UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

“SISTEMA INTEGRAL DE DRENAJE URBANO CON CONCRETO PERMEABLE Y JARDÍN DE LLUVIA QUE INCORPORAN RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)”

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA:

ISAAC TREJO COVARRUBIAS

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

CO-DIRECTORA:

DRA. GABRIELA ALEJANDRA VÁZQUEZ RODRÍGUEZ

COMITÉ REVISOR:

DR. OMAR SALVADOR AREU RANGEL

DR. CARLOS ALFREDO BIGURRA ALZATI

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO

ENERO, 2026

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 19 de febrero de 2026

Número de control: ICBI-D/271/2026
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Isaac Trejo Covarrubias,** quien presenta el trabajo de titulación **"Sistema Integral de drenaje urbano con concreto permeable y jardín de lluvia que incorporan residuos de construcción y demolición (RCD)",** ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente:	Dra. Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez	
Secretario:	Dr. Carlos Alfredo Bigurra Alzati	
Vocal:	Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola	
Suplente:	Dr. Omar Salvador Areu Rangel	

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/MMM

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

Índice

	Página
Resumen	7
Abstract	8
Capítulo 1. Planteamiento de la investigación	9
1.1 Introducción	9
1.2 Formulación del problema	10
1.3 Justificación	11
1.4 Hipótesis	12
1.5 Objetivo general	12
1.5.1 Objetivos específicos	12
1.6 Alcances	13
1.7 Limitaciones	13
1.8 Descripción del objeto de estudio	14
Capítulo 2. Revisión de literatura	15
2.1 Introducción	15
2.2 Fundamentos de drenaje urbano sostenible	15
2.2.1 Enfoque de desarrollo de bajo impacto (LID)	15
2.2.2 Infraestructura verde y azul	16
2.3 Sistemas permeables de pavimento	16
2.3.1 Tipologías	16
2.3.2 Composición	17
2.3.3 Ventajas hidráulicas y limitaciones estructurales	18
2.3.4 Aplicaciones urbanas	20

2.4 Jardines de lluvia	21
2.4.1 Definición y principios hidrológicos	21
2.4.2 Criterios técnicos de diseño	22
2.4.3 Efectividad de mitigación de escorrentía e incremento de la infiltración	25
2.4.4 Adaptación en distintos climas y su eficiencia	25
2.4.5 Recomendaciones para su adaptación	26
2.5 Sistemas combinados de pavimento permeable y jardín de lluvia	27
2.5.1 Aplicación en zonas urbanas	27
2.5.2 Criterios de diseño	27
2.5.3 Eficiencia hidráulica	28
2.5.4 Medidas de mantenimiento y prolongación de la vida útil	28
2.6 Vacíos en la literatura y oportunidades	29
2.7 Uso de residuos de construcción y demolición en una mezcla de concreto permeable	30
2.8 Normativas y regulaciones	32
2.9 Metodología básica para la construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible	33
Capítulo 3. Metodología	35
3.1 Enfoque de investigación	35
3.2 Caracterización del sitio de estudio	36
3.2.1 Localización y descripción de la zona	36
3.2.2 Hidrología y clima	37
3.2.3 Vegetación, relieve y tipos de suelo	38
3.3 Diseño del estudio	39
3.4 Diseño del prototipo	39
3.4.1 Banqueta de concreto permeable	40

3.4.2 Jardín de lluvia	42
3.4.3 Sistema combinado	43
3.5 Evaluación hidráulica	46
3.6 Análisis de factibilidad	50
Capítulo 4. Resultados y Discusión	52
4.1 Intensidades de lluvia	52
4.2 Gastos y volúmenes interceptados en los distintos componentes del sistema	53
4.2.1 Banqueta con concreto hidráulico	53
4.2.2 Banqueta de concreto permeable	55
4.2.3 Jardín de lluvia	56
4.2.4 Volumen excedentes y retenidos	58
4.3 Evaluación integral del prototipo	59
4.3.1 Gastos promedio	59
4.3.2 Evaluación de los volúmenes infiltrados y excedentes	60
4.3.3 Volúmenes recuperables	61
4.4 Presupuesto del sistema integral	62
4.4.1 Materiales	63
4.4.2 Mano de obra	63
4.4.3 Mantenimiento	63
4.4.4 Comparación entre sistema integral y sistema convencional de drenaje urbano	64
4.4.5 Beneficios ambientales	65
4.4.6 Beneficios sociales	66
4.4.7 Beneficios estéticos	66
4.5 Criterios de evaluación integral	67

4.5.1 Costo-beneficio	67
4.5.2 Replicabilidad	67
4.6 Discusión	67
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	70
5.1 Conclusiones generales	70
5.2 Limitaciones del estudio	71
5.3 Recomendaciones	71
Referencias bibliográficas	73
Anexos	79

Índice de Tablas

	Página
Tabla 2.1 Características de los pavimentos permeables.	17
Tabla 2.2 Idoneidad de adaptación de pavimentos permeables.	19
Tabla 2.3 Precipitaciones estacionales en regiones semiáridas.	20
Tabla 2.4 Principios hidrológicos de los jardines de lluvia.	22
Tabla 2.5 Criterios técnicos aplicables a los jardines de lluvia.	23
Tabla 2.6 Componentes principales de los jardines de lluvia y su funcionalidad.	24
Tabla 4.1 Gastos promedio retenidos y excedentes por el prototipo.	59
Tabla 4.2 Volúmenes promedio retenidos y excedentes por el prototipo.	61
Tabla 4.3 Capacidades de tanques de almacenamiento para la acumulación del agua excedente del prototipo en función del tiempo de retorno (TR).	62
Tabla 4.4 Presupuesto del sistema integral (banqueta de concreto hidráulico, patio de pavimento permeable y jardín de lluvia).	62

Índice de Figuras

	Página
Figura 2.1. Esquema conceptual de un pavimento permeable típico.	18
Figura 2.2 Factores que afectan la escorrentía y balance de agua en zona radicular de un jardín de lluvia.	22
Figura 3.1 Localización de la zona de estudio para la que se diseñó el sistema integral.	36
Figura 3.2 Corrientes intermitentes en Mineral de la Reforma, Hidalgo.	37
Figura 3.3 Dimensiones de sistema integral.	40
Figura 3.4 Prototipo de banqueta permeable.	42
Figura 3.5 Prototipo de jardín de lluvia.	43
Figura 3.6 Sistema combinado de agua de lluvia (LL), agua superficial (as) y agua infiltrada (ai).	45
Figura 3.7 Prototipo del sistema integral.	46
Figura 3.8 Tubería de conducción.	50
Figura 4.1 Variación de las intensidades de lluvias para los tres periodos de retorno seleccionados.	52
Figura 4.2 Gasto que escurre sobre la superficie de la banqueta de concreto hidráulico.	53
Figura 4.3 Gasto retenido por la banqueta de concreto hidráulico. TR: Tiempo de retorno.	54
Figura 4.4. Gasto que escurre sobre la superficie de la banqueta de concreto permeable con RCD (L/h). TR: Tiempo de retorno.	55
Figura 4.5 Gasto retenido por banqueta de concreto permeable con RCD (L/h). TR: Tiempo de retorno.	56
Figura 4.6 Gasto que ingresa al tanque de almacenamiento, excedente de jardín de lluvia (L/h). TR: Tiempo de retorno.	57

Figura 4.7. Gasto retenido por el jardín de lluvia. TR: Tiempo de retorno.	57
Figura 4.8 Volúmenes excedentes sobre el área total del prototipo. TR: Tiempo de retorno.	58
Figura 4.9 Volúmenes totales retenidos por el prototipo. TR: Tiempo de retorno.	59
Figura 4.10 Curvas de infiltración (gasto retenido) en función del tiempo de retorno.	60

Índice de Anexos

	Página
Anexo 1. Cálculo de gastos de sistemas integrados (banqueta de concreto hidráulico, banqueta de concreto permeable, jardines de lluvia) en un periodo de retorno de 5 años	80
Anexo 2. Cálculo de gastos de sistemas integrados (banqueta de concreto hidráulico, banqueta de concreto permeable, jardines de lluvia) en un periodo de retorno de 10 años	92
Anexo 3. Cálculo de gastos de sistemas integrados (banqueta de concreto hidráulico, banqueta de concreto permeable, jardines de lluvia) en un periodo de retorno de 25 años	104
Anexo 4. Volúmenes retenidos promedio por el prototipo por periodo de retorno	116

Resumen

El crecimiento urbano acelerado y la consecuente impermeabilización del suelo han intensificado problemas como los encharcamientos, la erosión y la insuficiencia de los sistemas de drenaje pluvial. En este contexto, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible constituyen una alternativa para incrementar la resiliencia hídrica y mitigar los efectos del cambio climático en las zonas urbanas. Este proyecto plantea el diseño y la evaluación analítica de un sistema integral conformado por banquetas de concreto permeable (elaboradas parcialmente con residuos de construcción y demolición -RCD- como sustituto del agregado grueso), acopladas a jardines de lluvia estratégicamente dispuestos con vegetación nativa del lugar. El prototipo diseñado favorece la infiltración pluvial, reduce el volumen de escorrentía superficial y promueve la recarga de acuíferos, a la vez que optimiza el riego pasivo de la vegetación urbana y mejora las condiciones microclimáticas. El análisis considera criterios hidrológicos, geotécnicos y de diseño hidráulico, así como aspectos de mantenimiento necesarios para garantizar su funcionalidad a largo plazo. En conjunto, esta propuesta contribuye a la gestión sostenible del agua, a la reducción del impacto ambiental del sector de la construcción mediante la valorización de los RCD y a la construcción de ciudades más resilientes y habitables.

Palabras clave: Pavimento poroso, andadores peatonales, jardinera, drenaje, recarga al subsuelo.

Abstract

Rapid urban growth and the consequent soil impermeabilization have intensified problems such as waterlogging, erosion, and the overloading of stormwater drainage systems. In this context, Sustainable Urban Drainage Systems represent an alternative to enhance water resilience and mitigate the impacts of climate change in urban areas. This project proposes the design and evaluation of an integrated system comprising permeable concrete sidewalks (partially produced with construction and demolition waste -CDW- as a coarse aggregate substitute) coupled to strategically arranged rain gardens with native vegetation of the place. The proposed prototype promotes stormwater infiltration, reduces surface runoff volumes, supports aquifer recharge, and enables passive irrigation of urban vegetation while improving microclimatic conditions. The analysis incorporates hydrological, geotechnical, and hydraulic design criteria, as well as maintenance requirements essential to ensure long-term functionality. Overall, this approach contributes to sustainable stormwater management, reduces the environmental impact of the construction sector by valorizing CDW, and fosters the development of more resilient and livable cities.

Keywords: Porous pavement, pedestrian walkways, planter, drainage, groundwater recharge.

Capítulo 1. Planteamiento de la investigación

1.1 Introducción

El crecimiento urbano y el cambio climático han acentuado problemáticas como las inundaciones, la erosión del suelo y la sobrecarga de infraestructura gris. El uso generalizado de materiales impermeables, como el asfalto y el concreto tradicional, limita significativamente la infiltración natural, interrumpe la recarga de los acuíferos y agrava los riesgos asociados al escurrimiento superficial (Masís et al., 2014). Estas dificultades son particularmente evidentes en México, donde la expansión urbana desordenada y la insuficiencia de la infraestructura hidráulica han incrementado la frecuencia de las inundaciones (IMTA, 2024).

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son elementos superficiales, permeables, preferiblemente vegetados, integrantes de la estructura urbana-hidrológica-paisajística y previos al sistema de saneamiento. Están destinados a filtrar, retener, transportar, acumular, reutilizar e infiltrar al terreno el agua de lluvia, de forma que no degraden e incluso restauren la calidad del agua que gestionan (Lasa, 2008). Las experiencias internacionales han demostrado la eficacia de los pavimentos permeables en las estrategias de drenaje urbano sostenible. En China, por ejemplo, se reportó que este tipo de pavimentos redujo la escorrentía total en un 35.6% y los gastos pico en un 28.7%, consolidándose como un componente clave de la iniciativa Ciudad Esponja (Hu et al., 2018). En Estados Unidos, un estudio realizado en la Universidad de Texas A&M reveló que los pavimentos permeables superan a otras tecnologías, como la captación pluvial y los techos verdes, en la reducción de la escorrentía y del impacto de las inundaciones (Damodaram et al., 2009). De manera similar, en Australia el concreto permeable se ha consolidado como un elemento esencial en el enfoque de Diseño Urbano Sensible al Agua (*Water Sensitive Urban Design*), tanto para mejorar la calidad del agua como para regular los volúmenes de escurrimiento (Aoki, 2009).

En el ámbito nacional, distintas instituciones han explorado la aplicación de concretos permeables en entornos urbanos. Asimismo, en la FES Aragón de la Universidad Nacional Autónoma de México se desarrolló un concreto permeable capaz de filtrar el agua de lluvia, favorecer la recarga de acuíferos y reducir la contaminación de los sistemas de alcantarillado (Rodríguez y Martínez, 2018). A nivel local, la instalación de más de 100 mil metros cuadrados de concreto permeable en el Parque David Ben Gurión de Pachuca representa un caso destacado de implementación práctica para mitigar las inundaciones y promover la sostenibilidad urbana (El Sol de Hidalgo, 2024).

En este contexto, la adopción de SUDS, y en particular la combinación de pavimentos permeables con jardines de lluvia surge como una alternativa viable para superar las limitaciones de la infraestructura gris tradicional. La hipótesis que sustenta este trabajo

plantea que la integración de banquetas de concreto permeable con jardines de lluvia puede incrementar la infiltración pluvial, reducir la escorrentía superficial y fortalecer la resiliencia hídrica urbana frente a los efectos del desarrollo urbano.

Estudios recientes resaltan que los residuos de construcción y demolición (RCD) pueden aprovecharse para la producción de concretos permeables, lo que contribuye a la economía circular en la industria de la construcción. Su incorporación parcial como sustituto de agregados gruesos ayuda a reducir la extracción de recursos naturales y minimizar los impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada (Nibhanupudi et al., 2020; Valdés et al., 2020). Además, se ha comprobado que mezclas con hasta un 30% de RCD mantienen propiedades mecánicas y niveles de permeabilidad adecuados para aplicaciones en banquetas, andadores y otras áreas urbanas de baja carga vehicular (Juárez y Rodríguez, 2020; Oliveira y Silva, 2021). Igualmente, en la Universidad Autónoma de Baja California se confirmó la viabilidad técnica de incorporar agregados reciclados en la elaboración de concretos permeables sin comprometer su durabilidad (Rodríguez et al., 2023). De esta manera, la inclusión de RCD en los SUDS no solo fortalece la sostenibilidad ambiental, sino que también amplía el potencial de estas tecnologías para mejorar la gestión pluvial en contextos urbanos altamente impermeabilizados.

La aportación de este proyecto es la incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) en la mezcla de concreto permeable, así como material de relleno en un jardín de lluvia, para promover una mayor infiltración, lo que permite avanzar hacia un modelo de economía circular en la industria de la construcción. Esta innovación no solo favorece la gestión sostenible del agua, sino que también reduce el impacto ambiental de los RCD y contribuye a la transición hacia ciudades más resilientes, sostenibles y habitables.

1.2 Formulación del problema

La urbanización ha modificado significativamente la dinámica hidrológica natural, generando superficies urbanas con niveles de impermeabilización entre 70% y 80%, lo que limita la infiltración, reduce la recarga de acuíferos y favorece la acumulación de escorrentía superficial (Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 2022). Como consecuencia, muchas ciudades de América Latina y de México enfrentan inundaciones recurrentes, erosión de suelos, deterioro de la infraestructura y afectaciones socioeconómicas que comprometen la calidad de vida de la población (IMTA, 2024).

En estas condiciones, el ciclo hidrológico urbano se encuentra alterado: la evaporación, la condensación y la precipitación se ven afectadas por el incremento de las temperaturas, la disminución de las áreas permeables y la sobrecarga de los sistemas de drenaje. Eventos como la tormenta tropical Chris en 2024 evidencian que las lluvias de moderada a alta intensidad (cuando ocurren sobre suelos saturados o impermeables) desencadenan encharcamientos e inundaciones severas (SEMARNAT, 2015; CENAPRED, 2018). La

vulnerabilidad aumenta en ciudades con crecimiento desordenado y carencia de planeación, donde los residuos sólidos, polvo y contaminantes acumulados son arrastrados por las primeras lluvias, lo que obstruye las alcantarillas y agrava el riesgo de inundaciones repentinas. Casos documentados en São Paulo, Ciudad de México y Lima ilustran cómo la urbanización acelerada y la pérdida de áreas verdes han intensificado la exposición a estos fenómenos (Narcizo-de Lima et al., 2023).

El modelo tradicional de infraestructura gris resulta insuficiente para responder a estas problemáticas, por lo que se requiere avanzar hacia estrategias de drenaje urbano sostenible que repliquen los procesos naturales de infiltración, retención y recarga de acuíferos. Tecnologías como los pavimentos permeables y los jardines de lluvia, ya probadas en distintas latitudes, ofrecen soluciones adaptables para reducir la escorrentía y mejorar la resiliencia urbana (Fletcher et al., 2015; Buurman et al., 2020).

En este contexto, el problema central de investigación consiste en diseñar sistemas integrales que, además de reducir el volumen de escurrimiento superficial y mitigar las inundaciones locales, incorporen principios de economía circular mediante el aprovechamiento de RCD en la fabricación de concretos permeables. Esta integración permitiría avanzar hacia ciudades más resilientes ante eventos pluviales extremos y, al mismo tiempo, disminuir la presión ambiental derivada de la gestión inadecuada de los RCD.

1.3 Justificación

Los SUDS constituyen una alternativa clave para complementar la eficacia técnica de la infraestructura gris y, al mismo tiempo, favorecer la funcionalidad del ciclo hidrológico urbano al permitir la infiltración, el almacenamiento y el aprovechamiento del agua pluvial, imitando procesos naturales y promoviendo la resiliencia hídrica urbana (Fletcher et al., 2015; MITECO, 2019).

Dentro de estas estrategias, los pavimentos permeables destacan por su capacidad de reducir la escorrentía y mejorar la calidad del agua mediante la recarga subterránea y la filtración de contaminantes (Ferguson, 2005; Timm y Jones, 2017). Complementariamente, los jardines de lluvia funcionan como áreas vegetadas que captan y filtran el agua en el punto de escurrimiento, favoreciendo la infiltración, el control de caudales y la retención de contaminantes (Schueler y Holland, 2000; Burns et al., 2012). Otros SUDS, como zanjas de infiltración, techos verdes y humedales artificiales, también han demostrado su efectividad para retener agua, reducir las inundaciones y mejorar la calidad ambiental urbana (Burns et al., 2012).

El empleo de concreto permeable cobra especial relevancia, pues su estructura porosa permite transmitir el agua directamente al subsuelo o almacenarla temporalmente para su reutilización (MITECO, 2019). Además de disminuir el riesgo de inundaciones, esta estrategia

contribuye a la sostenibilidad ambiental al fomentar la recarga natural de acuíferos y reducir los escurrimientos superficiales.

En este contexto, la combinación de banquetas de concreto permeable con jardines de lluvia representa una solución aplicable a zonas urbanas altamente impermeabilizadas, ya que permite optimizar la gestión del agua pluvial, mitigar los impactos del cambio climático y generar espacios urbanos más resilientes. Asimismo, la incorporación de RCD en la mezcla de concreto permeable aporta un valor agregado desde la perspectiva de la economía circular, al disminuir la presión sobre los recursos naturales y reducir los impactos ambientales de la disposición inadecuada de estos residuos (Nibhanupudi et al., 2020; Valdés et al., 2020).

En suma, la justificación de este proyecto radica en demostrar que la integración de pavimentos permeables con jardines de lluvia no solo responde a la problemática de inundaciones y sobrecarga de los drenajes en contextos urbanos semiáridos, sino que además constituye una estrategia de gestión pluvial sostenible que vincula eficiencia hidráulica, resiliencia urbana y aprovechamiento responsable de materiales.

1.4 Hipótesis

El diseño de un sistema integral de drenaje urbano sostenible que emplee RCD, conformado por banquetas de concreto permeable e integradas a jardines de lluvia, incrementará la infiltración pluvial, reducirá el volumen de escorrentía superficial y favorecerá la recuperación de agua para fines no potables en zonas urbanas altamente impermeabilizadas. Dicho diseño evidenciará que este tipo de sistemas constituye una alternativa viable para fortalecer la resiliencia hídrica urbana frente a eventos de precipitación extrema caracterizados por lluvias de alta intensidad y volumen que superan la capacidad del drenaje urbano convencional.

