plataforma SIATL v4.0. Dado el predominio de superficies pavimentadas y edificadas en este entorno urbano, se asignó un CN generalizado de 98 (Núñez-Guzmán, 2020). Este valor refleja una capacidad de infiltración prácticamente nula, atribuible a las características intrínsecas del suelo local, lo que se traduce en un potencial máximo de generación de caudales de escorrentía en el modelo.

El valor del Número de Curva (CN = 98) fue seleccionado considerando que aproximadamente el 95 % de la superficie corresponde a zonas pavimentadas y edificadas, mientras que las áreas verdes representan una proporción reducida del área total. Este valor fue asumido como representativo de una superficie altamente impermeable, siguiendo los criterios establecidos por el método SCS-CN y las recomendaciones reportadas por Núñez-Guzmán (2020).

4.4 Modelo hidráulico en condiciones actuales.

Con el fin de evaluar el impacto de las soluciones propuestas mediante un análisis comparativo (antes y después), se simuló inicialmente el escenario base bajo las condiciones actuales del sitio. Para ambos escenarios se empleó el hietograma de diseño ilustrado en la Figura 12, ingresando los datos pluviométricos en el software libre SWMM v5.2, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2025). Esta plataforma especializada en la gestión del drenaje urbano incorporó, a partir de su versión 5.2, el módulo de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que permite integrar infraestructura verde como alternativa sustentable.

El proceso comenzó con la introducción de los parámetros físicos en el programa, en el que se delimitó vectorialmente la geometría del área de interés. Aunque la superficie se dividió en dos polígonos debido al trazo del canal colector que lo atraviesa centralmente, las variables hidrológicas se consolidaron en una sola unidad (Tabla 3), ya que esta simplificación geométrica no altera los resultados del modelo hidráulico.

Dentro del modelo hidráulico realizado en el software SWMM v5.2, se usaron tipos de infraestructura: jardín de microcuenca, zanja de infiltración, pavimento permeable y jardín de lluvia.

Como se elaboraron 2 subcuencas en el proceso de modelado, se decidió unificar el área total de cada infraestructura en cada subcuenca, dando como resultados los siguientes parámetros.

Para uso general de la infraestructura, se usaron los siguientes datos:

- Jardín de Microcuenca.
  - Alto de borde-100mm
  - Volumen de vegetación-0.8 (fracción)
  - Rugosidad de superficie-0.015
  - Porcentaje de pendiente-3.0662%
  - Espesor de suelo-500mm
  - Porosidad-0.5 (fracción)
  - Capacidad de campo-0.45 (fracción)
  - Conductividad-60mm/hr
  - Espesor de capa de almacenamiento-
  - 900mm
  - Relación de vacíos de almacenamiento-0.3
  - Tasa de filtración-150mm/hr
- Zanja de infiltración
  - Volumen de vegetación-0.8 (fracción)
  - Rugosidad de superficie-0.15
  - Pendiente-3.0662%
  - Altura de almacenamiento-500mm
  - Relación de vacíos-0.35
  - Taza de infiltración-25mm/hr
- Pavimento permeable
  - Rugosidad de superficie-0.013
  - Pendiente-3.0662
  - Espesor de pavimento-50mm
  - Porcentaje de vacíos 0.15
  - Permeabilidad – 100mm/hr
  - Espesor de base – 200mm
  - Porosidad – 0.40 (fracción)
  - Espesor de subbase – 150mm
  - Radio de campo – 0.40 (fracción)
- Jardín de lluvia.
  - Volumen de vegetación – 0.8 (fracción)
  - Coeficiente de Manning – 0.015
  - Pendiente – 3.0662%
  - Espesor de suelo – 800mm
  - Porosidad – 0.44 (fracción)
  - Capacidad de campo – 0.11
  - Conductividad – 25 mm/hr

Estos parámetros se utilizaron para modelar los LIDS considerados en la elaboración del modelo (Núñez-Guzmán, 2020). Dado que al modelar en el software SWMMv5.2, hay algunos parámetros que no se pueden poner en porcentaje como tal, es por ello que se colocan en fracción dado que en lugar de poner 50% se coloca 0.5, esto como se mencionó debido a que el software los toma como fracción en lugar de porcentaje.

Los parámetros del jardín de microcuenca fueron seleccionados con base en las recomendaciones para sistemas de biorretención establecidas en la literatura. El alto de borde de 100 mm proporciona almacenamiento superficial temporal para captar escurrimientos de eventos frecuentes; el espesor de suelo de 500 mm favorece el desarrollo radicular y la retención de humedad; la porosidad (0.50) y la capacidad de campo (0.45) representan un sustrato con adecuada capacidad de almacenamiento de agua; mientras que la conductividad hidráulica (60 mm/h) y la tasa de infiltración (150 mm/h) permiten un drenaje eficiente sin generar encharcamientos prolongados. La capa de almacenamiento de 900 mm, con una relación de vacíos de 0.30, incrementa el volumen disponible para amortiguar los caudales pico antes de la infiltración al subsuelo (Rossman & Huber, 2016; CIRIA, 2015; Ahiablame et al., 2012).