1.5 Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema integral de drenaje urbano sostenible que combine banquetas de concreto permeable y jardines de lluvia con incorporación parcial de RCD, con el propósito de incrementar la infiltración pluvial, reducir la escorrentía superficial, favorecer la recarga de acuíferos y contribuir a la resiliencia hídrica urbana en zonas semiáridas con alta impermeabilización.

1.5.1 Objetivos específicos

1. Caracterizar las condiciones hidrológicas, climáticas y geotécnicas generales del área de estudio para determinar los parámetros de infiltración del subsuelo y los factores que influyen en la escorrentía superficial.

2. Diseñar una banqueta de concreto permeable con incorporación de RCD, evaluando sus propiedades hidráulicas y mecánicas a fin de validar su viabilidad técnica.
3. Desarrollar el diseño hidráulico de un jardín de lluvia que incorpore RCD en su medio filtrante, integrándolo funcionalmente con la banqueta permeable para optimizar la captación, retención e infiltración del agua pluvial.
4. Analizar el desempeño hidráulico del sistema integral (concreto permeable + jardín de lluvia) mediante la estimación de caudales, volúmenes interceptados e infiltración, con el propósito de cuantificar la reducción de la escorrentía superficial y su contribución a la mitigación de las inundaciones locales.
5. Estimar los costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema integral, con el fin de valorar su factibilidad técnica y económica en zonas urbanas altamente impermeabilizadas.

1.6 Alcances

El presente proyecto se centra en el diseño y la evaluación de un sistema integral de drenaje urbano sostenible que combina banquetas de concreto permeable con jardines de lluvia. Una aportación consiste en incorporar RCD en la mezcla de concreto permeable, así como en el relleno del jardín de lluvia, lo que favorece la reducción de materiales vírgenes y contribuye a disminuir los impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada.

El alcance del estudio incluye la caracterización hidrológica y geotécnica de la zona de análisis, lo que permite establecer con precisión los parámetros de infiltración y escorrentía. Asimismo, se evalúa el desempeño del sistema diseñado en términos de incremento de la infiltración pluvial, reducción del volumen de escorrentía superficial y el favorecimiento de la recarga de acuíferos. El proyecto también contempla la comparación de los resultados con los de sistemas de drenaje convencionales, a fin de evidenciar las ventajas de la propuesta en términos de resiliencia hídrica urbana y mitigación de inundaciones. Finalmente, se formulan propuestas técnicas y recomendaciones de mantenimiento que facilitan la adaptación del sistema a otros contextos urbanos con problemáticas similares.

1.7 Limitaciones

Los resultados de esta investigación están condicionados por las características hidrológicas y geotécnicas específicas del sitio de estudio obtenidas a partir de fuentes de información, por lo que su aplicación directa en otras regiones podría requerir ajustes adicionales. Otra limitación relevante radica en la variabilidad de los RCD utilizados en la mezcla de concreto permeable, pues su granulometría y calidad pueden influir en la resistencia y la capacidad de infiltración del material. Asimismo, el estudio se desarrolla a partir de un prototipo experimental diseñado, lo que limita su alcance a un nivel conceptual y técnico, sin

validación en entornos urbanos. Asimismo, el estudio está limitado por la ausencia de modelación numérica (por ejemplo, mediante EPA SWMM o HYDRUS), que habría permitido simular escenarios hidrológicos y complementar la evaluación del desempeño del sistema integral. Finalmente, se identifica que el desempeño a largo plazo del sistema depende de un mantenimiento constante, tanto en la limpieza de los poros del concreto como en el cuidado de la vegetación de los jardines de lluvia, lo cual puede representar un desafío operativo en contextos municipales con limitaciones presupuestarias o institucionales.

1.8 Descripción del objeto de estudio

El proyecto de investigación se centra en el diseño de un sistema integral de drenaje urbano sostenible conformado por un pavimento permeable (empleado en banquetas) cuya mezcla incorpora RCD como sustituto parcial del agregado grueso convencional, y que se articula hidráulicamente con un jardín de lluvia adyacente. Este jardín, a su vez, emplea RCD en sus materiales filtrantes, lo que refuerza el enfoque de aprovechamiento de insumos reciclados en el sistema. La propuesta busca mejorar la gestión del agua pluvial en áreas urbanas altamente impermeabilizadas mediante la infiltración del escurrimiento superficial y su conducción hacia el jardín de lluvia, favoreciendo así los procesos locales de recarga y la mitigación de inundaciones.

El análisis comprende la evaluación estructural e hidráulica del concreto permeable con RCD, examinando su desempeño mecánico y su capacidad de transmisión de agua en las condiciones propias del entorno urbano. El diseño del pavimento considera parámetros como la pendiente, el espesor y la capacidad portante, así como criterios geotécnicos, para asegurar un comportamiento eficiente y una vida útil adecuada. De manera complementaria, se estudia la interacción hidráulica entre el pavimento permeable y el jardín de lluvia para maximizar la infiltración del agua captada, impulsar la recarga del subsuelo y sostener la vegetación seleccionada.

En conjunto, este sistema integral se perfila como una alternativa innovadora dentro del marco de los SUDS, al conjugar la disminución del escurrimiento superficial con la reutilización de RCD como insumo funcional tanto en el pavimento permeable como en el sistema filtrante del jardín de lluvia, contribuyendo así a la economía circular y a la resiliencia hídrica urbana.

Capítulo 2. Revisión de literatura

2.1 Introducción

Tal como se expuso en el capítulo anterior, la alta impermeabilización en zonas urbanas evidencia la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles que complementen o sustituyan a la infraestructura gris tradicional, que se ha mostrado insuficiente ante los desafíos actuales del cambio climático y de la urbanización.

En este contexto, los SUDS se han consolidado como un enfoque clave para gestionar el agua pluvial de forma más eficiente y resiliente. Estas soluciones reproducen, en la medida de lo posible, los procesos naturales de retención, filtración e infiltración del agua, aportando beneficios hidráulicos, ambientales y sociales (Fletcher et al., 2015; Çırağ et al., 2021). Entre las estrategias más destacadas se encuentran los pavimentos permeables y los jardines de lluvia, cuyo desempeño ha sido ampliamente documentado en diversos contextos climáticos y urbanos.

La revisión bibliográfica que se desarrolla en este capítulo tiene como propósito analizar los fundamentos, tipologías, ventajas y limitaciones de estas tecnologías, así como su integración en sistemas combinados que han demostrado ser más eficientes para el control del escurrimiento superficial. Asimismo, se identifican vacíos en la literatura sobre la evaluación conjunta de pavimentos permeables y jardines de lluvia, lo que justifica la pertinencia del presente proyecto, enfocado en el diseño de un prototipo integral que, además, incorpora RCD como parte del concreto permeable.

2.2 Fundamentos de drenaje urbano sostenible

El modelo tradicional de drenaje ha priorizado la evacuación rápida del agua pluvial mediante infraestructura gris, lo que ha intensificado el riesgo de inundaciones y el deterioro ambiental. Frente a esta visión, los SUDS proponen un enfoque basado en la retención, la infiltración y el tratamiento natural del agua de lluvia, que replican los procesos hidrológicos en entornos urbanos (Fletcher et al., 2015; Çırağ et al., 2021). Este cambio de enfoque se relaciona con otros conceptos afines, como el Desarrollo de Bajo Impacto y la infraestructura verde y azul, que se presentan a continuación.

2.2.1 Enfoque de desarrollo de bajo impacto (LID)

El LID (*Low Impact Development*) constituye una estrategia descentralizada que promueve la infiltración *in situ*, la recarga de acuíferos y la reducción de los volúmenes y las velocidades

de escorrentía, contribuyendo a la resiliencia urbana frente al cambio climático (Wang et al., 2022).

2.2.2 Infraestructura verde y azul

Los elementos de infraestructura verde y azul, como jardines de lluvia, zanjas de infiltración, techos verdes y pavimentos permeables, no solo cumplen una función hidráulica, sino que también aportan beneficios ecológicos y sociales, favoreciendo la calidad del aire, la biodiversidad y la habitabilidad urbana (Buurman et al., 2020).

Aunque los SUDS, el LID y la infraestructura verde y azul comparten objetivos comunes, no son conceptos equivalentes. El LID se enfoca en la gestión hidrológica a escala local, mientras que la infraestructura verde y azul responde a una visión más amplia de planificación territorial. En este trabajo se adopta el término SUDS como concepto principal por su enfoque específico en el drenaje pluvial urbano. No obstante, gran parte de los estudios disponibles se centran en aplicaciones en países con marcos regulatorios consolidados y regímenes de lluvia distintos al mexicano (Fletcher et al., 2015; Eckart et al., 2017), lo que introduce incertidumbre sobre la eficacia real de estas prácticas en ciudades semiáridas. Esta revisión evidencia una brecha en la comprensión de cómo estos enfoques deben adaptarse a condiciones locales para asegurar su sostenibilidad técnica y operativa (Ahiablame et al., 2012), lo que justifica el desarrollo de prototipos contextualizados, como el propuesto en este estudio.

2.3 Sistemas permeables de pavimento

2.3.1 Tipologías

Los sistemas de pavimento permeables incluyen una variedad de tipologías diseñadas para permitir la infiltración del agua a través de su superficie. Entre las variantes más comunes se encuentran el pavimento de bloques intertrabados con juntas permeables, el concreto permeable (también llamado poroso), el asfalto permeable y otros sistemas con elementos prefabricados que facilitan la conducción vertical del agua hacia las capas filtrantes (Fletcher et al., 2015; Çırağ et al., 2021). Por ejemplo, Hu et al. (2024) describen un sistema que integra rejillas, canales y pozos de almacenamiento para mejorar la eficiencia del drenaje en entornos urbanos. Asimismo, autores como Wang et al. (2021) y Rahman et al. (2022) destacan los beneficios del uso de superficies semipermeables en calles y banquetas, adaptadas al tipo de suelo y al clima locales. En la Tabla 2.1 se sintetizan algunas de sus características principales.

Tabla 2.1 Características de los pavimentos permeables.

Tipología de pavimento permeable	Características principales	Aplicaciones comunes	Ventajas hidráulicas	Cita
Bloques intertrabados con juntas permeables	Piezas prefabricadas con espacios entre las juntas rellenos con material granular que permiten la infiltración.	Banquetas, senderos peatonales, áreas de estacionamiento.	Alta capacidad de infiltración local.	Fletcher et al., 2015; Çırağ et al., 2021
Concreto permeable	Material cementante con agregados gruesos, sin agregados finos, estructura altamente porosa.	Estacionamientos, parques, zonas de baja carga vehicular.	Reduce los escurrimientos y mejora la recarga de acuíferos.	Fonseca-Alves et al., 2022; Liu et al., 2023
Asfalto permeable	Asfalto con mezcla abierta que permite el paso del agua; se utiliza en zonas de bajo tránsito.	Calles residenciales, ciclovías, aceras.	Mitiga los picos de escurrimiento durante las lluvias intensas.	Wang et al., 2021; Rahman et al., 2022
Sistemas combinados (rejillas, canales, pozos)	Componentes integrados que recolectan, conducen y almacenan el agua para su posterior infiltración.	Entornos urbanos con infraestructura híbrida para la captación y retención.	Mejora la eficiencia del drenaje y el control de las inundaciones.	Cely-Calixto, 2022; Hu et al., 2024

2.3.2 Composición

Los pavimentos permeables están conformados por un sistema estratificado que cumple funciones hidráulicas y estructurales específicas. En general, su estructura está compuesta por una capa superficial permeable, una capa de almacenamiento de base y una subbase de soporte y filtración. La capa superficial puede ser de concreto poroso o de asfalto permeable, con una porosidad que permite la infiltración vertical del agua pluvial. Esta capa suele diseñarse solo con agregados gruesos, lo que garantiza un sistema altamente poroso con capacidad filtrante (Alhama et al., 2023).

Debajo de esta capa, se localiza una base granular que actúa como medio de almacenamiento temporal del agua infiltrada. Esta base se construye con materiales de alta

permeabilidad y se recomienda que cuente con una gradación uniforme para facilitar el drenaje y evitar colmataciones. Por ejemplo, Ruíz-Pérez et al. (2022) describen un sistema que emplea una capa de grava bien graduada con un espesor de al menos 30 cm, diseñada para almacenar el agua antes de su infiltración al subsuelo. En algunos diseños se incorpora una capa de geotextil entre la base y la subbase para evitar la migración de finos y asegurar la durabilidad del sistema (Montoya-Coronado et al., 2023). Además, Heidari et al. (2021) señalan que la subbase debe construirse con materiales de coeficiente de permeabilidad elevado, lo cual puede evaluarse mediante ensayos in situ. Las gradaciones típicas se ajustan según las recomendaciones normativas para mantener un porcentaje de vacíos superior al 15%; este valor permite una infiltración y retención temporales adecuadas del agua (Figura 2.1).

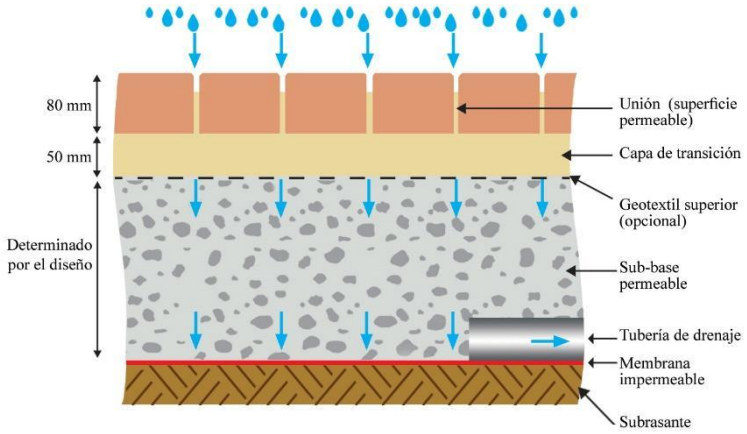

Figura 2.1 Esquema conceptual de un pavimento permeable típico. Fuente: Cárdenas-Gutiérrez et al. (2016).

Finalmente, Çırağ et al. (2021) destacan la importancia de un diseño modular que permita reemplazar o mantener las capas superiores sin afectar la funcionalidad del sistema completo, especialmente en entornos urbanos donde la carga estructural es baja y la eficiencia hidráulica es prioritaria.

2.3.3 Ventajas hidráulicas y limitaciones estructurales

Los pavimentos permeables ofrecen ventajas significativas en el manejo del agua pluvial urbana. Entre sus beneficios hidráulicos más destacados se encuentra la capacidad de infiltrar la escorrentía directamente en el sitio, lo que reduce los volúmenes de escurrimiento superficial y mitiga el riesgo de inundaciones urbanas. Fletcher et al. (2015) subrayan que estos sistemas son eficaces para captar y filtrar el agua de lluvia, lo que favorece la recarga del acuífero y reduce la carga sobre el sistema de drenaje convencional. Esta eficiencia se acentúa en áreas con precipitaciones moderadas, entendidas como eventos de lluvia de baja a media intensidad que no exceden la capacidad de infiltración del sistema y del suelo subyacente, además de suelos con buena capacidad de infiltración.

No obstante, su eficacia puede disminuir bajo ciertas condiciones climáticas. En regiones con alta frecuencia de lluvias intensas o en suelos de baja permeabilidad, como los arcillosos, el sistema puede saturarse con facilidad, lo que reduce su eficiencia. Autores como Coleman et al. (2021) y Wang et al. (2021) destacan que los pavimentos permeables presentan limitaciones estructurales en contextos de tráfico pesado o en zonas industriales, donde las cargas superan su resistencia mecánica, y recomiendan su uso preferente en espacios como estacionamientos, banquetas, parques o vías con bajo tránsito. Desde el punto de vista estructural, Kennedy (2011) señala que la durabilidad del sistema puede comprometerse si no se realiza un mantenimiento adecuado, especialmente en lo que respecta a la obstrucción de los poros. También, advierte que los pavimentos permeables requieren un diseño cuidadoso para prevenir deformaciones superficiales en su etapa de saturación, particularmente si no se han dispuesto capas de soporte adecuadas (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Idoneidad de adaptación de pavimentos permeables.

Propiedades hidráulicas destacadas	**Condiciones ideales**	**Limitaciones estructurales**	**Aplicaciones recomendadas**	**Cita**
Alta capacidad de infiltración, control de escorrentía	Lluvias moderadas, suelo permeable	Requiere mantenimiento por colmatación	Banquetas, parques, calles secundarias	Fletcher et al., 2015
Captura y filtración de escorrentía urbana	Clima templado, áreas residenciales	Baja resistencia a tránsito pesado	Estacionamientos, banquetas	Wang et al., 2021
Mejora de la calidad del agua y eficiencia en manejo pluvial	Lluvias no intensas, bajo tráfico	Vulnerabilidad a cargas estructurales altas	Ciclovías, áreas verdes urbanas	Coleman et al., 2021
Reducción de impermeabilización y volumen de escurrimiento	Climas urbanos húmedos moderados	Deformaciones por falta de capas de soporte	Calles residenciales	Kennedy, 2011
Infiltración local con modularidad y bajo impacto ambiental	Lluvias ligeras, zonas peatonales	Riesgo de saturación en suelos arcillosos	Sistemas urbanos de bajo impacto	Çırağ et al., 2021

En síntesis, estos sistemas son idóneos en climas templados con lluvias intermitentes y suelos medianamente permeables, mientras que, en contextos de lluvias extremas, su aplicación debe acompañarse de infraestructura complementaria para evitar la saturación.

2.3.4 Aplicaciones urbanas

El análisis de la bibliografía mostró que su aplicación en contextos urbanos es amplia, independientemente del clima y el tipo de pavimento. También se destacan algunas características que los hacen una alternativa viable bajo ciertas condiciones y no deseable en otras. Por ejemplo, Ruíz-Pérez et al. (2022) reportan la implementación de pavimento permeable en un entorno urbano residencial en España. El sistema consistía en una superficie de concreto poroso, combinada con capas filtrantes, para la gestión de la escorrentía pluvial. La aplicación de este sistema fue funcional en un contexto mediterráneo semiárido, con precipitaciones estacionales, y mostró una buena capacidad de infiltración en suelos de permeabilidad media.

Tabla 2.3 Precipitaciones estacionales en regiones semiáridas. Fuente (Gonzalez, 2009).

Estación	Porcentaje de precipitación anual	Precipitación estimada (mm)
Invierno	8 %	39 mm
Primavera	24 %	117 mm
Verano	42 %	205 mm
Otoño	26 %	127 mm
Total anual	100 %	488 mm

Se observó que este sistema era particularmente eficiente acompañado de un mantenimiento preventivo, lo que evitaba la colmatación de los poros. En otro estudio, Heidari et al. (2021) analizaron un sistema instalado en una ciudad del norte de Estados Unidos, donde las condiciones climáticas incluían lluvias frecuentes y suelos arenosos. El pavimento permeable, basado en concreto poroso, logró resultados positivos al reducir significativamente los volúmenes de escurrimiento superficial. Sin embargo, se destacó que su eficiencia disminuyó en invierno debido a la obstrucción de los poros por el congelamiento y los materiales de deshielo, lo que limitó su viabilidad en climas fríos sin un plan de mantenimiento adecuado. Liu et al. (2023) evaluaron el desempeño de pavimentos permeables en zonas urbanas densamente pobladas de China. Se implementaron superficies de bloques permeables en aceras y plazas. El sistema demostró eficiencia hidráulica en la captación y retención temporales del agua de lluvia en climas templados con lluvias moderadas. Una limitación señalada fue su menor resistencia estructural frente al tráfico intenso, por lo que no se recomendó su instalación en vías vehiculares principales.

D'Ambrosio y Longobardi (2023) modelaron la implementación de pavimentos permeables en una ciudad italiana propensa a las inundaciones. Se utilizó el software SWMM (*Storm Water*

Management Model) para simular su comportamiento bajo distintos escenarios de lluvia. Los resultados indicaron una reducción significativa de los caudales pico en eventos de retorno frecuente (hasta 10 años), lo que valida su uso como herramienta de resiliencia hídrica urbana. No obstante, su eficiencia disminuyó ante eventos extremos (retornos mayores a 50 años), especialmente cuando la capacidad de almacenamiento no estaba acompañada de sistemas complementarios de drenaje. En otro trabajo, se analizó un caso en una ciudad china de clima subtropical húmedo, donde se implementó el pavimento permeable como parte de un sistema de infraestructura verde. Se empleó asfalto poroso en ciclovías y zonas peatonales (Jin et al., 2024). El sistema funcionó con buena eficiencia hidráulica durante lluvias moderadas, pero presentó una baja capacidad de infiltración durante tormentas intensas debido a la saturación del subsuelo. Además, en zonas con alta carga de sedimentos, la colmatación redujo su funcionalidad a mediano plazo.

Aunque diversos estudios documentan las ventajas hidráulicas de los pavimentos permeables y describen sus distintas configuraciones y respuestas técnicas (Fletcher et al., 2015; Çırağ et al., 2021), el análisis evidencia inconsistencias y limitaciones significativas relacionadas con su desempeño en suelos finos, su susceptibilidad a la colmatación y la falta de datos sobre su funcionamiento a largo plazo en zonas semiáridas. Además, la literatura revisada ofrece poca información sobre la integración de RCD en SUDS, una variable que podría modificar tanto la resistencia mecánica como la capacidad de infiltración del sistema.

2.4 Jardines de lluvia

2.4.1 Definición y principios hidrológicos

Los jardines de lluvia se reconocen como una estrategia dentro del conjunto de desarrollos de bajo impacto. Se definen como sistemas superficiales diseñados para captar, infiltrar y tratar el agua de escorrentía urbana en el punto de generación, mediante vegetación nativa y sustratos filtrantes que permiten su retención temporal y su posterior infiltración en el subsuelo (Çırağ et al., 2022). Desde una perspectiva funcional, estos sistemas actúan como depresiones o áreas hundidas que reciben el agua pluvial desde las superficies impermeables circundantes. Su diseño incluye una combinación de suelos filtrantes, vegetación adaptada localmente y capas estructuradas que permiten controlar el volumen de escurrimiento, contribuyendo al control de inundaciones y a la mejora de la calidad del agua (Fletcher et al., 2015). La presencia de plantas facilita la evapotranspiración y fomenta la actividad biológica, mientras que el medio filtrante retiene sedimentos y contaminantes antes de que el agua alcance los cuerpos receptores (Figura 2.2).

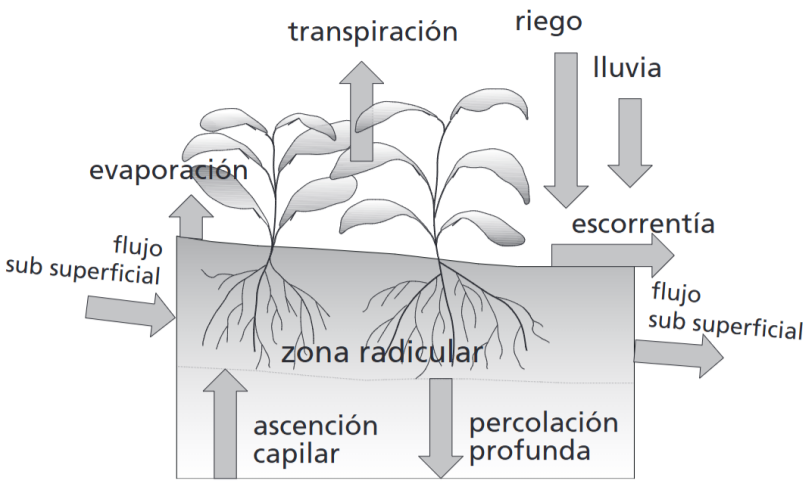

Figura 2.2 Factores que afectan la escorrentía y balance de agua en zona radicular de un jardín de lluvia. Fuente: Allen et al. (2006).

Hay autores que destacan que los jardines de lluvia pueden considerarse una forma de infraestructura descentralizada que, además de controlar la escorrentía, aporta beneficios estéticos y ecológicos, especialmente en entornos urbanos densamente impermeabilizados (Buurman et al., 2020). Su eficiencia hidrológica depende de factores como el tipo de suelo, la profundidad del sistema, la pendiente y el volumen de almacenamiento disponible. En contextos donde las precipitaciones son intensas pero esporádicas, como en zonas semiáridas, su implementación requiere una cuidadosa consideración de las tasas de infiltración del suelo base y la capacidad de almacenamiento intermedio para evitar saturaciones o encharcamientos.

En algunos estudios se hace referencia a sistemas análogos, como los *swales* o zanjas de bioinfiltración, que comparten principios hidrológicos similares, aunque difieren en la geometría y en la conducción del flujo superficial (Kennedy, 2011). En todos los casos, el diseño modular y adaptable de los jardines de lluvia les permite integrarse eficazmente en espacios públicos, camellones, parques o zonas peatonales, donde pueden absorber parte de los volúmenes de agua generados por eventos pluviales extremos.

La Tabla 2.3 sintetiza las definiciones, alcances y principios hidrológicos identificados por los autores:

Tabla 2.4 Principios hidrológicos de los jardines de lluvia.

Definición y diseño	Principios hidrológicos	Condiciones de aplicación recomendadas	Autor
Sistemas vegetados que infiltran agua de escorrentía	Retención, filtración e infiltración superficial	Áreas urbanas impermeables con vegetación local	Çırağ et al. (2022)

Infraestructura verde descentralizada	Captura y retardo de escorrentía, mejora de calidad	Calles y zonas peatonales en zonas urbanas	Buurman et al. (2020)
Swales como sistemas equivalentes	Transporte lento del flujo, filtración natural	Áreas con espacio longitudinal disponible	Kennedy (2011)
Sistemas con vegetación y capas de suelo permeable	Control del volumen, pico de escurrimiento	Uso intensivo en parques y zonas verdes urbanas	Fletcher et al. (2015)

2.4.2 Criterios técnicos de diseño

Los jardines de lluvia presentan una estructura funcional estratificada que responde a múltiples objetivos: infiltración, retención temporal, tratamiento del agua y, en ciertos casos, recarga de acuíferos. Su eficacia depende de la adecuada integración de cuatro componentes esenciales: la cuenca de captación, el medio filtrante, la vegetación seleccionada y los elementos auxiliares de control. En la Tabla 2.4 se presentan los criterios técnicos aplicables al diseño de jardines de lluvia basados en distintas normativas internacionales.

Tabla 2.5 Criterios técnicos aplicables a los jardines de lluvia.

Parámetro técnico	**Recomendación observada en la literatura**	**Norma o manual relacionado**
Relación área de captación / jardín	Entre 5:1 y 10:1	EPA Stormwater Management Manual (EE.UU.)
Pendiente de la cuenca	≤ 5%	ASCE LID Guidelines
Conductividad hidráulica del suelo	10^{-4} a 10^{-5} m/s	ASTM D5268 / Guías LID
Profundidad del lecho filtrante	0.3 a 0.6 m	Manual WSUD (Australia) / California LID Manual
Vegetación	Nativa, resistente a estrés hídrico	Principios de Diseño SBN, EPA / ASLA (Sociedad de Paisajistas)
Bermas y estructuras de rebose	Altura de 15-30 cm; salidas a pozos de absorción	EPA / Manual Técnico de SUDS (Reino Unido)

El área de captación, o cuenca tributaria, define el volumen de escorrentía que se conducirá al jardín de lluvia. La literatura analizada destaca que la proporción entre el área impermeable de aportación y el área del jardín debe mantenerse entre 5:1 y 10:1 para asegurar la

funcionalidad hidrológica del sistema (Fletcher et al., 2015). Cuando se supera este umbral sin un redimensionamiento adecuado del jardín, se corre el riesgo de saturación superficial, de reducción de la eficiencia de infiltración y de formación de encharcamientos persistentes. Por tanto, el tamaño del jardín debe calcularse considerando el coeficiente de escurrimiento, la intensidad del evento de diseño y la capacidad de almacenamiento temporal del sistema.El subsuelo del jardín se compone de un medio filtrante poroso que favorece la infiltración y la retención de contaminantes. Los autores coinciden en que el medio debe ser una mezcla equilibrada de arena, limo y materia orgánica, con suficiente permeabilidad (valores de conductividad hidráulica entre $1x10^{-4}$ y $1x10^{-5}$ m/s) para facilitar el flujo descendente sin riesgo de compactación (Çırağ et al., 2022). Es recomendable evitar suelos con altos contenidos de arcilla, ya que estos reducen significativamente la infiltración. Algunos diseños también incorporan capas de grava en la base para aumentar la capacidad de drenaje y prevenir el anegamiento.

El uso de especies vegetales nativas o adaptadas a condiciones de humedad variable es un principio rector en el diseño de jardines de lluvia. Esta vegetación cumple múltiples funciones: absorbe agua mediante la evapotranspiración, estabiliza el suelo, intercepta sólidos suspendidos y fomenta procesos biogeoquímicos, como la fitorremediación. Buurman et al. (2020) señalan que la diversidad vegetal también contribuye a la resiliencia del sistema frente a sequías prolongadas o eventos intensos de lluvia, mientras que Fletcher et al. (2015) enfatizan su rol en el soporte ecológico urbano.

Adicionalmente, el diseño puede incluir bordes o bermas para contener el agua, entradas y salidas controladas (como vertederos o bajantes conectados a pozos de absorción), y materiales geotextiles entre capas para evitar el colapso del sistema por migración de finos. Es necesario prever un sistema de mantenimiento accesible que permita eliminar los sedimentos acumulados y asegurar la funcionalidad a largo plazo. En la Tabla 2.5 se presenta un resumen de los principales componentes estructurales de estos sistemas.

Tabla 2.6 Componentes principales de los jardines de lluvia y su funcionalidad.

Componente estructural	Descripción técnica	Función principal	Fuente
Cuenca de captación	Área tributaria impermeable que aporta escorrentía	Determina el volumen de diseño	Fletcher et al., 2015
Medio filtrante	Mezcla arenosa con permeabilidad específica	Filtración, retención de contaminantes	Çırağ et al., 2022
Vegetación	Plantas nativas o resistentes a estrés hídrico	Evapotranspiración, retención, remediación	Buurman et al., 2020

Capa base/grava	Subcapa drenante con alta porosidad	Almacenamiento e infiltración profunda	Fletcher et al., 2015
Bermas y rebosaderos	Bordes estructurales y salidas controladas	Control de excedencias y protección del sistema	Kennedy, 2011
Geotextiles (opcional)	Separación de capas, prevención de colmatación	Mejora durabilidad del sistema	Fletcher et al., 2015

Los jardines de lluvia, como parte integral de los SUDS, presentan ventajas hidráulicas notables cuando están diseñados adecuadamente. En los estudios revisados se reporta la importancia de los siguientes parámetros técnicos:

2.4.3 Efectividad en mitigación de escorrentía e incremento de la infiltración

Los jardines de lluvia han demostrado su capacidad para reducir significativamente los volúmenes de escorrentía superficial. Estudios como los de Fletcher et al. (2015) y Buurman et al. (2020) reportan reducciones del volumen de escorrentía superficial entre un 50% y un 80%, así como un aumento significativo de la capacidad de infiltración del agua pluvial, particularmente cuando se diseñan considerando características locales como el tipo de suelo, la pendiente y las condiciones climáticas.

Un aspecto crítico es el tiempo de residencia del agua en el jardín, que favorece una mayor infiltración y evapotranspiración. Se reporta que los jardines de lluvia pueden retener agua durante periodos de entre 1 y 4 horas en condiciones de lluvia intensa, lo que permite reducir los picos de escorrentía (Çırağ et al., 2022).

La eficacia de los jardines de lluvia puede verse comprometida en terrenos con elevada compactación o baja capacidad de infiltración, ya que estas condiciones limitan la absorción del agua. Asimismo, si no se realiza un mantenimiento periódico, existe el riesgo de colmatación del medio filtrante, lo que reduce su capacidad de filtración. Además, en regiones con precipitaciones frecuentes o prolongadas, el sistema puede operar con menor eficiencia debido a la saturación del sustrato, lo que impide un drenaje adecuado entre eventos consecutivos (Kennedy, 2011).

2.4.4 Adaptación en distintos climas y su eficiencia

En regiones con climas templados húmedos y monzónicos subtropicales, como en ciudades de Escocia, Estados Unidos y Asia sudoriental, es muy frecuente este tipo de alternativas. En estos contextos, la variabilidad en la intensidad y la frecuencia de las lluvias ha motivado el desarrollo de soluciones que permitan controlar los picos de escorrentía, mitigar las inundaciones y favorecer la recarga de acuíferos. Por ejemplo, en climas monzónicos con

precipitaciones anuales entre 1800 y 2400 mm, Buurman et al. (2020) destacan la funcionalidad de los jardines de lluvia para regular volúmenes importantes de escorrentía, siempre que se incorporen medios filtrantes con buena conductividad hidráulica.

En contraste, su aplicación ha sido menos frecuente y eficiente en zonas con climas áridos o semiáridos, donde las precipitaciones son escasas y altamente variables, o bien en contextos tropicales húmedos con lluvias constantes, donde los suelos tienden a permanecer saturados. En estos escenarios, la eficiencia del sistema se ve comprometida por la infiltración insuficiente entre eventos consecutivos o por la rápida saturación del medio filtrante, como advierte Kennedy (2011). La alta compactación del suelo urbano también constituye una barrera importante para el desempeño del suelo.

2.4.5 Recomendaciones para su adaptación

En la bibliografía se encuentran recomendaciones clave para asegurar la eficacia de los jardines de lluvia en entornos urbanos:

1. Diseñar sistemas adaptados al régimen climático local, que incluyan una capacidad de retención suficiente para eventos extremos y tiempos de recarga adecuados (Buurman et al., 2020).

2. Garantizar un mantenimiento periódico para evitar la colmatación y preservar la funcionalidad del medio filtrante (Kennedy, 2011).

3. Utilizar suelos modificados o sustratos artificiales de alta conductividad hidráulica en zonas con suelos compactados o impermeables (Fletcher et al., 2015).

4. Asegurar la conexión con superficies impermeables controladas, como azoteas o vialidades, para maximizar la captación sin saturar el sistema (Çırağ et al., 2022).

5. Incorporar el monitoreo hidrológico para ajustar el diseño en función del comportamiento observado durante eventos reales de lluvia.

Los jardines de lluvia aparecen en la literatura como una herramienta idónea para mejorar la infiltración, reducir los caudales pico y promover los servicios ecosistémicos urbanos (Buurman et al., 2020; Çırağ et al., 2022). Sin embargo, en esta revisión se aprecia que gran parte de las guías y recomendaciones provienen de climas templados o húmedos, donde su operación y mantenimiento responden a patrones pluviales diferentes. Asimismo, los estudios tienden a centrarse en resultados exitosos, sin profundizar en problemáticas como la saturación del medio filtrante, la acumulación de sedimentos o la rápida pérdida de eficiencia en suelos compactados, condiciones comunes en las ciudades mexicanas. Esto muestra la necesidad de validar empíricamente la pertinencia de los parámetros de diseño en contextos semiáridos y de analizar adaptaciones que mejoren su funcionalidad.

2.5 Sistemas combinados de pavimento permeable y jardín de lluvia

La integración de concreto permeable y jardines de lluvia como sistemas combinados de drenaje urbano sostenible se ha explorado por algunos autores como una estrategia eficaz para mejorar la captación, retención e infiltración del agua de escorrentía en entornos urbanos. Esta sinergia responde a la creciente necesidad de mitigar los efectos de la urbanización acelerada y la impermeabilización del suelo, fenómenos que comúnmente se asocian con el incremento de las inundaciones urbanas y la degradación del ciclo hidrológico. A continuación, se analizan algunos de sus enfoques específicos:

2.5.1 Aplicación en zonas urbanas

Según Çırağ et al. (2022), los sistemas combinados de pavimento permeable y jardines de lluvia se han adaptado a proyectos de infraestructura verde y azul orientados a controlar eficientemente los caudales generados por lluvias de diseño. Los autores destacan que estos sistemas se instalan con frecuencia en vialidades secundarias, banquetas, estacionamientos y camellones urbanos, aprovechando superficies previamente impermeables como puntos de captación. Por otro lado, Buurman et al. (2020) describen aplicaciones similares en entornos tropicales húmedos, como Singapur, donde se emplearon pavimentos permeables para conducir el agua pluvial hacia zanjas de infiltración o jardines de lluvia, lo que permite retardar y reducir el volumen de escurrimiento superficial. Esta combinación resultó especialmente útil en zonas con lluvias intermitentes y alta densidad urbana, donde el espacio disponible para soluciones de captación es limitado.

2.5.2 Criterios de diseño

En cuanto al diseño, los autores coinciden en que es importante establecer una relación adecuada entre el área de captación (generalmente una superficie pavimentada permeable) y la capacidad de retención del jardín de lluvia. Fletcher et al. (2015) enfatizan que el diseño debe considerar pendientes suaves que faciliten el flujo hacia el jardín, así como sustratos con elevada conductividad hidráulica. La combinación adecuada de materiales porosos en el concreto y de medios filtrantes estratificados en el jardín permite mantener altas tasas de infiltración incluso bajo condiciones de saturación temporal.

Estos sistemas favorecen un aumento del tiempo de concentración del flujo, lo que contribuye a disminuir los gastos pico durante eventos de lluvia intensa (Fletcher et al., 2015). También ofrecen beneficios adicionales en la mejora de la calidad del agua, al facilitar procesos de filtración tanto física, química y biológica, que ayudan a depurar el escurrimiento antes de su infiltración o descarga (Buurman et al., 2020). No obstante, se han identificado limitaciones técnicas importantes; por ejemplo, la colmatación progresiva del concreto permeable puede comprometer su funcionamiento si no se integran elementos de prefiltrado como rejillas o separadores de sólidos (Kennedy, 2011). Asimismo, la presencia de suelos

arcillosos o altamente compactados bajo el jardín de lluvia puede dificultar la infiltración, lo que puede provocar saturación y desbordamientos si el sistema no se diseña adecuadamente.*2.5.3*

2.5.3 Eficiencia hidráulica

En cuanto a su desempeño, Fletcher et al. (2015) reportan que los sistemas combinados pueden reducir la escorrentía total hasta un 80%, según las características del evento pluvial y el diseño del sistema. Buurman et al. (2020) observan que la integración con un pavimento permeable mejora sustancialmente la eficiencia en la captación inicial del agua, reduciendo la velocidad de escurrimiento y permitiendo una descarga más gradual al subsuelo. Çırağ et al. (2022) señalan que en pruebas realizadas en zonas urbanas con pendientes entre 0.01% y 7.35%, el rendimiento de los jardines de lluvia combinados con concreto permeable fue superior al de otras estrategias aisladas, siempre que se mantuvieran los parámetros de diseño dentro de los márgenes recomendados.

La eficiencia de un SUDS depende directamente de un diseño adecuado, adaptado a las características locales de clima, topografía y uso del suelo. Casos como los que evaluó Cerda et al. (2025) en el barrio de San Eugenio de Santiago, Chile, muestran que, cuando se ajustan correctamente los elementos del sistema al contexto, es posible gestionar eficazmente el agua pluvial, reducir las inundaciones y mejorar las condiciones ambientales urbanas.

2.5.4 Medidas de mantenimiento y prolongación de la vida útil

Los sistemas combinados requieren una gestión cuidadosa para mantener su eficiencia a largo plazo. Kennedy (2011) recomienda implementar rutinas periódicas de limpieza del concreto permeable para evitar su obstrucción, así como revisar la vegetación del jardín de lluvia y eliminar los sedimentos acumulados. Además, es necesario prever inspecciones posteriores a eventos de lluvia intensa para detectar posibles bloqueos o pérdidas de capacidad del sistema filtrante. También Fletcher et al. (2015) sugieren que el mantenimiento puede integrarse en programas municipales de gestión de áreas verdes o de equipamientos urbanos, lo que incrementa su viabilidad operativa y reduce los costos asociados.

El mantenimiento es esencial para garantizar el buen desempeño de los SUDS. Un mal funcionamiento puede hacerlos ineficaces en su propósito de gestionar el agua pluvial. Las actividades de conservación varían según el tipo de sistema:

- Pavimentos permeables: requieren limpieza regular para evitar la obstrucción de los poros, inspecciones frecuentes de su capacidad de infiltración y reparación de grietas que afecten la resistencia o la permeabilidad (Arantes-de Oliveira, 2021; Abdel-Rahman et al., 2023).
- Jardines de lluvia: es necesario verificar la infiltración tras cada lluvia, eliminar la maleza, revisar las entradas y salidas de agua, renovar el material filtrante si pierde capacidad filtrante y reemplazar las plantas que no se adapten al entorno.

Zanjas de infiltración: deben inspeccionarse para garantizar el flujo de agua, retirarse residuos y sedimentos, mantener la vegetación controlada, reponer el material filtrante cuando se compacte o se desplace, revisar la estructura y, de ser necesario, realizar limpiezas profundas.