. La zanja de infiltración fue configurada con una altura de almacenamiento de 500 mm y una relación de vacíos de 0.35, valores característicos de rellenos granulares utilizados para almacenar temporalmente el escurrimiento. La tasa de infiltración de 25 mm/h representa un suelo con permeabilidad moderada, suficiente para favorecer el vaciado gradual del sistema y recuperar su capacidad hidráulica entre eventos de lluvia (CIRIA, 2015; U.S. EPA, 2022).

El pavimento permeable considera un espesor de revestimiento de 50 mm, una base granular de 200 mm y una subbase de 150 mm, dimensiones comúnmente empleadas para proporcionar capacidad estructural y almacenamiento temporal del agua infiltrada. La porosidad de la base (0.40) y la permeabilidad de 100 mm/h favorecen la infiltración y disminuyen el escurrimiento superficial, mientras que la rugosidad de Manning (0.013) corresponde a superficies de concreto permeable ampliamente reportadas en la literatura (Rossman & Huber, 2016; Eckart et al., 2017).

El jardín de lluvia se modeló con un espesor de suelo de 800 mm, suficiente para favorecer el desarrollo de la vegetación y aumentar la capacidad de retención de agua. La porosidad (0.44), la capacidad de campo (0.11) y la conductividad hidráulica (25 mm/h) representan un medio filtrante diseñado para promover la infiltración, reducir el escurrimiento superficial y favorecer la remoción de contaminantes, conforme a los criterios utilizados en sistemas de biorretención (Li et al., 2019; Ahiablame et al., 2012; U.S. EPA, 2022).

Los parámetros empleados para la modelación de las técnicas de Desarrollo de Bajo Impacto (Low Impact Development, LID) en el software EPA Storm Water Management Model (SWMM) fueron seleccionados con base en los rangos recomendados por el manual técnico del programa (Rossman & Huber, 2016), las especificaciones de diseño publicadas para infraestructura verde (U.S. EPA, 2022; CIRIA, 2015) y diversos estudios científicos que han evaluado el desempeño hidráulico de jardines de lluvia, zanjas de infiltración y pavimentos permeables bajo diferentes condiciones hidrológicas.

La selección de estos parámetros tuvo como objetivo representar condiciones de diseño técnicamente viables para maximizar la infiltración, el almacenamiento temporal y la reducción del escurrimiento superficial, considerando además las características topográficas del área de estudio.

Para la subcuenca S6, el jardín de microcuenca cuenta con un área de 4026.45 m², un ancho de 10 m, ya que este es el dato que se usó por media; el porcentaje de saturación inicial es de 10% (Núñez-Guzmán, 2020); el área impermeable tratada es 0% y el área permeable tratada es 0%. Por el lado de la zanja de infiltración, se usó un área de 3552.75 m2m ancho de cada unidad, 10 m ya que es el ancho de las zonas que se encuentran

donde se puede usar esta infraestructura, porcentaje de saturación 10% ya que se cuenta con el mismo suelo. Pavimento permeable; área de la unidad es de 23685 m², ancho de la infraestructura es de 5 m, saturación de las capas subterráneas es del 10%. Jardín de lluvia; el área es de 11842.5 m², ancho de 8 m, saturación inicial de 20%.

Por parte de la subcuenca S4, se tienen los siguientes valores: jardín de microcuenca: 1342.15 m², ancho de 10 m, saturación inicial de 10%. Zanja de infiltración: 1184.25 m² de área, ancho de 10 m y saturación inicial de 10%; pavimento permeable: 7895 m², ancho de 5 m, saturación de 10%; jardín de lluvia: 3947.5 m², ancho de 8 m, saturación de 20% (Núñez-Guzmán, 2020).

Tabla 5: Datos ingresados en el software EPA SWMM V5.2. (Se mantienen las variables en el idioma original del software)

Subcuenca S6	
Property	Value
Rain gage	LL1
Outlet	P2
Area	28
Width	711
%Slope	3.0662
%Imperv	95
N-imperv	0.013
N-perv	0.15
Dstore-imperv	0.5
Dstore perv	0.05
%Zero-imperv	0
Subarea routing	Outlet
Curve Number	98
LID controls	4

Tabla 6: Datos introducidos en el software EPA SWMM V5.2. (Se mantienen las variables en el idioma original del software)

Subcuenca S4	
Property	Value
Rain gage	LL1
Outlet	P1
Area	11.2
Width	407
%Slope	3.0662
%Imperv	91
N-imperv	0.013
N-perv	0.15
Dstore-imperv	0.5
Dstore perv	0.05
%Zero-imperv	0
Subarea routing	Outlet
Curve number	98
LID controls	4

Las Tablas 5 y 6 compilan los parámetros hidráulicos e hidrológicos asignados a cada subcuenca en el entorno de SWMM. De igual manera, se incorporaron los registros de precipitación derivados del hietograma de diseño (Tabla 7), que contemplan la duración establecida de 240 minutos (4 horas).