Los hallazgos de estos autores confirman el potencial de combinar pavimentos permeables con jardines de lluvia para incrementar la retención, la infiltración y el control de las escorrentías (Fletcher et al., 2015; Çırağ et al., 2022). Sin embargo, la escasa cantidad de estudios experimentales revela que aún existe poca comprensión sobre la interacción hidráulica real entre ambos sistemas, especialmente en condiciones extremas de precipitación y suelos de baja permeabilidad. Además, la integración de dos tecnologías aumenta los retos constructivos, los requerimientos de mantenimiento y la complejidad de la modelación. Esta escasez de evidencia subraya que sistemas híbridos como el propuesto en la tesis requieren ser evaluados de manera rigurosa y contextualizada para ofrecer lineamientos aplicables en ciudades semiáridas.

2.6 Vacíos en la literatura y oportunidades

La revisión de estudios relacionados con los SUDS muestra que la mayoría de los elementos, como los jardines de lluvia y los pavimentos permeables, han sido evaluados de forma aislada. Esta tendencia ha dejado un vacío en el conocimiento sobre la sinergia entre ambas tecnologías, en particular respecto de su efecto combinado en la reducción de los volúmenes de escorrentía, la disminución de los caudales pico y la capacidad de captación e infiltración pluvial.

Un ejemplo de evaluación individual es el estudio de Álvarez-Castillo y Jalire-Valdivia (2024), quienes propusieron la implementación de jardines de lluvia como infraestructura verde para mitigar las inundaciones en el distrito de Mariano Melgar, Arequipa. Mediante la modelación en EPA SWMM, los autores demostraron que este sistema reduce en promedio un 25% el caudal pico y un 22% el volumen de agua superficial, y concluyeron que constituye una estrategia efectiva, sostenible y replicable para el control pluvial urbano. No obstante, como se ha señalado, estos sistemas han sido valorados de forma independiente y no en combinación con pavimentos permeables.

En el caso de las banquetas de concreto hidráulico, se ha documentado que solo permiten aproximadamente un 10% de infiltración, mientras que el 90% restante del escurrimiento podría aprovecharse de manera más eficiente si se emplearan pavimentos permeables acoplados a jardines de lluvia. Entre la variedad de pavimentos disponibles, resulta relevante el concreto elaborado con RCD por su carácter sostenible y por las evidencias disponibles sobre su capacidad de infiltración. Sin embargo, al igual que ocurre con los jardines de lluvia, estos materiales han sido estudiados principalmente de forma aislada.

El rápido crecimiento urbano y la impermeabilización del suelo han generado serios problemas en la gestión de las aguas pluviales, como inundaciones y la sobrecarga de los sistemas de drenaje. Frente a ello, los SUDS se presentan como una alternativa eficaz, pues tecnologías como el concreto permeable y los jardines de infiltración contribuyen a reducir la escorrentía, prevenir inundaciones, favorecer la recarga de acuíferos y mejorar la calidad del agua (Jiménez y Martínez, 2020). Ejemplos de éxito se han documentado en Bogotá, Colombia, donde el concreto permeable ha demostrado su efectividad en la reducción de inundaciones y en la mejora de la calidad del agua (García y Rodríguez, 2021), y en Curitiba, Brasil, donde los jardines de infiltración han sido empleados para mitigar los efectos de lluvias intensas en áreas urbanas en rápido crecimiento (Santos y Silva, 2019).

El potencial de los SUDS va más allá de la gestión hidráulica, pues también favorece la construcción de ciudades más sostenibles y resilientes. No obstante, su efectividad depende de factores como el tipo de suelo, las condiciones climáticas y la planificación adecuada de los sistemas de drenaje (Pérez et al., 2018).

La identificación de vacíos en la literatura indica que los estudios sobre SUDS suelen centrarse en tecnologías individuales, lo que deja poco explorada la evaluación integral de sistemas combinados y su desempeño bajo diferentes condiciones hidrológicas (Jiménez y Martínez, 2020; Álvarez-Castillo y Jalire-Valdivia, 2024). Esta carencia se intensifica cuando se consideran materiales alternativos, como los RCD, cuyo uso aún carece de protocolos estándar que garanticen su calidad y funcionalidad hidráulica. Por ende, se reconoce la urgencia de desarrollar investigaciones que integren análisis hidráulicos, constructivos y ambientales, con el fin de generar evidencia que oriente futuras normativas y prácticas urbanas en México.

2.7 Uso de residuos de construcción y demolición en una mezcla de concreto permeable

Los RCD representan una fracción considerable del total de los residuos sólidos producidos en el mundo (entre 25% y 30%; Sakhtibala et al., 2025. En México, la ausencia de infraestructura adecuada para su gestión ha derivado en prácticas deficientes de disposición, entre ellas el depósito en tiraderos clandestinos, con las consecuentes afectaciones ambientales (Ossa-López y Rojas-Valencia, 2023).

El aprovechamiento de RCD en la producción de concretos se ha posicionado como una alternativa relevante, ya que contribuye a mitigar impactos como la contaminación del suelo, la obstrucción de cuerpos de agua y la sobreexplotación de recursos naturales (Poon y Chan, 2022). De este modo, su reutilización impulsa la transición hacia una economía circular en la industria de la construcción, un sector en el que resulta particularmente difícil implementar prácticas sostenibles (Nibhanupudi et al., 2020).

Uno de los aspectos técnicos más relevantes es la granulometría de los RCD. Al provenir de procesos de demolición, estos materiales presentan formas y tamaños heterogéneos en comparación con los agregados convencionales. Por ello, es indispensable aplicar un proceso de tamizado conforme a la norma ASTM C33, que establece los requisitos granulométricos necesarios para garantizar mezclas homogéneas y con propiedades mecánicas adecuadas. El equilibrio entre agregados gruesos y finos es esencial para evitar pérdidas de resistencia y durabilidad del concreto (Valdés et al., 2020). Otro factor para considerar es la mayor porosidad y absorción de agua de los RCD en comparación con los agregados naturales. Estas características exigen ajustes en la proporción agua/cemento para prevenir problemas como la segregación o la fisuración temprana del concreto (Juárez y Rodríguez, 2020).

El proceso de preparación de los RCD incluye varias etapas:

- Separación y limpieza, en las que se eliminan materiales no pétreos, como madera, plásticos o vidrio.
- Trituración, que permite obtener fragmentos más pequeños para su posterior clasificación, siguiendo lineamientos como la NOM-161-SEMARNAT-2011 y la UNE-EN 933-1.
- Tamizado, mediante el cual se asegura una distribución granulométrica adecuada para su uso en mezclas de concreto (Valdés et al., 2020).

Se ha demostrado que es posible sustituir hasta un 30% de los agregados gruesos por RCD sin comprometer significativamente la resistencia del concreto, aunque puede requerirse un ligero incremento de la cantidad de agua o la incorporación de aditivos reductores de agua para optimizar la trabajabilidad de la mezcla (Nibhanupudi et al., 2020). No obstante, en el caso de concretos permeables, el porcentaje de sustitución debe ser menor, ya que incrementos más altos afectan directamente la resistencia a la compresión, por lo que se requiere un equilibrio entre la permeabilidad y la resistencia estructural.

Una dosificación típica de concreto permeable con 30% de RCD puede incluir (Juárez y Rodríguez, 2020):

- Cemento: 250 kg/m^3
- Agregados gruesos reciclados: 1100 kg/m^3
- Agua: 150 litros/m^3
- Relación agua/cemento: 0.6
- Aditivos: para mejorar la cohesión y reducir la segregación.

Este tipo de mezcla mantiene una permeabilidad adecuada y alcanza resistencias a la compresión de 15 a 20 MPa, lo que la hace viable para pavimentos ligeros y áreas peatonales (Oliveira y Silva, 2021).

Aunque los estudios consultados respaldan el potencial de los RCD como sustitutos parciales de agregados convencionales (Nibhanupudi et al., 2020; Valdés et al., 2020), el

análisis revela incertidumbres importantes respecto a su comportamiento en concretos permeables, donde las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen de la conectividad y la estabilidad de la estructura porosa. Además, la variabilidad granulométrica, química y física de los RCD conlleva riesgos que rara vez se evalúan de manera integral. Esta revisión demuestra la necesidad de investigaciones que cuantifiquen el desempeño del concreto permeable con RCD en condiciones reales, asegurando que su uso aporte beneficios ambientales sin comprometer la eficiencia hidráulica del sistema.

2.8 Normativas y regulaciones

Los SUDS constituyen un enfoque integral de la planificación urbana que busca gestionar el agua pluvial de manera sostenible, imitando los procesos hidrológicos naturales y mitigando los impactos de la urbanización. Para su implementación, distintos países han desarrollado normativas, directrices y marcos regulatorios que orientan su diseño, aplicación y mantenimiento.

En el ámbito internacional, la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, establece un marco comunitario para la protección de las aguas superficiales, subterráneas, de transición y costeras. De forma complementaria, la Directiva 2007/60/CE, también del Parlamento Europeo y del Consejo, se centra en la evaluación y gestión de los riesgos de inundación en la Unión Europea. En España, la Guía de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible analiza las causas y consecuencias de las inundaciones urbanas, promoviendo la conciencia social y el uso de los SUDS como herramienta de prevención y mitigación (Gil-Olcina, 2010).

En el Reino Unido, el documento *The SuDS Manual* (CIRIA C753) es una de las guías más completas para el diseño, la implementación y el mantenimiento de este tipo de sistemas. Su enfoque establece estándares y mejores prácticas para garantizar la eficacia hidráulica y la sostenibilidad ambiental de las soluciones aplicadas.

En América Latina también se han desarrollado lineamientos específicos. En Colombia, los "Lineamientos para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)" orientan a planificadores y diseñadores en la adopción de soluciones que reduzcan la escorrentía y mejoren la calidad del agua (Tarazona-Tobo et al., 2021). En México, el "Manual de Lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos", elaborado por el Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo (Instituto Municipal de Planeación Urba-na de Hermosillo, 2017), la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) y el Banco de Desarrollo de América del Norte (NADBank), establecen criterios técnicos y normativos para implementar infraestructura verde en entornos urbanos. El manual de lineamientos integra prácticas como jardines de lluvia, pavimentos permeables, techos y muros verdes y se alinea con marcos nacionales como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (Camara de Diputados de H. Congreso de la Union, 1988), la Ley

General de Cambio Climático (Camara de Diputados de H. Congreso de la Unión, 2012) y la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (Camara de Diputados de H. Congreso de la Union, 2016).

En el caso del estado de Hidalgo, la gestión del agua y del alcantarillado está regulada por la Ley Estatal de Agua y Alcantarillado (Gobierno del Estado, 2025), que define las bases para la prestación de servicios públicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento, y promueve un uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos. Su aplicación se detalla en el Reglamento de la Ley Estatal de Agua y Alcantarillado (Gobierno del Estado, 2000), en el que se establecen disposiciones específicas para garantizar la eficiencia de dichos servicios. Además, la Ley para la Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo (Gobierno del Estado, 2025), regula la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección de los recursos aire, agua y suelo, lo que abre la posibilidad de incorporar infraestructuras verdes y prácticas sostenibles en la gestión pluvial.

Si bien aún no existen normativas específicas sobre SUDS en Hidalgo en general o en Pachuca en particular, el conjunto de leyes y reglamentos vigentes proporciona un marco legal sólido que respalda la integración progresiva de estas prácticas en la gestión del agua y la planificación ambiental regional.

A pesar de que existen marcos normativos internacionales que regulan la gestión pluvial y la infraestructura verde, el análisis muestra que México carece de lineamientos específicos para la implementación de SUDS y el uso de RCD en la infraestructura urbana (CIRIA, 2015; IMPLAN Hermosillo, 2017; Tarazona-Tobo et al., 2021). Esta ausencia normativa dificulta la estandarización del diseño, la construcción y la evaluación de soluciones sostenibles, lo que provoca escasa orientación para instituciones y proyectistas. Por ello, la generación de evidencia técnica a partir de estudios como esta tesis resulta esencial para promover la futura adopción de criterios locales que garanticen la viabilidad y la seguridad de estos sistemas en ciudades mexicanas.

2.9 Metodología básica para la construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

La construcción de SUDS depende de las condiciones específicas de cada sitio y de los requerimientos del proyecto. No obstante, existen procesos mínimos e integrados que deben seguirse para asegurar su correcto funcionamiento (Navarra de Infraestructuras Locales, S.A., 2023):

- Planificación y diseño. Se inicia con el análisis de las fuentes de captación de agua pluvial, el cálculo de los niveles de escorrentía y la selección de los elementos más adecuados para su gestión. Entre ellos pueden considerarse pavimentos permeables, áreas de

infiltración, estanques de retención o canales vegetados, siempre adaptados al contexto local.

- Preparación del terreno. Incluye la limpieza del área de trabajo, la remoción de obstáculos o de vegetación no deseada y, de ser necesario, la nivelación del suelo para garantizar la estabilidad de las estructuras.
- Instalación de los elementos del sistema. En esta fase se colocan superficies permeables, como adoquines o concreto poroso, se excavan áreas para la infiltración y se construyen estructuras, como jardines de lluvia o zanjas verdes.
- Integración de conexiones hidráulicas. Se instalan tuberías y sistemas complementarios de drenaje que conectan entre sí los diferentes componentes del SUDS, lo que permite una circulación eficiente y controlada del agua.
- Incorporación de vegetación y paisajismo. Se seleccionan y se plantan especies vegetales adecuadas, capaces de favorecer la absorción de agua, estabilizar el suelo y, a la vez, mejorar la estética urbana.
- Supervisión y mantenimiento. Finalmente, se implementa un plan de conservación que contempla inspecciones periódicas, la limpieza de residuos, la eliminación de obstrucciones y la evaluación del desempeño hidráulico, con el fin de garantizar la funcionalidad del sistema a largo plazo.

La revisión desarrollada en este capítulo evidencia que, si bien la literatura internacional reconoce la utilidad de los SUDS, los pavimentos permeables y los jardines de lluvia como estrategias para mejorar la gestión pluvial urbana, persisten limitaciones importantes cuando se quiere transferir estos enfoques a zonas semiáridas con alta impermeabilización y condiciones geotécnicas específicas, como las presentes en el centro de México. La mayoría de los estudios analizados proviene de contextos donde la normativa, la disponibilidad de datos y las capacidades de mantenimiento difieren significativamente de las que enfrentan los municipios mexicanos, lo que restringe la aplicabilidad directa de sus recomendaciones. Asimismo, los trabajos sobre sistemas combinados siguen siendo escasos, por lo que aún no se comprende plenamente la interacción hidráulica entre pavimentos permeables y jardines de lluvia bajo distintos escenarios de precipitación. A ello se suma la limitada evidencia sobre el uso de residuos de construcción y demolición en concretos permeables y medios filtrantes, pese a que su incorporación representa una oportunidad para fortalecer las prácticas de economía circular. La ausencia de lineamientos normativos nacionales específicos agrava estas incertidumbres y subraya la necesidad de generar información técnica contextualizada. El sistema integrado analizado en esta tesis se plantea como una contribución para cubrir estos vacíos, al evaluar conjuntamente el desempeño hidráulico y la viabilidad constructiva de SUDS en condiciones urbanas semiáridas.

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología empleada para el diseño de un sistema integral, que consiste en una banqueta de concreto permeable que canaliza el agua de lluvia hacia una jardinera (zanja de infiltración o jardín de lluvia). Este estudio busca analizar las características, los materiales y los procesos constructivos necesarios para la implementación de SUDS y contribuir a la gestión eficiente del agua pluvial. Mediante una descripción detallada, se documentarán las propiedades del concreto permeable, la capacidad de infiltración del sistema y su impacto en la reducción del escurrimiento superficial, con el fin de generar una solución sostenible para el manejo del agua pluvial en entornos urbanos.

3.1 Enfoque de investigación

El diseño propuesto en este trabajo servirá como un sistema integral de retención, infiltración y recuperación parcial de la escorrentía urbana, funcionando como una obra de drenaje sostenible que contribuirá a la gestión eficiente del agua pluvial en entornos urbanos. Este sistema estará conformado por una banqueta de concreto permeable, capaz de infiltrar y canalizar el agua hacia una jardinera adyacente, promoviendo su absorción y reduciendo el escurrimiento superficial.

Este sistema integral incluirá RCD de concreto como sustituto parcial del agregado grueso en la mezcla del concreto permeable. La reutilización de estos materiales permitirá disminuir la demanda de recursos naturales y reducir la cantidad de residuos generados por la industria de la construcción, lo cual se alinea con los principios de la economía circular y la sostenibilidad.

El estudio analiza la viabilidad estructural e hidráulica del concreto con RCD, considerando su resistencia mecánica, capacidad de infiltración y durabilidad en comparación con materiales convencionales. Asimismo, se diseñarán la banqueta y la jardinera con criterios técnicos que aseguren su funcionalidad dentro de un SUDS, ayudando a controlar la escorrentía, a mitigar las inundaciones y a favorecer la recarga de acuíferos.

Este enfoque integral permitirá optimizar el uso de los recursos, mejorar la infraestructura urbana y reducir el impacto ambiental, ofreciendo una solución sustentable para el manejo del agua en las ciudades.

3.2 Caracterización del sitio de estudio

3.2.1 Localización y descripción de la zona

Colinas de Plata es un fraccionamiento en el municipio de Mineral de la Reforma, ubicado en las coordenadas geográficas 20°04'45" de latitud norte y 98°43'41" de longitud oeste, a una altitud de 2,413 metros sobre el nivel del mar, en el estado de Hidalgo, México. Se encuentra al sureste de Pachuca de Soto, la capital del estado, y forma parte de la Zona Metropolitana de Pachuca (Figura 3.1).

El área presenta pendientes moderadas en sus avenidas principales, las cuales influyen directamente en la generación y conducción de escurrimientos superficiales durante eventos de lluvia, especialmente en un entorno urbano con alta proporción de superficies impermeables. Estas condiciones topográficas resultan relevantes para el análisis hidrológico y el diseño de soluciones de drenaje urbano sostenible.

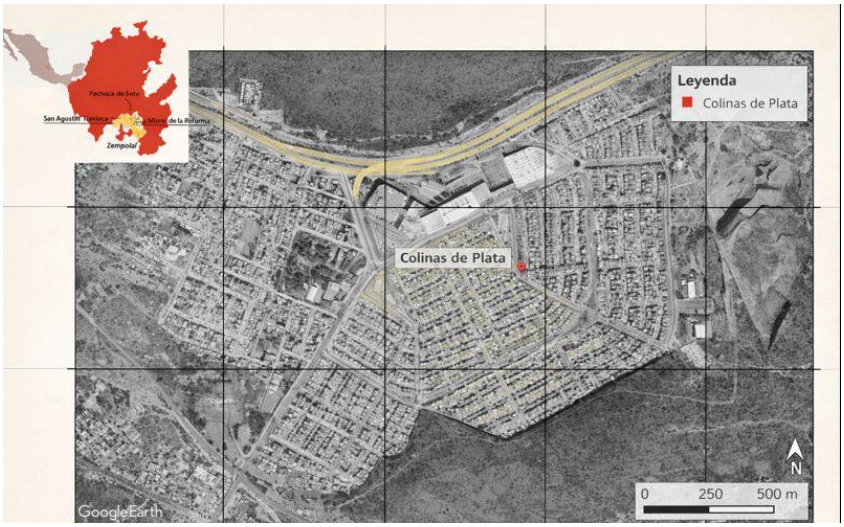

Figura 3.1 Localización de la zona de estudio para la que se diseñó el sistema integral. Fuente: (Google Earth, 2025)

Su acceso principal es por la carretera Pachuca-Tulancingo. Esta colonia es una zona residencial de interés social y de medio residencial, caracterizada por conjuntos habitacionales cerrados, calles pavimentadas y servicios básicos como agua potable, drenaje, alumbrado público y recolección de basura. Cuenta con una infraestructura urbana en crecimiento, con parques, áreas verdes, escuelas de nivel básico, algunos comercios locales y una plaza comercial a un costado.

La vivienda en estudio corresponde a una casa habitación de dos niveles, desarrollada sobre un terreno de 90 m^2, con 7.50 m de frente y 12.00 m de fondo. En la planta baja se ubica el área de sala–comedor, con acceso al patio exterior, así como la zona de estacionamiento al frente del predio. La planta alta se destina al área privada, integrada por dos habitaciones. El proyecto presenta una distribución funcional y compacta, acorde con las dimensiones del terreno.