La delimitación de las subcuencas S4 y S6 se realizó considerando la topografía del terreno, la dirección preferencial del flujo superficial, la geometría del canal principal y la configuración del drenaje existente. Esta discretización permitió representar adecuadamente la respuesta hidrológica del área de estudio sin incrementar innecesariamente la complejidad computacional del modelo.

Tabla 7: Datos de lluvia según el hietograma en el software EPA SWMM V5.2.

Series de tiempo (Hietograma)		
	Tiempo (H:M)	Valor (mm)
	00:05	0.5
	00:10	1
	00:15	3.5
	00:20	3.5
	00:30	3.08
	00:40	6
	01:00	10
	01:30	4.25
	02:00	5.17
	02:30	5
	03:00	3.5
	03:30	0
	04:00	2.5

Tras ingresar las propiedades físicas del lugar y el registro pluvial de 240 minutos, se simuló el escenario base para evaluar la situación actual del área de estudio. El comportamiento del flujo muestra un incremento progresivo de la escorrentía hasta alcanzar su caudal pico en la primera hora; posteriormente, el volumen disminuye de forma gradual hasta el cese de la escorrentía directa, registrado 2 horas y 10 minutos después del inicio del evento meteorológico.

4.5 Modelado de la IV con SWMM V5.2

Con el propósito de identificar los sitios óptimos para la implementación de IV, se evaluó el potencial de la infraestructura existente y se seleccionaron estratégicamente parques, camellones, zonas verdes, vialidades de bajo tránsito y el predio de una institución educativa local. En estos espacios se proyectó la incorporación de cuatro tipologías específicas: jardines de microcuenca, zanjas de infiltración, pavimentos permeables y jardines de lluvia. Dichas estrategias se seleccionaron por su alta idoneidad y eficiencia en las condiciones climáticas de la región, de acuerdo con los criterios del Manual para la Gestión de la Infraestructura Verde (2020). En la Figura 15 se propone la ubicación de las alternativas de IV para evaluar su eficiencia hidráulica e hidrológica.



Figura 15: IA e IV en la zona de estudio.

Posteriormente, las propiedades físicas y operativas de cada dispositivo se ingresaron en el software SWMM v5.2 (Figuras 16 a 18). Este procedimiento se realizó de manera individualizada, configurando las variables específicas requeridas para cada tecnología, dado que sus mecanismos hidráulicos de almacenamiento e infiltración difieren entre sí (EPA, 2025).

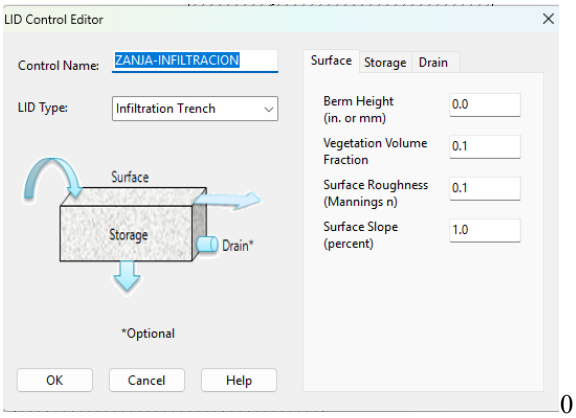


Figura 16: Datos de IV en el software EPA SWMM V5.2.

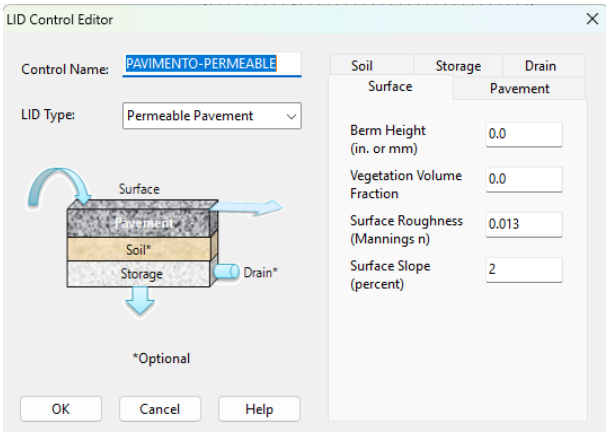


Figura 17: Datos de IV en el software EPA SWMM V5.2.

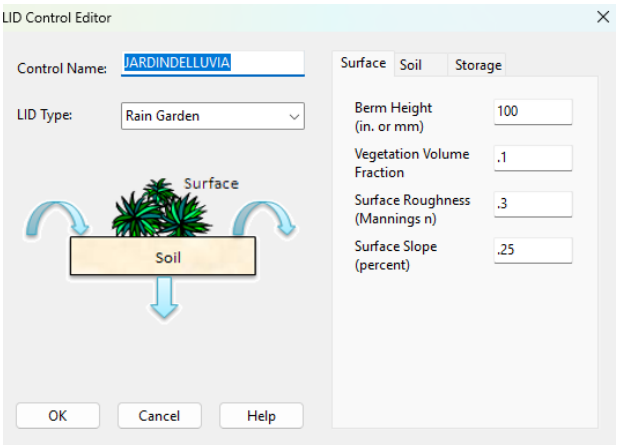


Figura 18: Datos de IV en el software EPA SWMM V5.2.

La tabla 8 presenta los parámetros utilizados en el diseño de las IV en el área de estudio.

Tabla 8: parámetros de diseño de IV.

Criterio	Parámetro
Jardín de microcuenca	
Superficie	5,368.6 m² en corredores
Grosor	Capa de 1 cm de vegetación
Coeficiente Manning	0.015
Pendiente	1.93%
Zanja de infiltración	
Superficie	4,737 m²
Grosor	Capa de 1 cm de vegetación
Coeficiente Manning	0.015
Pendiente	1.93%
Pavimento permeable	
Superficie	31,580 m² en calles y banquetas
Grosor	5 cm de la capa de pavimento
Coeficiente Manning	0.013
Pendiente	2%
Jardín de lluvia	
Superficie	15,790 m² en jardines y área verde
Grosor	8 cm de cobertura
Coeficiente Manning	0.03
Pendiente	2.50%

Tras introducir los parámetros en el programa, se ejecutó la simulación hidráulica bajo dos escenarios: el primero evaluó las condiciones actuales de la zona (escenario base sin IV), mientras que el segundo incorporó las propuestas de infraestructura verde y azul para analizar su impacto en el sistema.

Tabla 9: Comparación de drenajes.

Tiempo (H)	Drenaje convencional (LPS)	Drenaje con IV (LPS)
02:10:00	7,425.12	6,713.08

5. Resultados y discusión

Se evaluaron dos escenarios hidráulicos para analizar la capacidad de la infraestructura verde (IV) para la gestión sustentable de las precipitaciones locales. Los resultados de la simulación demuestran que, mediante el despliegue de estos sistemas en una superficie de 57,475.6 m² (equivalente al 14.69% del área total), se logró mitigar o retener un caudal máximo de 712.04 L/s, lo que representa una reducción del 9.59% respecto al escenario base.

La reducción del caudal máximo de 9.59 % representa un resultado hidráulicamente relevante, ya que disminuye la carga que recibe el sistema de drenaje durante eventos intensos de precipitación. Aunque esta reducción no elimina completamente el riesgo de inundación, sí contribuye a disminuir la probabilidad de desbordamientos y evidencia que la infraestructura verde puede funcionar como una medida complementaria a la infraestructura convencional. La magnitud del beneficio podría incrementarse mediante la ampliación de las áreas intervenidas y la incorporación de nuevas tecnologías de infiltración y almacenamiento.

Este volumen aliviado mitiga directamente los efectos de los eventos pluviales evaluados mediante el modelo. No obstante, el rango de infiltración y captación del sitio podría

incrementarse sustancialmente si se diversifican las tipologías o se amplía la densidad de las estrategias propuestas. Por ejemplo, la integración de sistemas de cosecha de agua de lluvia a nivel domiciliario permitiría almacenar el recurso para usos no potables durante periodos de estiaje o, previo tratamiento, abastecer de agua segura para el consumo de la población.

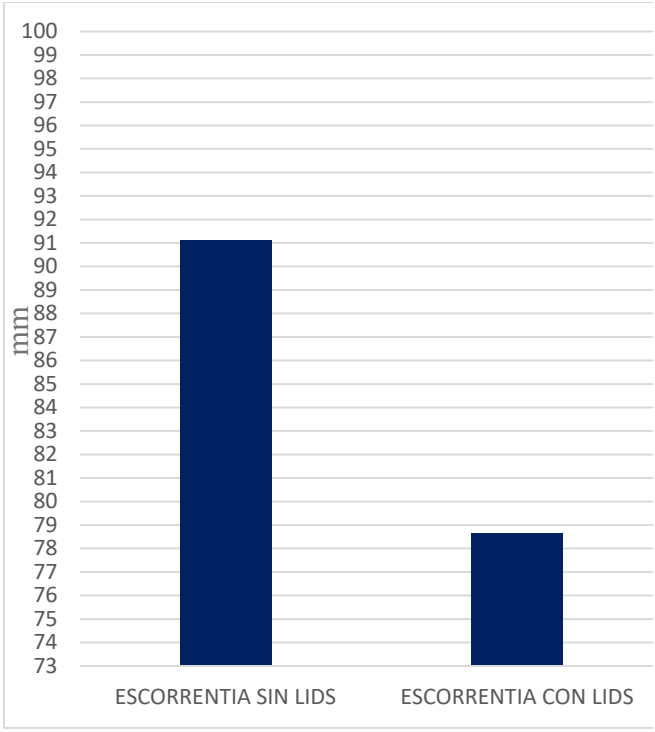


Figura 17: Comparativas de modelados (SWMM v5.2)