3.2.2 Hidrología y clima

Desde el punto de vista hidrológico, Colinas de Plata forma parte de la Región Hidrológica del Pánuco, dentro de la cuenca del río Moctezuma y, más específicamente, de la subcuenca del río Tezontepec (INEGI, 2021a). En el municipio de Mineral de la Reforma existen varias corrientes de agua intermitentes, entre ellas los arroyos Temascalillos, San Pablo y El Zopilote, que presentan actividad únicamente durante la temporada de lluvias (Figura 3.1). Estas corrientes están asociadas a zonas de ladera, donde la pendiente favorece el escurrimiento rápido del agua pluvial.

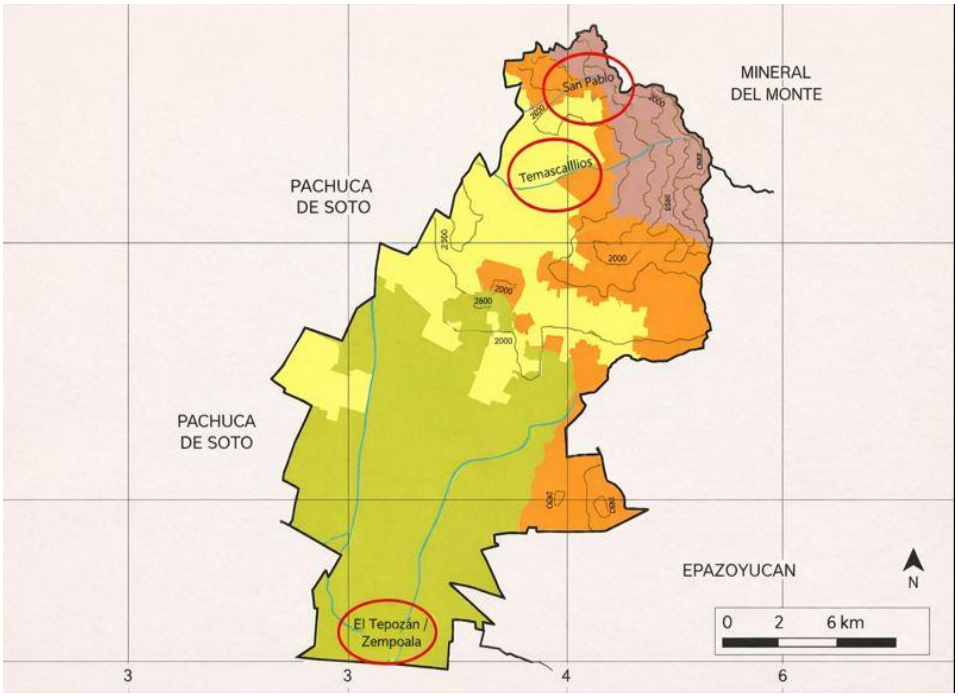

Figura 3.2 Corrientes intermitentes en Mineral de la Reforma, Hidalgo. Fuente: (INEGI, 2010)

Debido a la topografía inclinada en ciertas secciones del fraccionamiento (y al crecimiento urbano progresivo), se han observado procesos de escurrimiento acelerado durante eventos de lluvia intensa, lo que incrementa el riesgo de encharcamientos o inundaciones puntuales, especialmente en zonas de baja permeabilidad y con pendientes convergentes.

De acuerdo con datos del INEGI (2024), la precipitación media anual en esta zona se estima en aproximadamente 790 mm, que se concentran principalmente entre junio y septiembre, meses en los que cae más del 70% de la lluvia total del año. El mes más lluvioso es julio, con un promedio de 134 mm de precipitación, mientras que el más seco es diciembre, con apenas 11 mm en promedio. Esta distribución estacional de las lluvias responde a la influencia de fenómenos meteorológicos como la temporada de huracanes en el Golfo de México y la entrada de humedad del Océano Pacífico, que afectan indirectamente a la región del Altiplano Central Mexicano. Estos patrones de precipitación son fundamentales para el diseño de infraestructura hidráulica, urbana y de servicios en la zona, ya que determinan la capacidad de

los sistemas de drenaje pluvial, el riesgo de inundaciones, así como la disponibilidad y la recarga de acuíferos locales.

Aunque no se dispone de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) específicas, estudios realizados en el Altiplano Central Mexicano (Ledezma, 2012), que incluye partes del estado de Hidalgo, ofrecen una aproximación útil; este autor generó curvas IDF a partir de datos de 26 estaciones climatológicas de la región. Estas curvas se obtuvieron aplicando métodos estadísticos, como los de Gumbel y Cheng, considerando duraciones de 5 a 120 minutos y periodos de retorno de 5 a 50 años.

Del mismo modo, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2015), a través de estudios hidrológicos regionales, proporciona una serie de mapas de isoyetas que representan la intensidad de la precipitación asociada a eventos extremos de lluvia en diferentes zonas del país, incluido el estado de Hidalgo. Las isoyetas son líneas en un mapa que unen puntos geográficos con valores iguales de precipitación esperada para tormentas de duración y frecuencia específicas (Pérez y Gardey, 2021). Estas líneas permiten identificar cómo varía la cantidad de lluvia extrema esperada a lo largo del territorio, lo cual es crucial para comprender los riesgos hidráulicos de cada zona. Las isoyetas corresponden a distintos periodos de retorno, que van desde los 5 hasta los 1,000 años, y diferentes duraciones de tormenta (5,10, 15, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 minutos), y son una herramienta fundamental para el análisis y diseño de infraestructura urbana y carretera.

En general, las curvas IDF muestran que, para eventos de corta duración, la intensidad de la lluvia es mayor, mientras que, para eventos de mayor duración, disminuye. Esta información es necesaria para el diseño de sistemas de drenaje y de otras infraestructuras hidráulicas.

3.2.3 Vegetación, relieve y tipos de suelo

En cuanto a la vegetación, la región pertenece originalmente al ecosistema de matorral xerófilo, dominado por especies adaptadas a condiciones de baja disponibilidad de agua. Entre ellas se encuentran arbustos espinosos, cactáceas, agaves y árboles como el mezquite, todos ellos caracterizados por su resistencia a la sequía y su baja demanda hídrica (INEGI, 2021a). Sin embargo, debido al crecimiento urbano, gran parte de la cobertura vegetal ha sido sustituida por áreas pavimentadas o por zonas residenciales. A pesar de ello, en algunas áreas no urbanizadas o en laderas aún persisten remanentes de vegetación secundaria o de pastizales naturales.

El relieve predominante en esta área es mixto, compuesto por llanuras (56%), lomeríos (36%) y una proporción menor de sierra (8%), lo que influye directamente en los patrones de escurrimiento superficial (INEGI, 2021b).

Por último, los suelos predominantes son del tipo Phaeozem, Regosol y Leptosol, caracterizados por su origen volcánico y, en algunos casos, por su baja capacidad de

infiltración, lo que favorece el escurrimiento superficial en zonas urbanizadas o con poca cobertura vegetal, como en la zona de estudio (INEGI, 2021b).

3.3 Diseño del estudio

El diseño del sistema integral se llevará a cabo mediante un enfoque multidisciplinario que considere las condiciones hidrológicas, climáticas y geotécnicas del área de estudio. En primer lugar, se caracterizarán las propiedades del subsuelo y su capacidad de infiltración, así como los factores que influyen en la escorrentía superficial, para determinar la viabilidad del sistema en términos de retención e infiltración del agua pluvial.

Posteriormente, se diseñará un modelo estructural de la banqueta de concreto permeable y su integración con un jardín de lluvia (zanja de infiltración), asegurando la eficiencia hidráulica del sistema con fines de recuperación y reúso del agua infiltrada. Se seleccionarán materiales adecuados, incluida la sustitución parcial del agregado grueso por RCD, con el fin de mejorar la sostenibilidad del diseño y reducir el impacto ambiental. La configuración de la pendiente y la profundidad de la banqueta se definirá para optimizar la captación y conducción del agua, facilitando su infiltración en el jardín de lluvia y, a partir de este, conducir el agua recuperada hacia un tanque de almacenamiento.

Para evaluar el desempeño del sistema, se realizará una evaluación hidrológica que permita analizar su impacto en la reducción del volumen de escorrentía y en la mitigación de inundaciones, en comparación con sistemas de drenaje convencionales. Este análisis considerará distintos escenarios y variaciones en la intensidad de las precipitaciones, asegurando que el diseño sea funcional bajo diversas condiciones ambientales. Además, se elaborará el presupuesto del sistema integral, con el fin de orientar a los posibles usuarios sobre su factibilidad económica.

Finalmente, se desarrollarán estrategias de mantenimiento y lineamientos técnicos que permitan implementar el sistema a mayor escala y promover su integración con la infraestructura urbana existente. Se estudiará su aplicabilidad en el contexto de la resiliencia hídrica, con el objetivo de generar soluciones sostenibles para el manejo del agua en entornos urbanos impermeabilizados.

3.4 Diseño del prototipo

El diseño del sistema integral, compuesto por una banqueta de concreto permeable con un jardín de lluvia, se enfocará en la funcionalidad de un SUDS que permita la infiltración y la canalización del agua pluvial, así como su recuperación parcial para el autoconsumo. A continuación, se describen los pasos a seguir para su diseño:

3.4.1 Banqueta de concreto permeable

Su diseño requiere una cuidadosa consideración de las capas que las componen para garantizar su funcionalidad hidráulica y durabilidad. A continuación, se detallan las medidas adecuadas y la estructura recomendada:

A. Dimensiones de la losa de concreto permeable

La losa superficial de concreto permeable suele tener un espesor promedio de 15 centímetros. Este grosor es suficiente para soportar las cargas peatonales típicas de las banquetas y permite una adecuada permeabilidad del agua (Bautista, 2019). Según la Norma Técnica de Accesibilidad en la Ciudad de México (2016), el ancho mínimo de la banqueta recomendado es de 1.20 metros, mientras que la guía de accesibilidad en la movilidad urbana de la SEDATU (2021) dice que el ancho óptimo es de 1.50 a 2.00 metros, permitiendo el tránsito cómodo de peatones y el acceso para personas con movilidad reducida. En proyectos de infraestructura verde, las banquetas de concreto permeable pueden implementarse en módulos de 5 a 10 metros de longitud, lo que permite integrarlas con otros elementos, como jardineras de infiltración, para mejorar la gestión del agua pluvial (ITDP, 2019). Para evitar fisuras y mejorar la durabilidad del pavimento, se recomienda construirlo en paneles o en losas de 3 a 5 metros de largo, con juntas de expansión que permitan la dilatación térmica del material, garantizando así su resistencia estructural y su funcionalidad a largo plazo (ACI, 2010).

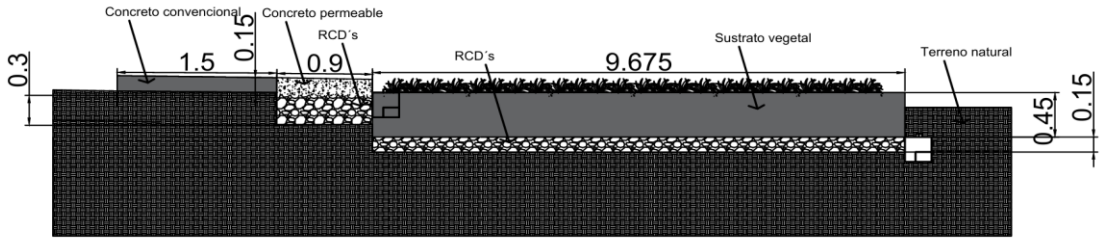

Figura 3.3 Dimensiones de sistema integral

Se emplea cemento Portland como aglutinante; los agregados utilizados deben ser predominantemente gruesos, con tamaños entre 9.5 mm (3/8”) y 19 mm (3/4”), minimizando el contenido de agregado fino para mantener la interconexión de vacíos y favorecer la infiltración (Bautista, 2019). Al tratarse de residuos de la construcción y demolición, la forma y el tamaño de los agregados gruesos suelen ser muy irregulares, por lo que se debe seguir un proceso de tamizado según las normas ASTM C33 (ASTM International, 2009). De igual manera, su tamaño debe estar entre 9.5 mm (3/8”) y 19 mm (3/4”). Los agregados gruesos y

finos deben estar correctamente balanceados para asegurar una mezcla homogénea que no comprometa la resistencia ni la durabilidad del concreto (Valdés et al., 2020).

B. Base y subbase

La estructura de soporte bajo la losa de concreto permeable generalmente incluye una base y, en algunos casos, una subbase, dependiendo de las condiciones del suelo y los requisitos específicos del proyecto:

- Base de grava o material granular: El espesor mínimo debe diseñarse para soportar en forma suficiente las cargas previstas, así como para la detención de aguas pluviales en el espacio vacío del material (porosidad del 40%). El agregado base (ASTM No. 57) debe cubrir un espesor mínimo de 10.2 cm. La tasa de infiltración, según la norma ASTM No. 57, es superior a 500" (12,700 mm) por hora (Unilock, 2024).
- Subbase: Proporcionará mayor estabilidad estructural en sitios con suelos de mala calidad. Se requiere un espesor mínimo de 20.3 cm para un desempeño efectivo. Según la norma ASTM No. 2, esta capa también debe tener una tasa de infiltración superior a 500" (12,700 mm) por hora (Unilock, 2024).

C. Compactación y preparación del terreno

Es fundamental que tanto la base como la subbase estén correctamente compactadas para garantizar una superficie uniforme y estable. Cuando el suelo se coloca directamente sobre suelos arenosos o de grava, se recomienda una compactación entre el 92% y el 96% de la densidad máxima, según la norma ASTM D 1557 (Toxement, 2020). El terreno natural del área de estudio es arenoso, debido a que el fraccionamiento Colinas de Plata se ubica en suelo urbano, sin embargo, sus límites están conformados por suelo Pheozem (INEGI, 2010).

D. Pendientes y funcionalidad hidráulica

Para banquetas de concreto permeable, se recomienda una pendiente transversal mínima del 2% hacia las áreas de drenaje o las áreas verdes, lo que facilita la conducción del agua superficial hacia las zonas de infiltración y evita la acumulación en la superficie (La Ciudad Saludable, 2016). Además, el sistema se diseña considerando su desempeño en distintos escenarios climáticos, asegurando su capacidad para mitigar el escurrimiento pluvial y mejorar la recarga de los acuíferos.

Al seguir estas recomendaciones, se asegura que las banquetas de concreto permeable funcionen eficazmente, permitiendo la infiltración adecuada del agua y proporcionando una superficie duradera y segura para los peatones. La propuesta de este estudio se presenta a continuación. Se tomaron en cuenta las dimensiones disponibles en la vivienda tipo, así como las sugeridas en los puntos anteriores (Figura 3.2).

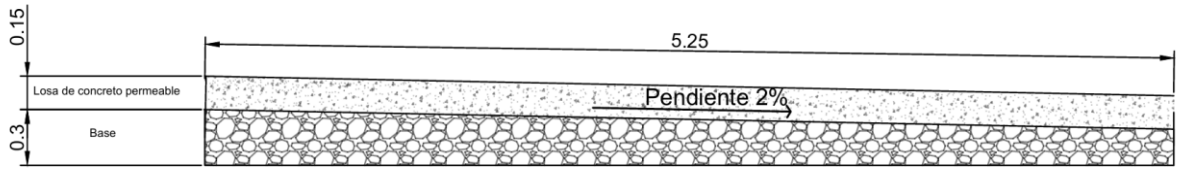

Figura 3.4 Prototipo de banqueta permeable.

3.4.2 Jardín de lluvia

El diseño del jardín de lluvia asociado a la banqueta de concreto permeable debe considerar materiales, estructura y pendientes para garantizar su funcionalidad en la infiltración y retención de agua pluvial, promoviendo un drenaje sostenible y la recarga de acuíferos.

A. Materiales y estructura

Los jardines de lluvia están diseñados con un lecho de almacenamiento de agua compuesto por materiales granulares de alta permeabilidad, como grava de ¾" y arena gruesa, que permiten la filtración progresiva del agua hacia el subsuelo. La profundidad típica del jardín varía entre 40 y 60 cm, dependiendo de la capacidad de infiltración del suelo y el volumen de escurrimiento esperado (EPA, 2022).

En la parte inferior se recomienda incluir una capa de grava de ¾" de 15 a 30 cm de espesor para facilitar la percolación del agua y evitar encharcamientos prolongados. Encima de esta capa se coloca un sustrato de suelo arenoso o franco-arenoso. Turk et al. (2014) recomiendan un rango de tamaños de partículas de arena lavada de 0.5 mm a 2.0 mm para un óptimo lecho filtrante, evitando contenidos excesivos de finos que puedan reducir la permeabilidad. Una profundidad de 30 a 45 cm optimiza la retención de humedad para el desarrollo de la vegetación (CONAGUA, 2021).

Para evitar la obstrucción del sistema, se puede integrar un geotextil entre las capas de grava y de sustrato de suelo, lo que ayuda a filtrar partículas finas y prolongar la vida útil del sistema. Además, la vegetación seleccionada debe ser nativa o resistente a condiciones de

humedad variable, contribuyendo a la absorción de agua y a la mejora de la calidad del aire (GSA, 2011).

B. Pendientes y funcionalidad hidráulica

El jardín de lluvia debe contar con una ligera pendiente longitudinal del 1 al 2% para favorecer la distribución uniforme del agua a lo largo de toda su extensión. Además, con base en los criterios de diseño mencionados en el apartado anterior, se propone el diseño de la Figura 3.3. También se recomienda incluir un rebosadero a 5-10 cm por debajo del nivel del suelo para permitir la salida del exceso de agua en eventos de lluvia intensa, evitando el colapso del sistema y garantizando un drenaje controlado hacia otros elementos de infraestructura pluvial (EPA, 2022).

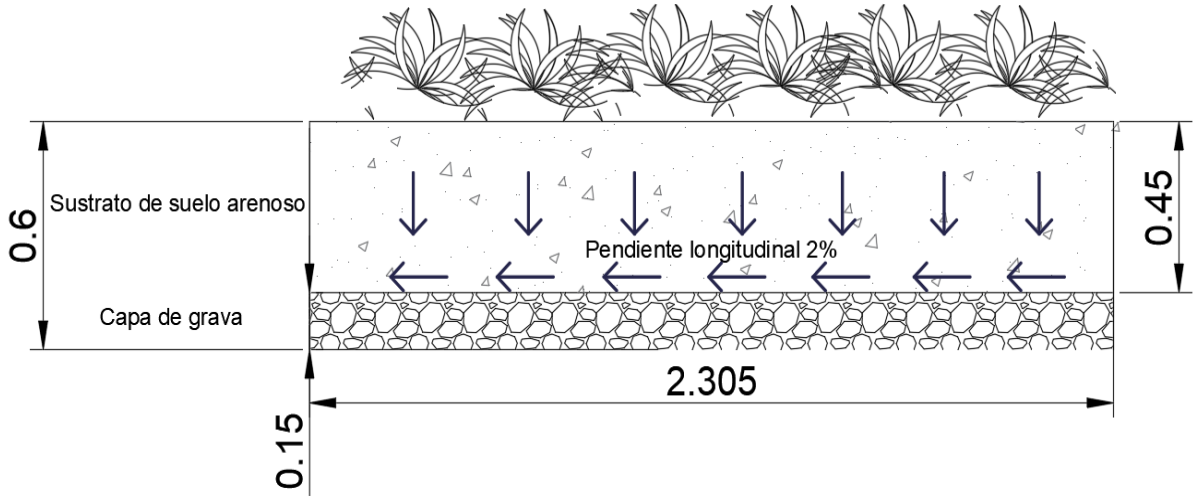

Figura 3.5 Prototipo de jardín de lluvia.

El diseño de este jardín, junto con la banqueta de concreto permeable, puede reducir el volumen de escurrimiento superficial, mejorar la calidad del agua al filtrar contaminantes y promover la recarga del acuífero, integrándose como una solución de drenaje urbano sostenible.

3.4.3 Sistema combinado

A. Acoplamiento funcional

El sistema filtra el agua gracias a su trabajo conjunto. Como se observa en la Figura 3.5, el agua de lluvia (LL) cae sobre el sistema. Esta cantidad de lluvia depende de la intensidad de

lluvia, y el agua infiltrada (ai) corresponde a una parte del agua de lluvia retenida por cada uno de los elementos del sistema. La parte del agua que no es retenida por los elementos del sistema se denomina agua superficial (as), y su cantidad depende del coeficiente de escorrentía de cada elemento del sistema. El agua de lluvia entra en contacto con todo el sistema al mismo tiempo; sin embargo, debido a sus diferencias de retención, partes del sistema retienen un mayor volumen de agua que otros, por lo que el sistema opera en tres etapas principales:

Etapa 1: Banqueta de concreto hidráulico

Este primer elemento retiene el 10% del agua de lluvia, que se infiltra en los estratos más bajos, mientras que el 90% restante será retenido por la siguiente etapa. Estos porcentajes se tomaron en cuenta a partir del coeficiente de escorrentía (Kasprzyk et al. 2022) y de la diferencia respecto a la unidad (0.1; este volumen se separa mediante evaporación).