El grafico de la figura 17 muestra el total de mm de salida de cada modelo, la primera barra sin infraestructura y la segunda con infraestructura, lo cual indica que si es notable la intervención de los LIDS dentro del modelado.

Dado que se utilizaron 4 diferentes tipos de LIDS, con ayuda del software se puede visualizar cuál de ellos fue el que retuvo más agua en la zona de estudio, esto se muestra en la gráfica que aparece en la figura 18

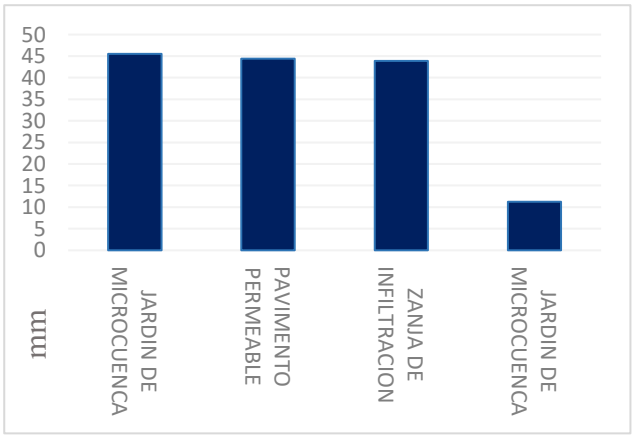


Figura 18: Comparativas de LIDS (SWMM v5.2)

Cabe señalar que, al plantearse como intervención complementaria, la eficiencia de la IV está condicionada por las restricciones espaciales y físicas del entorno preexistente. Debido a que no se diseñan bajo escenarios ideales sino adaptativos, su capacidad de gestión hídrica puede verse restringida. A pesar de estas limitaciones, la combinación de funciones hidráulicas de distintos dispositivos (como techos verdes y pavimentos permeables) potencia sinérgicamente sus beneficios hidrodinámicos (IMPLAN, 2020). Otra limitación de este análisis radica en que se utilizaron datos teóricos para su evaluación. Es deseable considerar los resultados al seleccionar sitios en los que sea factible realizar pruebas físicas in situ.

La implementación de zanjas vegetadas (grassed swales) y pavimentos permeables mediante SWMM en una cuenca urbana de China. Los autores reportaron reducciones del volumen total de escurrimiento entre 27.5 % y 100 %, mientras que el caudal pico disminuyó entre 15.9 % y 100 %, dependiendo del periodo de retorno de la lluvia. Además, demostraron que la combinación de ambas prácticas obtuvo mejores resultados que su implementación individual, debido al aumento del almacenamiento temporal y de la infiltración del agua hacia el subsuelo. Estos resultados evidencian que la integración de varias técnicas LID incrementa la eficiencia hidráulica del sistema (xie et al, 2017)

Resultados similares fueron reportados por Liu et al. (2018), quienes analizaron diferentes escenarios de infraestructura verde para el desarrollo de ciudades esponja. Mediante simulaciones con SWMM concluyeron que la combinación de celdas de bioretención, zanjas vegetadas y pavimentos permeables redujo considerablemente los caudales máximos y el volumen de escurrimiento, siendo más eficiente que la aplicación aislada de cada técnica. Sin embargo, los autores señalaron que durante tormentas de gran magnitud la infraestructura verde no elimina completamente el riesgo de inundación, por lo que recomiendan complementarla con infraestructura gris convencional.

Por otra parte, El Baida et al. (2025) evaluaron el comportamiento de soluciones basadas en la naturaleza bajo escenarios de cambio climático mediante un modelo hidrodinámico acoplado con SWMM. Sus resultados mostraron que la implementación conjunta de techos verdes, pavimentos permeables y zanjas vegetadas redujo aproximadamente 44.7 % del caudal generado por inundaciones pluviales, mientras que las medidas naturales destinadas al control de inundaciones fluviales disminuyeron cerca de 29 % del caudal máximo. Estos resultados demuestran que la infraestructura verde mantiene un desempeño favorable incluso bajo escenarios climáticos futuros, aunque su efectividad depende de la intensidad de los eventos extremos.

La combinación de jardines de lluvia, jardines de microcuenca, zanjas de infiltración y pavimentos permeables favorece procesos hidrológicos complementarios, ya que algunas tecnologías priorizan la infiltración, otras el almacenamiento temporal y otras la reducción de la velocidad del escurrimiento superficial. Esta interacción permite distribuir el volumen de agua a lo largo del sistema urbano, reduciendo el caudal pico y favoreciendo una gestión más eficiente del drenaje pluvial.

Se realizo el hietograma o método del bloque alterno con las diferentes isoyetas que proporciona la SCT, desde 5 años hasta 1000 años, la variación de datos recae en los valores de precipitaciones que estas arrojas, al ser datos históricos con más lapso de tiempo estos se elevan, teniendo un resultado más grande con isoyetas de periodos superiores a 10 años

La selección del período de retorno constituye una de las decisiones más importantes en el diseño hidráulico de los sistemas de drenaje urbano, ya que influye directamente en el nivel de protección frente a inundaciones y en los costos de construcción de la infraestructura. Diversos estudios han demostrado que el período de retorno óptimo no es un valor fijo, sino el resultado de un equilibrio entre la inversión inicial y las pérdidas económicas asociadas a las inundaciones. En este sentido, Sadeghi et al. (2022) aplicaron un análisis de riesgo mediante simulaciones hidráulicas con el modelo SWMM y determinaron que un período de retorno de 10 años minimiza el costo total del sistema, considerando tanto la construcción de la red como los daños ocasionados por eventos de inundación. De manera similar, Fortunato et al. (2014) desarrollaron una metodología para determinar el período de retorno óptimo de diseño de sistemas de drenaje urbano, concluyendo que éste debe seleccionarse mediante un análisis costo-beneficio y que, para redes urbanas convencionales, los períodos de retorno del orden de 10 años representan una alternativa técnica y económicamente eficiente. En consecuencia, el empleo de una tormenta de diseño con un período de retorno de 10 años constituye una práctica ampliamente utilizada en estudios de modelación hidrológica y diseño de drenaje urbano, ya que proporciona un nivel adecuado de protección para eventos de ocurrencia frecuente sin incurrir en sobredimensionamientos significativos.

Aunque el presente estudio no incluyó un análisis de sensibilidad formal, se reconoce que parámetros como el Número de Curva (CN), el coeficiente de rugosidad de Manning y la conductividad hidráulica del suelo ejercen una influencia importante sobre los resultados obtenidos. Por ello, se recomienda incorporar este tipo de análisis en investigaciones futuras con el propósito de evaluar la robustez del modelo y cuantificar la incertidumbre asociada a cada parámetro hidráulico.

6. Conclusiones

Las simulaciones numéricas realizadas con SWMM v5.2 demuestran que las propuestas de infraestructura verde constituyen una estrategia eficiente para mitigar los impactos de los eventos pluviales en entornos urbanos. Al descentralizar la gestión hídrica mediante procesos de captación, infiltración y almacenamiento temporal, estas soluciones alivian la presión hidráulica sobre la red de alcantarillado convencional y reducen significativamente la vulnerabilidad a las inundaciones.

En este contexto, la implementación de IV en el fraccionamiento Los Tuzos, en Mineral de la Reforma, Hidalgo, se presenta como una propuesta teóricamente viable. Esta intervención no solo ofrece una solución adicional y complementaria a los problemas recurrentes de inundación en el sector, sino que también impulsa un modelo de crecimiento urbano sustentable y resiliente, alineando la viabilidad técnica con el bienestar social y la preservación ambiental. No obstante, para que su eficiencia hidráulica sea válida, debe ir acompañada de un mantenimiento periódico que garantice su funcionamiento a lo largo del tiempo.

Finalmente, para garantizar la operatividad a largo plazo de la infraestructura propuesta, se plantean las siguientes recomendaciones:

Mantenimiento y gestión de residuos: es indispensable establecer programas de inspección periódica y desazolve continuo en la red de alcantarillado, ya que la acumulación de residuos sólidos urbanos obstruye los conductos y compromete la capacidad de conducción del sistema.

Rehabilitación de puntos críticos: se debe priorizar la modernización del drenaje pluvial. Durante el diagnóstico de campo, se detectaron zonas críticas en las que las capas de asfalto acumuladas por Re encarpetamientos sucesivos han sepultado rejillas y bocas de tormenta, anulando por completo el ingreso del flujo a la red. La liberación y el rediseño de estas estructuras de captación son prioritarios antes de acoplar cualquier medida de infraestructura verde.

Finalmente, debe reconocerse que los resultados obtenidos corresponden a una evaluación numérica basada en parámetros teóricos y criterios técnicos ampliamente utilizados en la literatura especializada. La implementación futura de estas estrategias deberá complementarse con mediciones de campo, campañas de monitoreo hidrológico y procesos de calibración del modelo que permitan validar el comportamiento observado mediante simulación y reducir la incertidumbre de las estimaciones obtenidas.