Etapa 2: Banqueta de concreto permeable

En esta etapa, el 60% del agua de lluvia que entra en contacto con la banqueta permeable se retiene y se suma el 90% del agua superficial proveniente de la banqueta de concreto hidráulico. El restante 40% del agua tanto de lluvia, como superficial se acumula en la siguiente etapa (Kasprzyk et al. 2022).

Etapa 3: Jardín de lluvia

Finalmente, esta etapa corresponde al jardín de lluvia. Este elemento retiene el 70% del agua de lluvia (Kasprzyk et al. 2022) y el 40% del agua superficial proveniente de la banqueta de concreto permeable. Este volumen de agua infiltrada se conduce hacia las raíces de la vegetación y, finalmente, hacia los estratos inferiores, lo que alimenta el acuífero y reduce los niveles excesivos de agua superficial. Por otra parte, el agua superficial restante puede quedar expuesta al ambiente o bien almacenarse en tanques.

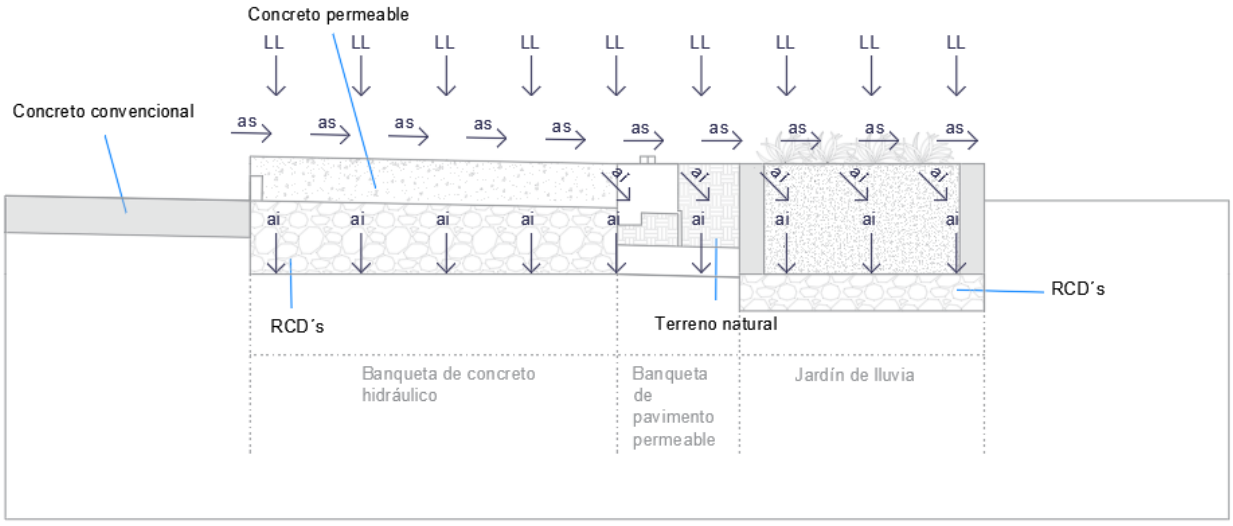

Figura 3.6 Sistema combinado de agua de lluvia (LL), agua superficial (as) y agua infiltrada (ai).

B. Características del sistema combinado

El agua de lluvia proveniente de superficies impermeables es conducida por pendientes naturales o diseñadas hasta una banqueta de concreto permeable, la cual capta el flujo superficial, reduce su velocidad y dirige el volumen recolectado hacia un jardín de lluvia contiguo, ubicado aguas abajo del tanque de almacenamiento. Esta banqueta funciona como un sistema de pretratamiento al actuar como un primer filtro físico, ya que su estructura porosa permite la infiltración inicial del agua y la retención de sedimentos gruesos, partículas flotantes, residuos sólidos y contaminantes urbanos. De manera complementaria, incorpora capas subyacentes conformadas por residuos de construcción y demolición (RCD), los cuales contribuyen a mejorar la calidad del agua antes de su conducción al jardín de lluvia. Posteriormente, el agua pretratada fluye hacia el jardín de lluvia, el cual consiste en una depresión vegetada con un sustrato filtrante compuesto por tierra vegetal, arena, materia orgánica y RCD, donde el agua se infiltra de forma controlada y es conducida hacia un tanque de almacenamiento para su posterior reutilización.

Para garantizar un funcionamiento eficiente y continuo del sistema integrado, es fundamental asegurar la conectividad topográfica y funcional entre la banqueta y el jardín de lluvia, de modo que las pendientes y niveles permitan el flujo por gravedad sin obstrucciones. Asimismo, la compatibilidad de las capacidades hidráulicas debe garantizar que la banqueta gestione el volumen inicial de escorrentía y que el jardín de lluvia tenga la capacidad de tratar el volumen excedente. El diseño debe asegurar la continuidad física del flujo mediante elementos como ranuras, canaletas, aberturas laterales o tuberías, evitando zonas de acumulación, estancamiento o erosión, y asegurando transiciones suaves sin cambios abruptos de nivel o material. Para el control de la velocidad del flujo y la protección contra la

erosión, se deben incorporar dispositivos disipadores de energía, como colchones de grava, rocas de disipación o vegetación densa en la zona de entrada al jardín.

Finalmente, el sistema debe contemplar mantenimiento integrado que permita el acceso para la limpieza periódica de sedimentos, el retiro de residuos, la reposición de materiales filtrantes y el monitoreo de la permeabilidad de ambos elementos, garantizando así su funcionalidad hidráulica y ecológica a largo plazo. A continuación, se presenta el sistema integrado con dimensiones adaptadas al tipo de vivienda del área de estudio seleccionada (Figura 3.6).

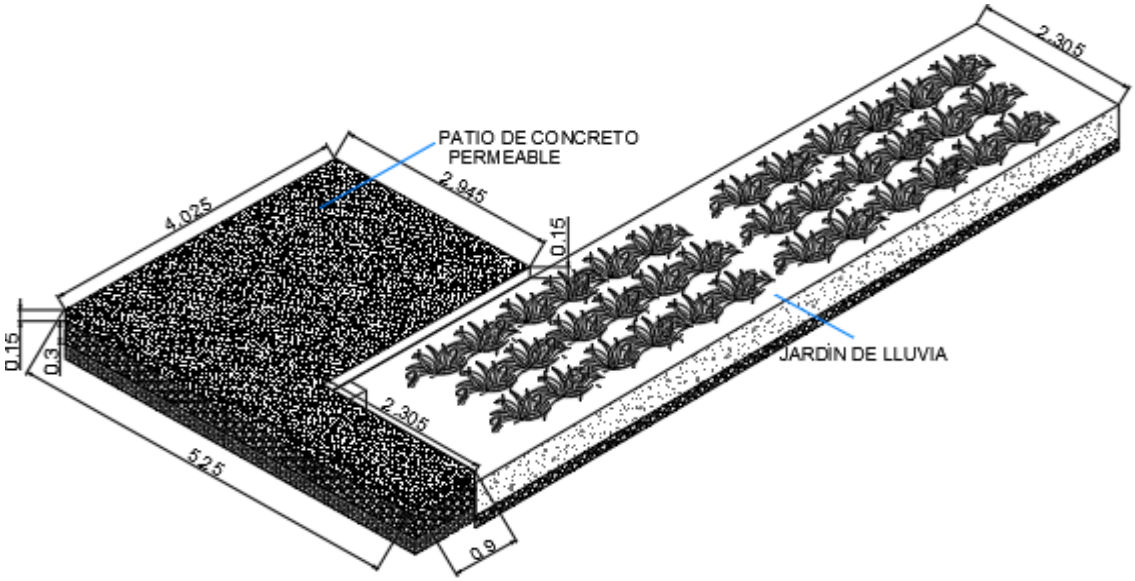

Figura 3.7 Prototipo del sistema integral.

3.5 Evaluación hidráulica

Para la elaboración del sistema integral, de la banqueta de concreto permeable y del jardín de lluvia, se utilizó AutoCAD 2022, debido a su alta precisión y aplicabilidad en ingeniería civil. Este software permite representar con precisión las medidas, pendientes y espesores de materiales, garantizando un diseño detallado y funcional. Además, su capacidad de edición facilita modificaciones y optimización del proyecto sin necesidad de redibujar completamente la estructura. Su compatibilidad con otros programas de modelado y simulación lo convierte en una herramienta ideal para el diseño de infraestructura urbana y sistemas de drenaje sostenible.

El volumen total de agua recuperada y tratada al final del sistema integral se calculó mediante un enfoque analítico, utilizando hojas de cálculo de Excel programadas específicamente para este propósito. Dichas hojas de cálculo toman en cuenta los distintos factores que inciden en el comportamiento del sistema, tales como la precipitación, el área de los elementos del sistema, los coeficientes de escorrentía, el porcentaje de infiltración, así como los volúmenes retenidos e infiltrados. Este método está basado en el dimensionamiento

de la captación y almacenamiento del manual de “Captación y almacenamiento de agua de lluvia, Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe” de la FAO (2013), por lo que este análisis permitirá obtener una estimación precisa y fundamentada del volumen de agua disponible al finalizar el proceso, lo cual es base para la evaluación del rendimiento del sistema, la planificación de su operación y la toma de decisiones orientadas a su mejora continua.

Con base en las condiciones hidrológicas de la zona, se eligieron periodos de retorno de 5, 10 y 25 años; según los criterios técnicos recomendados (CONAGUA, 2021) y considerando el uso habitacional del desarrollo, se tiene que el periodo de 5 años se aplica a elementos secundarios como rejillas y tuberías menores, ya que se busca atender lluvias frecuentes sin sobredimensionar la infraestructura. El periodo de retorno de 10 años se asigna a colectores principales y conducciones en vialidades, donde se requiere mayor capacidad ante eventos más intensos, mientras que el de 25 años se reserva para obras como tanques de retención o salidas finales, que deben responder adecuadamente ante lluvias fuertes y poco frecuentes, protegiendo tanto a las viviendas como a los habitantes. Esta combinación permite un diseño eficiente y seguro, equilibrando el costo de construcción con la protección contra las inundaciones.

Con distintas duraciones (en minutos) obtenidas de isoyetas de la SCT (2015), se pudo calcular mediante el siguiente procedimiento lo siguiente:

1. Se definió la duración (horas), la intensidad (m/h) y el periodo de retorno Tr (años); este último se considera de 5, 10 y 25 años, según la SCT (2015), con la que se proyecta la vida útil del proyecto. La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones correspondientes a Pachuca, elaboradas por la SCT (2015) para Hidalgo.
2. Para la banqueta de concreto hidráulico convencional, fue necesario conocer el área de esta banqueta (m^2) y el coeficiente de escorrentía (adimensional). Posteriormente se calculó el gasto de agua (caudal de agua) que entra al patio adyacente, multiplicando la intensidad (m/h) por el área de la banqueta (7.875 m^2), por el coeficiente de escorrentía (adimensional), que en este caso para este tipo de concreto fue de 0.9 que corresponde al 90% que escurre sobre la banqueta. A continuación, se calculó el gasto de agua retenido en ella, multiplicando la intensidad (m/h) por el área de la banqueta (m^2) y aplicando un factor de 0.1, que corresponde al 10% de agua retenida en la banqueta. Las ecuaciones 3.1 y 3.2 representan lo anterior descrito:

$$QsupB = I * A * C \quad \text{(Ec. 3.1)}$$

Donde:

QsupB= Gasto superficial sobre la banqueta de concreto hidráulico (m^3/h)
I= Intensidad de lluvia (m/h)
A= Área de banqueta (m^2)
C= Coeficiente de escorrentía (adimensional)

$$QrB = I * A * 0.1 \quad \text{(Ec. 3.2)}$$

Donde:

QrB= Gasto retenido por la banqueta de concreto hidráulico. (m^3/h)
I= Intensidad de lluvia (m/h)
A= Área de banqueta (m^2)
0.1= 10% restante del coeficiente de escorrentía

3. Para el patio (concreto permeable), fue necesario conocer su área (m^2) y el coeficiente de escorrentía (adimensional), que, según Fletcher et al. (2015), es de 0.3 para pavimentos permeables convencionales, pero en este caso, al utilizar RCD, varía en un rango de 0.3-0.5, dependiendo de la granulometría, por lo que en este trabajo se seleccionó su promedio (0.4). Para el gasto que entra al jardín de lluvia, se multiplicó la intensidad (m/h) por el área del patio (m^2) y por el coeficiente de escorrentía (adimensional), y a ese resultado se le sumó el gasto que escurre de la banqueta, multiplicado por dicho coeficiente. Para calcular el gasto infiltrado, se multiplicó la intensidad (m/h) por el área de la banqueta (m^2) y se aplicó un factor de 0.6, que corresponde al 60% del agua retenida en la banqueta; además, se sumó el producto del gasto superficial de la banqueta por dicho factor. Las ecuaciones 3.3 y 3.4 representan lo anterior:

$$QsupCP = I * A * C + QsupB * C \quad \text{(Ec. 3.3)}$$

Donde:

QsupCP= Gasto superficial sobre la banqueta de concreto permeable (m^3/h)
QsupB= Gasto superficial sobre la banqueta de concreto hidráulico (m^3/h)
I= Intensidad de lluvia (m/h)
A= Área de banqueta (m^2)
C= Coeficiente de escorrentía (adimensional)

$$QiCP = I * A * 0.6 + QsupB * 0.6 \quad \text{(Ec. 3.4)}$$

Donde:

QiCP= Gasto retenido por la banqueta de concreto hidráulico. (m^3/h)
QsupB= Gasto superficial sobre la banqueta de concreto hidráulico (m^3/h)
I= Intensidad de lluvia (m/h)
A= Área de banqueta (m^2)
0.6= 60% restante del coeficiente de escorrentía

4. Para el diseño del jardín de lluvia fue necesario determinar su superficie (22.301 m^2) y el coeficiente de escorrentía (adimensional). De acuerdo con Zubelzu et al. (2019), en suelos permeables con vegetación xerófita, con alta capacidad de infiltración (>70%), sin

compactar y conformados por capas de grava o RCD, dicho coeficiente corresponde a 0.3. Se realizó la multiplicación de la intensidad (m/h) por el área del patio (m^2), por el coeficiente de escorrentía (adimensional) y a ese resultado se le sumó el gasto que escurre del patio, multiplicado por el coeficiente de escorrentía de 0.3, dando como resultado el gasto que entra al tanque de almacenamiento. Por otro lado, para estimar el caudal infiltrado fue necesario determinar el tiempo de contacto entre el agua y el suelo (en horas), el cual depende tanto del caudal de entrada como de la pendiente del terreno. En este caso, se adoptó un valor de 1, dado que se trata de una zanja de pequeñas dimensiones y escasa profundidad. El factor de corrección asociado a la presencia de vegetación xerófita, según Kasprzyk et al. (2022), oscila entre 0.7 y 0.9, ya que el consumo de agua por las raíces puede disminuir el volumen infiltrado entre 10% y 30%; para este estudio se consideró un valor de 0.7. Finalmente, la conductividad hidráulica del suelo tipo Pheozem se sitúa entre 10 y 20 mm/h (Kasprzyk et al., 2022). Con estos parámetros, el volumen infiltrado se calculó multiplicando el área de la zanja (m^2) por el tiempo de contacto (h) y la conductividad hidráulica (m/h), ajustada mediante el factor de corrección.

Mediante la ecuación 3.5 se estimó el caudal superficial que ingresa al jardín de lluvia y se conduce al tanque de almacenamiento.

$$QsupJ = I * A * C + QsupCP * C \quad \text{(Ec. 3.5)}$$

Donde:

QsupJ= Gasto superficial sobre el jardín de lluvia (m^3/h)
QsupCP= Gasto superficial sobre la banqueta de concreto permeable (m^3/h)
I= Intensidad de lluvia (m/h)
A= Área de banqueta (m^2)
C= Coeficiente de escorrentía (adimensional)

La ecuación 3.6 ayuda a estimar el gasto infiltrado en el suelo del jardín de lluvia.

$$QiJ = ff * K * A \quad \text{(Ec. 3.6)}$$

Donde:

QiJ= Gasto infiltrado en el suelo de jardín de lluvia (m^3/h)
ff = factor de corrección por vegetación xerófita = 0.7.
K= Conductividad hidráulica (m/h)

5. Por último, se multiplica por 1000 el volumen que entra al tanque de almacenamiento para obtener el resultado en litros; este dependerá de las condiciones de lluvia consideradas, como se muestra a continuación.

3.6 Análisis de factibilidad

El sistema integrado de drenaje urbano sostenible presentado corresponde a un prototipo funcional que combina una banqueta de concreto permeable con un jardín de lluvia, diseñados para operar conjuntamente como un mecanismo de captación, filtración, conducción e infiltración del agua pluvial en el sitio. Este prototipo busca demostrar la viabilidad técnica, ambiental y económica de los SUDS aplicados al contexto urbano.

La banqueta permeable, con un ancho de 1.5 metros, está construida con una losa de concreto poroso de 15 centímetros de espesor, que permite el paso del agua hacia el subsuelo. Esta losa descansa sobre una base de 30 centímetros de grava limpia, que actúa como medio de almacenamiento temporal y de pretratamiento del agua. El diseño contempla una pendiente transversal del 2%, que facilita la dirección del flujo hacia un punto de captación. Para facilitar su fabricación, mantenimiento y control estructural, las losas no superan los 3 metros de longitud.

En la parte inferior de la estructura se incorpora una tubería, que recoge el excedente de agua infiltrada en la base de grava y la conduce hacia el jardín de lluvia. Esta conexión hidráulica, integrada en el diseño del prototipo, permite encauzar el flujo hacia el siguiente componente del sistema de forma subterránea.

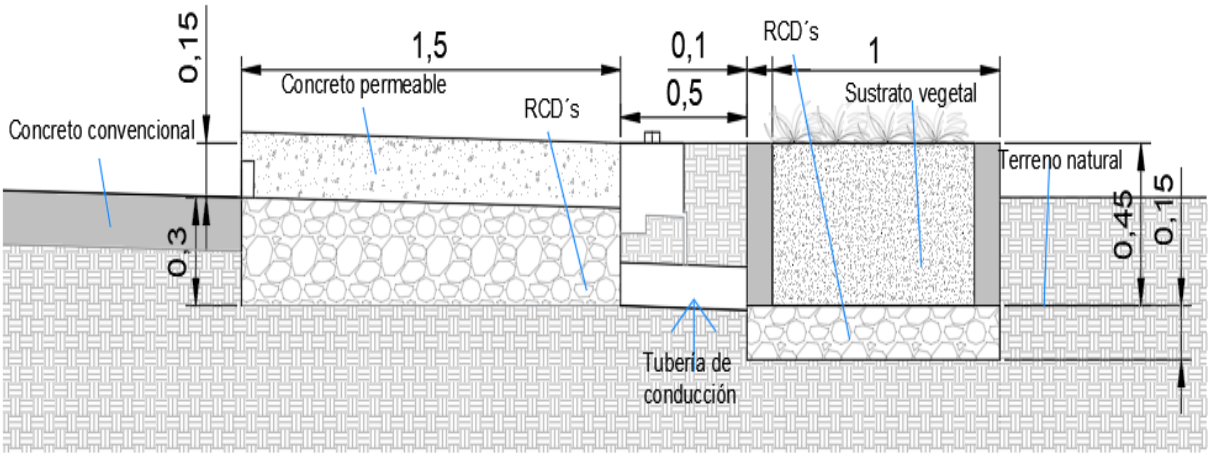

Figura 3.8 Tubería de conducción.

El jardín de lluvia, dispuesto perpendicularmente a la banqueta, tiene un ancho de 1 metro y una profundidad de 60 centímetros, y se divide en dos capas: una capa inferior de agregados gruesos de 15 centímetros, que facilita el drenaje, y una capa superior de 45 centímetros de sustrato arenoso, que actúa como medio filtrante y soporte vegetal. Este componente presenta una pendiente longitudinal del 2%, lo que permite distribuir el agua a lo largo del lecho filtrante y facilitar su infiltración progresiva en el subsuelo.

El funcionamiento del prototipo es secuencial: el agua pluvial que cae sobre la banqueta se filtra a través del concreto permeable y los agregados gruesos; luego, se canaliza por la tubería

hacia el jardín de lluvia, donde se realiza una segunda etapa de filtración antes de infiltrarse en el terreno. Este sistema aprovecha la pendiente integrada en ambos componentes para guiar el flujo de manera pasiva, sin necesidad de bombeo ni de infraestructura mecánica.

Este prototipo no solo mejora la capacidad hidráulica del sistema para reducir escurrimientos y favorecer la recarga hídrica, sino que también representa una estrategia replicable y adaptable a otros entornos urbanos, combinando eficiencia técnica, sencillez constructiva y beneficios ambientales.

Capítulo 4. Resultados y Discusión

Este capítulo expone los resultados del análisis hidrológico, ambiental y económico aplicado al prototipo de captación pluvial diseñado para viviendas tipo como las que existen en el fraccionamiento Colinas de Plata, en el municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo. El propósito central consiste en evaluar el desempeño del sistema frente a distintos escenarios de precipitación y periodos de retorno, considerando las variaciones en la intensidad de la lluvia, el gasto superficial y los volúmenes retenidos y excedentes en cada uno de los componentes del prototipo.

Los hallazgos permiten comprender la eficiencia del sistema en la regulación del escurrimiento pluvial, su contribución a la recarga hídrica local y su potencial para disminuir la presión sobre la infraestructura de drenaje convencional. En consecuencia, el análisis aporta evidencia técnica que respalda el diseño de SUDS adaptadas a contextos semiáridos.

4.1 Intensidades de lluvia

El análisis de las intensidades de precipitación en el área de estudio (basado en las isoyetas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2015) muestra un patrón típico de regiones semiáridas: los eventos de corta duración presentan las mayores intensidades, mientras que las lluvias prolongadas exhiben valores menores (Figura 4.1).

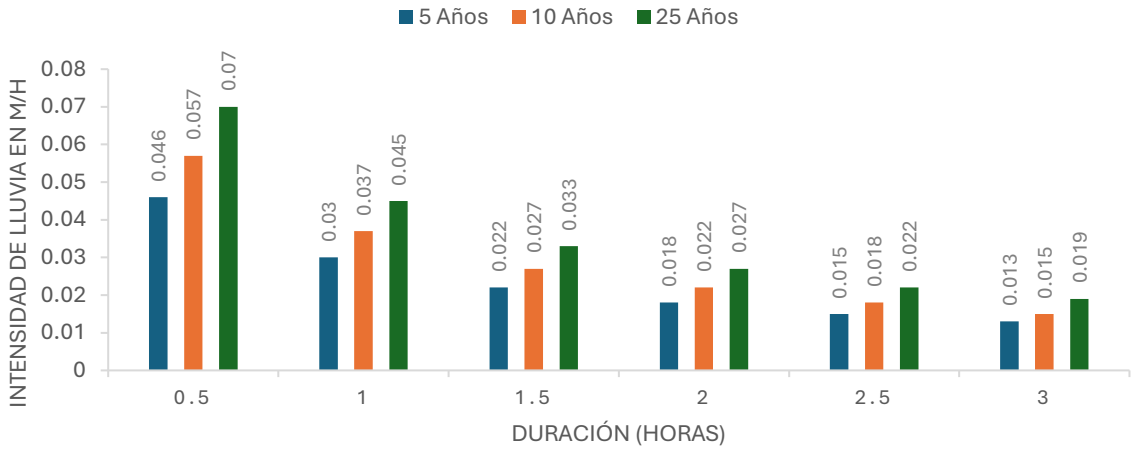

Figura 4.1 Variación de las intensidades de lluvias para los tres periodos de retorno seleccionados.

Por ejemplo, en un periodo de retorno de 25 años, la lluvia de 30 minutos alcanza una intensidad de 0.070 m/h, más del triple que la de tres horas (0.019 m/h). Este comportamiento indica que los eventos breves y torrenciales generan picos súbitos de escorrentía, con alto potencial erosivo y riesgo de inundaciones urbanas, mientras que los eventos prolongados

favorecen la infiltración y la recarga de acuíferos, siempre que las condiciones del suelo y la vegetación lo permitan.

El incremento de la intensidad de la precipitación con el aumento del periodo de retorno resalta la necesidad de diseñar sistemas pluviales resilientes frente a eventos extremos, integrando estrategias de retención, infiltración y almacenamiento. En este sentido, los SUDS (como los empleados en el prototipo) ofrecen un enfoque eficaz para mitigar los picos de escorrentía y mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico en zonas urbanas semiáridas.

4.2 Gastos y volúmenes interceptados en los distintos componentes del sistema

El análisis comparativo entre los distintos componentes del prototipo -banqueta de concreto hidráulico, patio con pavimento permeable y jardín de lluvia- permitió cuantificar la proporción de agua retenida, infiltrada y excedente bajo condiciones de lluvia de diferentes intensidades y duraciones.

4.2.1 Banqueta con concreto hidráulico

Los valores representados en la Figura 4.2 muestran una relación clara entre la duración de la lluvia y los valores de gasto o de volumen excedente para distintos periodos de retorno (5, 10 y 25 años). Se observa que, conforme aumenta la duración del evento, los valores disminuyen de manera progresiva, lo que indica que las lluvias breves, de alta intensidad (por ejemplo, 0.5 h), generan los mayores caudales superficiales -326.025 L/h para un TR de 5 años y hasta 496.125 L/h para un TR de 25 años-, mientras que las lluvias de mayor duración (3 h) producen caudales significativamente menores -92.1375 L/h y 134.6625 L/h, respectivamente.

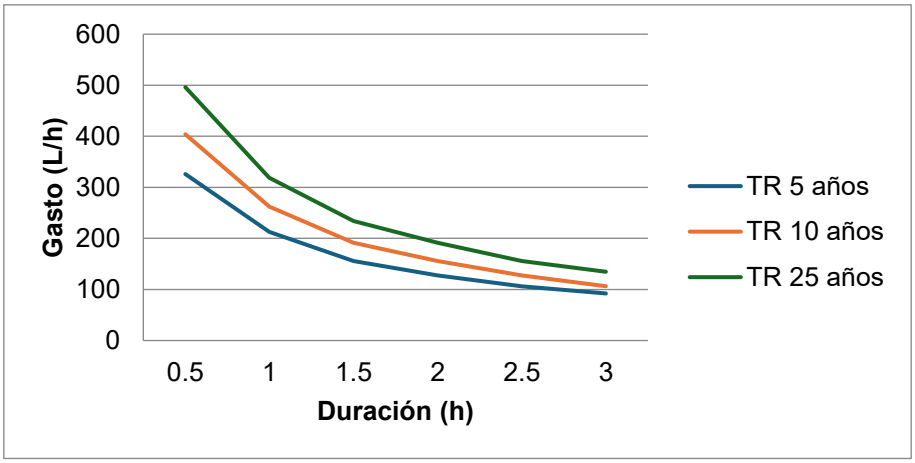

Figura 4.2 Gasto que escurre sobre la superficie de la banqueta de concreto hidráulico. TR: Tiempo de retorno.

Este comportamiento hidrológico es coherente con las curvas típicas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), en las que los eventos de corta duración concentran mayor energía y, por tanto, generan una respuesta más rápida del sistema. El incremento del caudal con el aumento del periodo de retorno refleja, además, la influencia de los eventos extremos, asociados a mayores intensidades y volúmenes de precipitación. En conjunto, los datos de esta figura evidencian que las lluvias torrenciales de corta duración constituyen los escenarios más críticos para el diseño hidráulico del prototipo, ya que implican picos de escorrentía más elevados y una mayor demanda sobre la infraestructura de captación y drenaje.

Con relación a la Figura 4.3, los resultados muestran una relación inversa entre la duración del evento de lluvia y el valor del gasto (caudal) o volumen considerado; esto indica que las lluvias más cortas e intensas (0.5 h) generan los valores más altos de respuesta hidrológica 36.225 L/h para un periodo de retorno de 5 años y hasta 55.125 L/h para 25 años, mientras que las lluvias de mayor duración (3 h) producen valores significativamente menores 10.2375 a 14.9625 L/h.

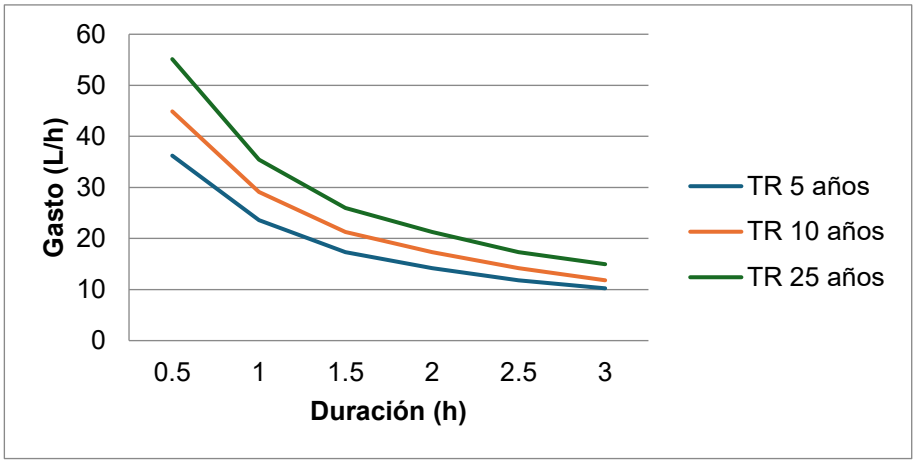

Figura 4.3 Gasto retenido por la banqueta de concreto hidráulico. TR: Tiempo de retorno.

En la Figura 4.2 se representan gastos o volúmenes excedentes, es decir, el flujo superficial que no logra infiltrarse y se mantiene en la superficie. En cambio, los valores de la Figura 4.3 (55.125–10.2375 L/h) corresponden a gastos o volúmenes retenidos, que son menores porque reflejan el agua que el sistema logra infiltrar o almacenar. Se muestra por lo tanto una relación inversa: a medida que aumentan los excedentes, disminuye la retención y viceversa. En ambos casos, los valores decrecen a medida que aumenta la duración de la lluvia, lo que indica que las lluvias de corta duración e intensa precipitación producen tanto mayores escurrimientos superficiales como mayores tasas instantáneas de retención; sin embargo, el volumen retenido representa solo una fracción del total generado.

Además, el incremento de los valores con el TR en ambas figuras confirma que los eventos de mayor severidad hidrológica (TR=25 años) provocan mayores cargas de agua, lo que aumenta tanto el volumen excedente (≈496 L/h) como el volumen retenido (≈55 L/h). En conjunto, estos resultados demuestran que, aunque el prototipo logra infiltrar una porción

significativa del agua, la magnitud del evento pluvial sigue siendo el factor determinante de la eficiencia del sistema: su desempeño mejora en lluvias moderadas, pero se ve limitado frente a eventos extremos de alta intensidad.

4.2.2 Banqueta de concreto permeable

Los resultados obtenidos para la superficie del patio con concreto permeable muestran una relación directa entre el TR y el gasto estimado, así como una inversa entre la duración del evento pluvial y los valores registrados. Las lluvias de corta duración (0.5 h) generan los mayores valores de gasto 384.4 L/h para TR=5 años, 479.176 L/h para TR=10 años y 588.462 L/h para TR=25 años, lo que refleja la rápida respuesta del sistema frente a eventos intensos y de alta energía. Conforme la duración aumenta (hasta 3 h), los valores disminuyen progresivamente, lo que indica una mayor probabilidad de infiltración y disipación del flujo superficial (Figura 4.4).

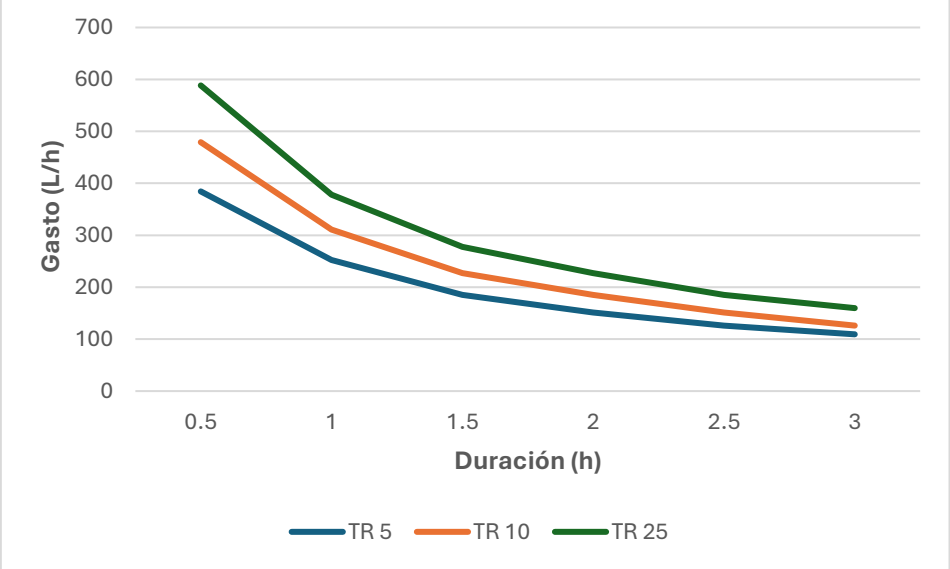

Figura 4.4. Gasto que escurre sobre la superficie de la banqueta de concreto permeable con RCD (L/h). TR: Tiempo de retorno.

De manera complementaria, la Figura 4.5 refleja el comportamiento del gasto en el jardín de lluvia y muestra una tendencia coherente con los patrones hidrológicos observados en los elementos anteriores del sistema. Se aprecia que los valores son más elevados para eventos de corta duración (0.5–1 h), alcanzando hasta 882.7 L/h en un periodo de retorno de 25 años, lo que evidencia una respuesta inmediata y de alta carga hidráulica ante precipitaciones intensas. Conforme aumenta la duración del evento, los valores decrecen progresivamente (hasta 163.9 L/h en 3 h y TR=5 años), reflejando una mayor estabilidad y capacidad de infiltración sostenida.

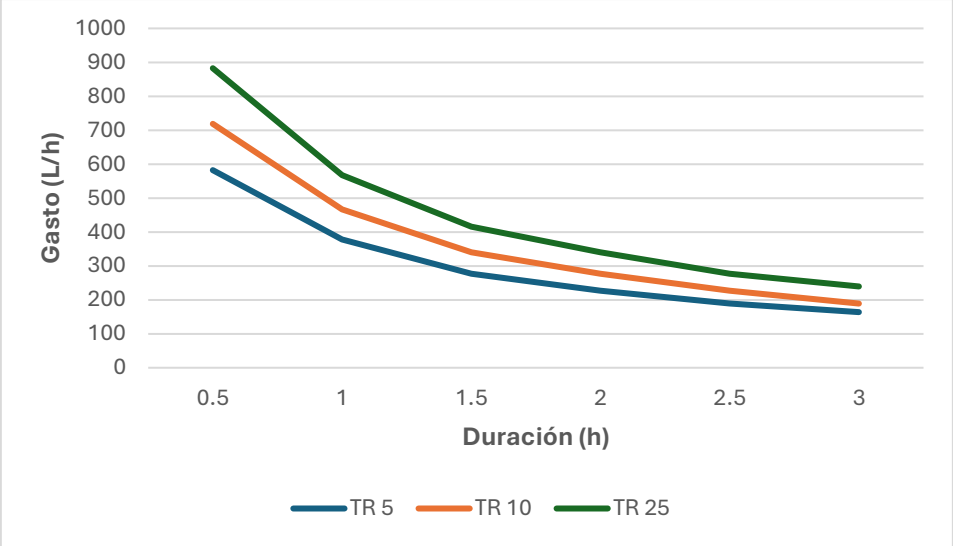

Figura 4.5 Gasto retenido por banqueta de concreto permeable (L/h). TR: Tiempo de retorno.

En comparación con el patio de pavimento permeable, los valores aquí reportados son mayores, lo que indica que la zanja o jardín recibe no solo el aporte directo de la precipitación, sino también el flujo excedente proveniente de las superficies previamente interconectadas. El incremento significativo con el TR confirma que este componente actúa como el principal regulador del sistema ante lluvias extremas, amortiguando los picos de caudal antes de su conducción al tanque de almacenamiento. En síntesis, los resultados demuestran que el jardín de lluvia cumple una función relevante de almacenamiento temporal y de disipación del flujo superficial, consolidando su papel dentro de los SUDS como un elemento de control hidrológico y ecológico complementario al pavimento permeable.

4.2.3 Jardín de lluvia

Los resultados obtenidos para el jardín de lluvia muestran un comportamiento hidrológico característico de sistemas de drenaje sostenible con alta capacidad de regulación. Se observa que los valores más elevados se presentan en eventos de corta duración (0.5 h), alcanzando 644.86 L/h para un periodo de retorno de 25 años, lo que indica una rápida recepción y conducción del flujo superficial procedente tanto de la lluvia directa como de los excedentes del pavimento permeable (Figura 4.6). A medida que la duración de la lluvia aumenta, los valores disminuyen gradualmente (hasta 119.76 L/h en 3 h y TR=5 años), lo que evidencia una eficiencia progresiva de la infiltración y una reducción de los picos de escorrentía.

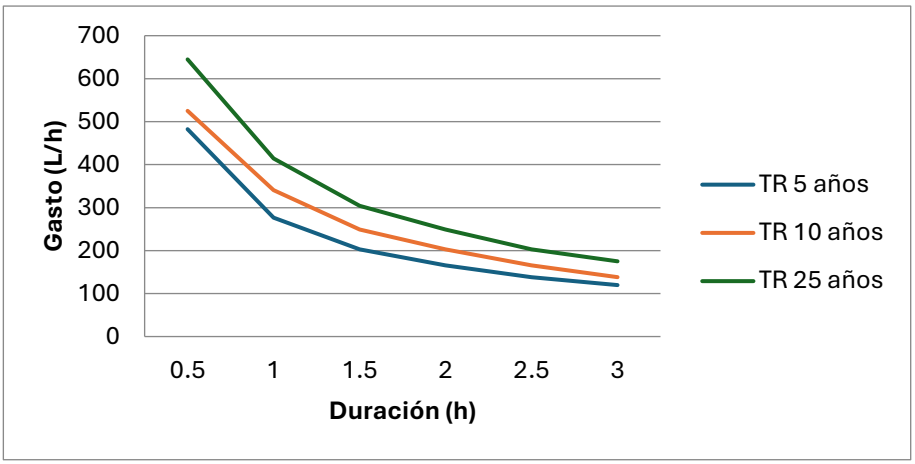

Figura 4.6 Gasto que ingresa al tanque de almacenamiento, excedente de jardín de lluvia (L/h). TR: Tiempo de retorno.

El aumento de los valores con el TR confirma que, ante eventos más intensos o extremos, el jardín de lluvia mantiene un comportamiento estable, adaptándose al incremento de la carga hidráulica sin perder su capacidad de infiltración. En comparación con los resultados del pavimento permeable, el jardín de lluvia presenta mayores valores de entrada y retención, lo que refleja su papel como elemento de amortiguamiento final del sistema. Esto refleja una eficiencia del 70%, ya que en su diseño se seleccionó un coeficiente de escorrentía de 0.7. El 30% restante del volumen de agua se retiene en su superficie, según factores como las pendientes del terreno, la cobertura vegetal y las propiedades hidráulicas del suelo. En caso de que el sistema reciba aportaciones superiores a su capacidad, existe riesgo de saturación y deterioro del ecosistema urbano, por lo que se recomienda integrar un tanque de almacenamiento con control de calidad del agua recolectada.

Finalmente, el gasto infiltrado en el suelo (Figura 4.7) refleja una tasa constante de absorción (156.107 L/h) en todos los escenarios (TR), lo cual se debe al efecto combinado de la vegetación xerófita y de la permeabilidad del sustrato (0.01 km/h).