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

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT como material de apoyo para la generación de ideas, la mejora de la redacción y la traducción de algunos contenidos. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado, verificado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). **Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research.** Water, Air, & Soil Pollution, 223, 4253–4273. https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2

Banco Mundial. (2026). Strengthening Flood Resilience in Rapidly Growing Cities. Result Briefs. https://www.worldbank.org/en/results/2026/01/26/strengthening-flood-resilience-in-rapidly-growing-cities

CIRIA. (2015). The SuDS Manual (C753). Construction Industry Research and Information Association.

CEPAL. (s. f.). Informe del proceso regional de América Latina y el Caribe para la aceleración del cumplimiento del ODS 6. https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/informe_del_proceso_regional_de_america_latina_y_el_caribe_para_la_aceleracion_del_cumplimiento_del_ods_6_.pdf

Chapman, C., & Hall, J. W. (2022). Designing green infrastructure and sustainable drainage systems in urban development to achieve multiple ecosystem benefits. Sustainable Cities and Society, 85, 104078. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104078

Climatología de Hidalgo, Territorio del Estado de Hidalgo. (2023). Información por entidad. Cuéntame INEGI. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/clima.aspx?tema=me&e=13

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia a nivel vivienda.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (s. f.). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Obras de Captación Superficiales.

Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I., & Carmona, E. (2008). Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. Investigaciones Geográficas, (66), 81–104.

Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development – A review. Science of the Total Environment, 607–608, 413–432. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254

El Baida, M., Chourak, M., & Boushaba, F. (2025). Flood mitigation and water resource preservation: Hydrodynamic and SWMM simulations of nature-based solutions under climate change. Water Resources Management. https://doi.org/10.1007/s11269-024-04015-3

El pesar de los colonos de Tuzos, expuestos a inundaciones. (2021, 24 octubre). La Silla Rota Hidalgo. https://lasillarota.com/hidalgo/reportajes/2021/10/24/el-pesar-de-los-colonos-de-tuzos-expuestos-inundaciones-359590.html

https://espanol.epa.gov

Essamlali, I., Nhaila, H., & El Khaili, M. (2024). Optimizing runoff and pollution mitigation through strategic low-impact development (LID) integration in the Bouznika city development plan. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 10, 100838. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100838

Ferrini, F., Konijnendijk van den Bosch, C. C., & Fini, A. (2017). Routine maintenance. En F. Ferrini, C. C. Konijnendijk van den Bosch & A. Fini (Eds.), Routledge Handbook of Urban Forestry (pp. 316–329). Routledge.

Flores, I. D. H. (2021). La infraestructura verde como elemento vinculador de los paisajes presentes en el corredor urbano industrial de Guanajuato, México.

Flores Islas, E. G. (2024, 19 de septiembre). Locatarios y habitantes piden una solución al dren pluvial Tulipanes. El Universal Hidalgo. https://www.eluniversalhidalgo.com.mx/metropoli/locatarios-y-habitantes-piden-una-solucion-al-dren-pluvial-tulipanes/

Fonseca Alves, L. G., De Oliveira Galvão, C., De Farias Santos, B. L., Fernandes De Oliveira, E., & Andrade De Moraes, D. (2022). Modelling and assessment of sustainable urban drainage systems in dense precarious settlements subject to flash floods. LHB, 108(1), 2016024. https://doi.org/10.1080/27678490.2021.2016024

INEGI. (2025).

Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo. (2020). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. IMPLAN Hermosillo. https://implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2025/08/Manual-de-Lineamientos-de-Diseno-de-Infraestructura-Verde-para-Municipios-Mexicanos.pdf

Kasprzyk, M., Szpakowski, W., Poznańska, E., Boogaard, F. C., Bobkowska, K., & Gajewska, M. (2022). Technical solutions and benefits of introducing rain gardens – Gdańsk case study. Science of The Total Environment, 835, 155487. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155487

Knapik, E., Brandimarte, L., & Usher, M. (2023). Maintenance in sustainable stormwater management: Issues, barriers and challenges. Journal of Flood Risk Management.

Krivtsov, V. (2025). Green and blue-green infrastructure: Benefits, trade-offs, and optimisation of ecosystem services: An overview with perspectives for research and management. Landscape Research. https://doi.org/10.1080/17550874.2025.2585476

La Silla Rota Hidalgo. (2025, 16 de junio). ¿Hasta cuándo dejará de llover en Pachuca y Mineral de la Reforma? La Silla Rota Hidalgo. https://lasillarota.com/hidalgo/local/2025/6/16/hasta-cuando-dejara-de-llover-en-pachuca-mineral-de-la-reforma-541154.html

Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. (s. f.).

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (s. f.).

Li, C., Fletcher, T. D., Duncan, H. P., & Burns, M. J. (2019). Can stormwater management practices restore altered urban flow regimes at the catchment scale? Journal of Hydrology, 575, 411–422. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.043

Liu, Y., et al. (2018). Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. Science of the Total Environment, 639, 1394–1407.

Liu, Y., Zhang, X., Liu, J., Wang, Y., Jia, H., & Tao, S. (2025). A flood resilience assessment method of green-grey-blue coupled urban drainage system considering backwater effects. Ecological Indicators, 170, 113032. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113032

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

MANUAL PARA LA GESTIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE EN LA CIUDAD DE LEÓN, GUANAJUATO. (2020). Instituto Municipal de Planeación de León, Guanajuato.

Minixhofer, P., & Stangl, R. (2021). Green infrastructures and the consideration of their soil-related ecosystem services in urban areas—A systematic literature review. Sustainability, 13(6), 3322. https://doi.org/10.3390/su13063322

Núñez Guzmán, V. F. (2020). Sistemas de drenaje urbano sostenible (SuDS), caso de estudio: Avenida Manuela Sáenz, Ambato, Ecuador [Trabajo de fin de máster, Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos].

Prudencio, L., & Null, S. E. (2018). Stormwater management and ecosystem services: A review. Environmental Research Letters, 13(3), 033002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa81a

Purumal, K., Ali, A. S., Zakaria, N., & Baaki, T. K. (2021). Green maintenance principles and maintenance performance indicators for green building design: A systematic literature review. Journal of Design and Built Environment, 21(2), 1–20.

Rivera González, O. (2026). Análisis cartográfico-hidrológico y afectaciones por inundaciones, 2025, Municipio de Chalco, EDOMEX. Procesos Urbanos, 13(1), 1–18. https://doi.org/10.21892/2422085X.849

Reporte de lluvias registradas. (2024, 30 agosto). Servicio Meteorológico Nacional. Gobierno del Estado de México. https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/informe-meteorologico-especial-de-lluvias

Rossman, L. A., & Huber, W. C. (2016). Storm Water Management Model (SWMM) Version 5.1 User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency.

Saltillo Nos Une. (2023).Funcionó infraestructura azul y verde en Plaza Brisas. Saltillo, México. https://drive.google.com/file/d/1bNDWbJiaf7rJo_B6HPdFBL25k8wZ8aM5/view

Secretaría de Economía. (2013). NMX-AA-164-SCFI-2013, Edificación sustentable: Criterios y requerimientos ambientales mínimos.

Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil. (2019–2023). Quinto Informe de Gobierno. Gobierno de la Ciudad de México.

Secretaría de Medio Ambiente. (2024, 26 agosto). Infraestructura verde. Gobierno de la Ciudad de México. http://www.cdmx.gob.mx/lgacdmx

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1999). NOM-007-CNA-1997, Requisitos de seguridad para la construcción y operación de tanques para agua.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2009). NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos: Características y especificaciones de las obras y del agua.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua: Especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2025). Isoyetas 2025: Intensidad de lluvia. Duración: 10 minutos. Período de retorno: 10 años. Estado de Hidalgo [Mapa]. Gobierno de México. https://micrs.sct.gob.mx/images/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas-2025-Duracion/HIDALGO/10.pdf

SEDATU-SEMARNAT-GIZ. (2019). Hoja de ruta: Implementación de infraestructura verde como estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático en ciudades mexicanas.

Sadeghi, S., Mohammad Vali Samani, J., & Mohammad Vali Samani, H. (2022). Risk and damage-based optimal design of storm sewer networks using rational and fully dynamic methods: A case study. Urban Water Journal.

Soriano, B. (2024, 30 de julio). En Tulipanes piden más desazolve para evitar inundaciones. El Sol de Hidalgo. https://oem.com.mx/elsoldehidalgo/local/en-tulipanes-piden-mas-desazolve-para-evitar-inundaciones-13557343

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Bigurra Alzati, C. A., Vázquez Rodríguez, G. A., & Lizárraga Mendiola, L. (2021). Reducción de la huella de escasez hídrica y medidas de conservación del agua en la vivienda. Vivienda y Comunidades Sustentables, 9, 61–75. https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i9.137

U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Storm Water Management Model (SWMM).

Vargas Martínez, J., Navarro Gómez, H. I., & Areu Rangel, O. S. (2025). Restauración fluvial de bajo impacto en el canal Tlahuelilpan, Hidalgo. Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 13(Especial3), 24–34. https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15611

Xie, J., Wu, C., Li, H., & Chen, G. (2017). Study on storm-water management of grassed swales and permeable pavement based on SWMM. Water, 9(11), 840. https://doi.org/10.3390/w9110840

Ying, J., Zhang, X., Zhang, Y., & Bilan, S. (2022). Green infrastructure: Systematic literature review. Economic Research-Ekonomska Istraživanja, 35(1), 343–366. https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1893202