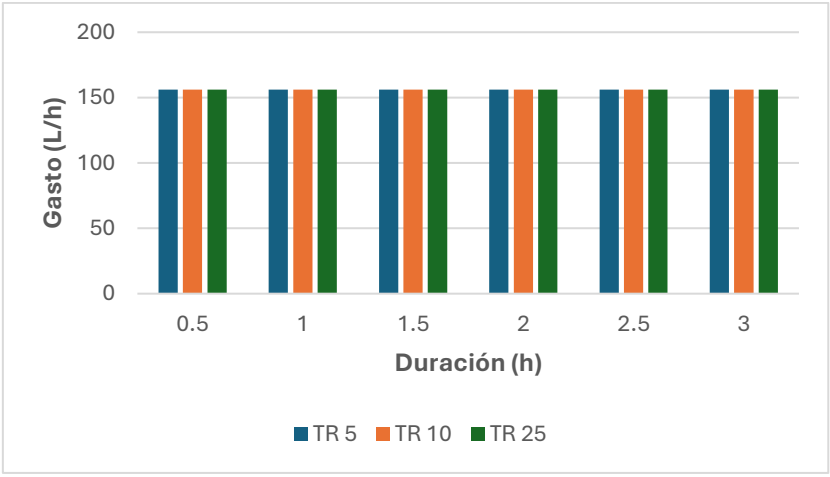

Figura 4.7. Gasto retenido por el jardín de lluvia. TR: Tiempo de retorno.

4.2.4 Volúmenes excedentes y retenidos

Los resultados representados en las Figuras 4.8 y 4.9 reflejan de manera integral el balance hidrológico del sistema compuesto por banqueta, patio con pavimento permeable y jardín de lluvia, bajo distintos TR y duraciones de lluvia (0.5 a 3 horas). En conjunto, los datos evidencian que el sistema responde de manera coherente ante la variabilidad temporal y la intensidad de los eventos pluviales: conforme aumenta la duración de la lluvia, los valores de gasto y volumen tienden a estabilizarse, lo que indica una capacidad sostenida de regulación e infiltración. Sin embargo, los valores crecen con el periodo de retorno, lo que confirma que los eventos extremos incrementan la carga hidráulica sobre el sistema, sin provocar colapso funcional (o saturación excesiva), lo que demuestra su resiliencia estructural e hidráulica.

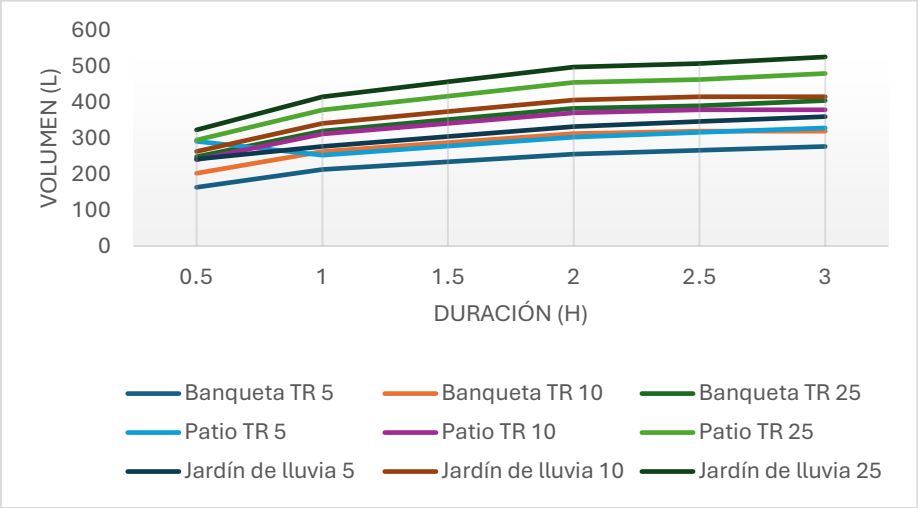

Figura 4.8 Volúmenes excedentes sobre el área total del prototipo. TR: Tiempo de retorno.

En la Figura 4.8, la banqueta con pavimento permeable presenta los mayores valores de gasto en todos los escenarios, lo que evidencia su papel como componente de transición que regula el flujo entre la superficie impermeable (banqueta) y el jardín de lluvia. La banqueta de concreto hidráulico muestra la menor capacidad de retención y el mayor aporte de escorrentía, mientras que el jardín de lluvia exhibe un comportamiento estable, manteniendo valores entre 240 y 525 L/h, lo que confirma su función de amortiguador final y como punto de infiltración principal.

Por su parte, los resultados de la Figura 4.9 (volúmenes retenidos) muestran un patrón complementario: el patio con pavimento permeable logra retener entre 192 y 718 L, superando ampliamente a la banqueta de concreto (18-45 L), y el jardín de lluvia mantiene constante su capacidad de retención (156 L), lo que refleja la saturación controlada del sustrato y la estabilidad del proceso de infiltración. En conjunto, el sistema demuestra una relación funcional entre sus componentes, en la que el flujo se distribuye y se regula progresivamente, reduciendo los picos de escorrentía superficial y aumentando la infiltración total.

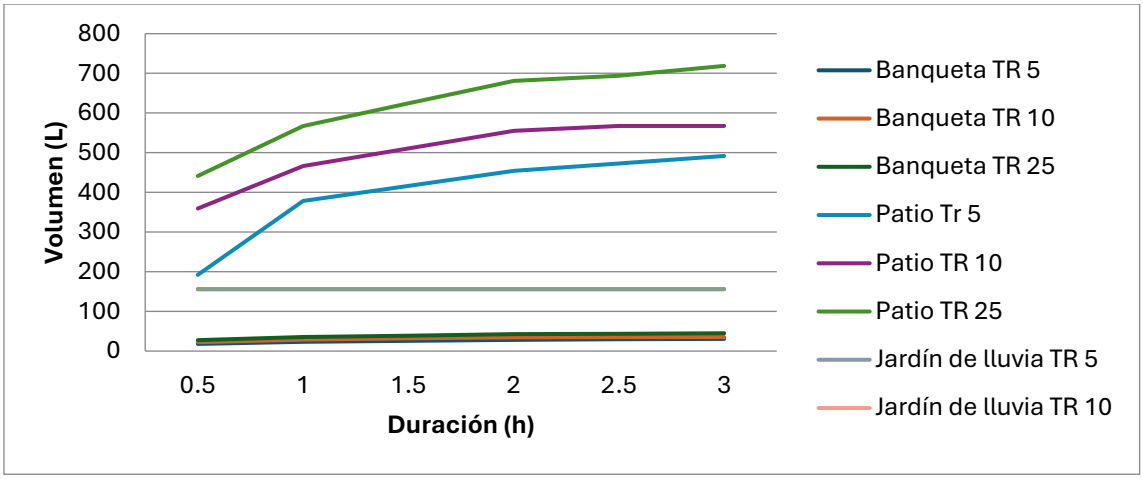

Figura 4.9 Volúmenes totales retenidos por el prototipo. TR: Tiempo de retorno.

4.3 Evaluación integral del prototipo

En el apartado anterior se realizó la evaluación hidráulica de cada componente del prototipo para determinar la variación en sus niveles de eficiencia. En este apartado, se presenta la evaluación integral como un sistema interconectado que captará el escurrimiento por infiltración y lo almacenará para fines no potables a escala de una vivienda tipo.

4.3.1 Gastos promedio

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento hidrológico del prototipo integrado de captación pluvial frente a distintos periodos de retorno (TR = 5, 10 y 25 años) y duraciones de lluvia (0.5 a 3 horas). En el caso del gasto total retenido, los valores más altos se registran durante los eventos de corta duración (0.5 h), alcanzando 576.77 L/h para TR=5 años y hasta 1093.93 L/h para TR=25 años, lo que refleja la respuesta inmediata del sistema ante lluvias intensas y de rápida ocurrencia (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Gastos promedio retenidos y excedentes por el prototipo.

Gasto total retenido por el prototipo (L/h)						
	Horas					
TR	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**
5	576.7724	558.029	450.8498	397.2602	357.068	330.2732
10	919.7588	651.8108	517.8368	450.8498	397.2602	357.068
25	1093.925	758.99	598.2212	517.8368	450.8498	410.6576
Gasto total excedente sobre el prototipo (L/h)						
	Horas					
TR	**0.5**	**1**	**1.5**	**2**	**2.5**	**3**
5	1390.793	741.1914	543.5404	444.7148	370.5957	321.1829
10	1408.264	914.1361	667.0723	543.5404	444.7148	370.5957
25	1729.447	1111.787	815.3105	667.0723	543.5404	469.4212

Conforme aumenta la duración del evento, el gasto retenido disminuye progresivamente, estabilizándose en valores menores a 400 L/h después de las 2.5 horas. Esta tendencia es coherente con el principio de infiltración decreciente, ya que los suelos y materiales filtrantes tienden a saturarse gradualmente, lo que reduce su capacidad de absorción con el tiempo. Además, el incremento del gasto retenido con el periodo de retorno muestra que, ante eventos extremos, el sistema mantiene una eficiencia hidráulica positiva, ya que incrementa proporcionalmente su capacidad de captación ante mayores intensidades pluviales.

Por otro lado, el gasto total excedente mantiene una correlación directa con la gravedad del evento. Los valores más altos (entre 1390.79 y 1729.45 L/h) corresponden a lluvias de corta duración y alta intensidad (0.5 h), mientras que los más bajos se observan en eventos prolongados (3 h). La diferencia entre los volúmenes retenidos y excedentes evidencia que el prototipo logra infiltrar aproximadamente 30-45% del flujo total, dependiendo del periodo de retorno, lo que representa un desempeño considerablemente superior al de superficies convencionales impermeables (Figura 4.10). En términos de eficiencia integral, los resultados confirman que el sistema actúa como una infraestructura de drenaje sostenible eficaz, capaz de reducir significativamente el volumen de escorrentía superficial y de amortiguar los picos de caudal, contribuyendo así a la resiliencia hídrica urbana y a la mitigación del riesgo de inundación en contextos semiáridos.

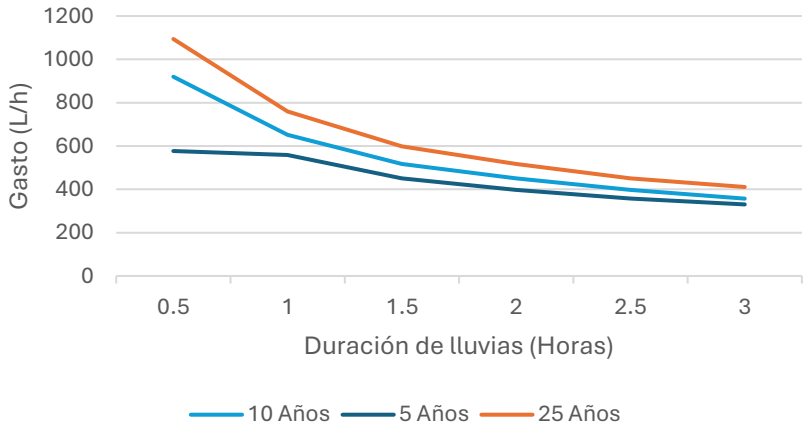

Figura 4.10 Curvas de infiltración (gasto retenido) en función del tiempo de retorno.

4.3.*2 Evaluación de los volúmenes infiltrados y excedentes*

De manera similar al análisis del gasto, la Tabla 4.2 presenta la síntesis de los volúmenes de agua, expresados en litros, que exceden la capacidad del prototipo, así como los que se retienen e infiltran en sus diferentes estratos.

Tabla 4.2 Volúmenes promedio retenidos y excedentes por el prototipo.

Volumen total excedente sobre el prototipo (L)						
			Horas			
TR	0.5	1	1.5	2	2.5	3
5	695.3965	741.1914	815.3105	889.4297	926.4893	963.5488
10	704.1318	914.1361	1000.608	1087.081	1111.787	1111.787
25	864.7233	1111.787	1222.966	1334.145	1358.851	1408.264
Volumen total retenido por el prototipo (L)						
			Horas			
TR	0.5	1	1.5	2	2.5	3
5	366.4397	558.029	598.2212	638.4134	658.5095	678.6056
10	537.9329	651.8108	698.7017	745.5926	758.99	758.99
25	625.016	758.99	819.2783	879.5666	892.964	919.7588

Por otro lado, los volúmenes excedentes muestran un incremento más pronunciado con el aumento del periodo de retorno, especialmente para las duraciones superiores a 1.5 horas, alcanzando valores de hasta 1408.26 L en TR=25 años y 3 h de duración. Este comportamiento confirma que, aunque el prototipo posee una alta capacidad de retención, existen límites físicos de infiltración que se alcanzan en condiciones extremas de precipitación. No obstante, el hecho de que el volumen retenido represente entre 35% y 45% del total precipitado indica un desempeño hidráulico eficiente en comparación con superficies impermeables convencionales.

En síntesis, los resultados generales presentados previamente confirman que el prototipo integrado de captación pluvial (compuesto por banqueta de concreto hidráulico, patio de pavimento permeable y jardín de lluvia) muestra una eficiencia hidráulica promedio del 41% en la retención del agua de lluvia, con una capacidad total de infiltración superior a 900 L/h en condiciones extremas (TR=25 años). El pavimento permeable se consolidó como el elemento más eficiente, al retener en promedio más del 70% del volumen infiltrado, mientras que el jardín de lluvia contribuyó con cerca del 23% y la banqueta de concreto con aproximadamente 5%, lo que demuestra la importancia del trabajo integral del sistema. Aunque el volumen excedente supera en algunos casos el 50% del total precipitado, la respuesta hidrológica del conjunto reduce significativamente los picos de escorrentía y la carga sobre la infraestructura pluvial. En comparación con obras convencionales, que apenas logran retener alrededor del 10% del agua incidente, el prototipo presenta una mejora significativa en la eficiencia hidráulica.

4.3.3 Volúmenes recuperables

Como se observó en la figura 4.2, existen volúmenes excedentes respecto del volumen total del prototipo. Estos excedentes pueden aprovecharse almacenándolos en tanques o cisternas, siempre y cuando se presente un periodo de lluvias frecuentes que favorezca una

recuperación y un almacenamiento continuos. Tomando que el volumen máximo de excedentes es de 1408.264 L de agua en un periodo de retorno de 25 años y una duración de 3 h, se puede optar por tanques prefabricados con capacidades comerciales mayores, como los de 1500 L. En casos en que se requiera una optimización y se contemple el uso de jardines de lluvia a corto plazo, se puede optar por tanques más pequeños, considerando los excedentes más desfavorables de cada uno, como se muestra en la figura 4.3. Las capacidades están sujetas a las especificaciones del proyecto, así como a las del fabricante y de la región.

Tabla 4.3. Capacidades de tanques de almacenamiento para la acumulación del agua excedente del prototipo en función del tiempo de retorno (TR).

TR	Excedentes L	Capacidad comercial L
5	963.5488	1000
10	1111.787	1200
25	1408.264	2000-2500

4.4 Presupuesto del sistema integral

En cuanto a la parte económica, en la tabla 4.4 se observa un presupuesto que contempla precios promedio locales de la ciudad de Mineral de la Reforma, por lo que los datos son variables para otros lugares. Este análisis no contempla la vegetación debido a la existencia de innumerables especies, por lo que la variación en su costo queda a cargo del responsable del proyecto y del propietario, quienes deben adaptarla a aspectos estéticos, económicos y funcionales.

Tabla 4.4 Presupuesto de sistema integral (banqueta de concreto hidráulico, patio de pavimento permeable y jardín de lluvia).

Concepto	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Costo total
Trazo y nivelación de banquetas y guarniciones, incluyen: materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	44.10	m^2	$5.13	$226.26
Corte de terreno a mano para banquetas y para jardín de lluvia, incluye: maquinaria, mano de obra, equipo y herramienta.	22.01	m^3	$154.94	$3,410.41
Afine y compactación manual para desplante de banquetas y guarniciones, incluye: mano de obra, equipo y herramienta	44.10	m^2	$18.68	$823.88
Base de materia RCD, T.M.A 3/4", para base de banquetas y jardín de lluvia. Incluye: mano de obra, herramienta y equipo	9.89	m^3	$351.32	$3,474.57
Banqueta de 15 cm de espesor de concreto de f'c = 150 kg/cm^2, T.M.A. 3/4", acabado escobillado, incluye:	7.87	m^2	$371.48	$2,925.39

cimbrado, colado, juntas con volteador a cada 1.50 m. curado, descimbrado, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.				
Banqueta de concreto permeable con RCD de 15 cm de espesor, f'c = 150 kg/cm^2, T.M.A. 3/4", acabado escobillado, incluye: cimbrado, colado y juntas con volteador a cada 1.50 m. curado, descimbrado, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	13.92	m^2	$360.39	$5,019.88
Tierra arenosa vegetal preparada para jardinería, incluye: suministro, acarreo, colocación, mano de obra, equipo y herramienta.	10.03	m^3	$570.17	$5,721.91
			TOTAL=	$21,602.30

4.4.1 Materiales

En el sistema integral de banqueta permeable con jardín de lluvia, el costo de materiales se optimiza gracias al uso de residuos de construcción y demolición como base y agregado en la mezcla de concreto permeable y en el relleno del jardín de lluvia. Esto reduce la necesidad de materiales vírgenes y disminuye el impacto económico y ambiental asociado a su extracción y transporte.

Además, el jardín de lluvia utiliza materiales de bajo costo como grava (natural y RCD), sustrato filtrante y vegetación nativa. Este enfoque permite una selección eficiente de recursos sin comprometer el desempeño hidráulico ni el aspecto estético del sistema. Para obtener los valores promedio vigentes en la región, se consultó a 5 proveedores locales y a través de servicios en línea.

4.4.2 Mano de obra

La implementación del sistema no requiere maquinaria pesada ni técnicas de alta especialización, lo que permite emplear mano de obra local y reducir los costos laborales. Tanto la conformación de la banqueta como la excavación e instalación del jardín de lluvia pueden ejecutarse mediante procesos constructivos sencillos y replicables.

El uso de materiales reciclados, además, facilita el manejo en sitio y reduce los tiempos de ejecución al prescindir de procesos de producción industrial complejos.

4.4.3 Mantenimiento

El mantenimiento requerido es bajo y de carácter preventivo. El mantenimiento de la banqueta permeable consiste en la limpieza periódica de la superficie para evitar obstrucciones causadas por hojas, tierra o basura. En el caso del jardín de lluvia, las tareas

principales incluyen podas ligeras, retiro de residuos sólidos, reposición de plantas, si es necesario, y revisión del flujo del agua.

Al tratarse de un sistema pasivo que funciona por gravedad e infiltración naturales, no requiere equipamiento técnico ni energía, lo que reduce significativamente los costos operativos a largo plazo. En este estudio se asume que las actividades las realizarán directamente los usuarios, por lo que no se consideró un costo del proyecto.

4.4.4 Comparación entre sistema integral y sistema convencional de drenaje urbano

La comparación entre el sistema combinado (constituido por banquetas permeables y jardines de lluvia) y el sistema convencional de drenaje urbano permite evidenciar las ventajas funcionales, ambientales y económicas del primero frente al segundo.

A. Captación de escorrentía

El sistema convencional presenta una capacidad de captación limitada, ya que el agua pluvial es conducida rápidamente hacia la red de alcantarillado sin ningún tipo de retención o aprovechamiento local, lo que incrementa los volúmenes pico de escorrentía. En contraste, el sistema combinado permite una captación progresiva y descentralizada. El agua se infiltra en el sitio a través de superficies permeables, lo que contribuye a disminuir los caudales máximos y la presión sobre la infraestructura pluvial existente (Fletcher et al., 2015).

B. Filtración y calidad del agua

En el sistema convencional no existe un proceso de tratamiento del agua pluvial; la escorrentía arrastra contaminantes superficiales al drenaje, lo que afecta la calidad del recurso. Por su parte, el sistema combinado integra procesos de filtración física (mediante banquetas permeables elaboradas con RCD) y de filtración biológica (mediante el sustrato y la vegetación del jardín de lluvia). Esta doble acción mejora significativamente la calidad del agua infiltrada y contribuye a la depuración natural del ciclo urbano del agua.

C. Uso de materiales

El sistema convencional se basa en el uso de concreto tradicional, cuya fabricación implica un alto consumo de energía y recursos naturales, lo que se traduce en una huella ambiental considerable. En cambio, el sistema combinado emplea materiales reciclados, principalmente RCD, en la elaboración del concreto permeable, promoviendo así prácticas de economía circular y reduciendo la extracción de áridos vírgenes (Silva et al., 2014).

D. Adaptabilidad al entorno

A diferencia del sistema convencional, caracterizado por su rigidez estructural, su carácter monofuncional y su integración estética limitada, el sistema combinado es adaptable y multifuncional (CIRIA, 2015). Su diseño permite una mejor integración en el paisaje urbano, aportando valor estético y funcionalidad ecológica al entorno.

E. Costos a largo plazo

El sistema convencional genera costos operativos y de mantenimiento elevados, asociados a la limpieza del alcantarillado y a la reparación de daños ocasionados por inundaciones (además, depende de las acciones del gobierno local). En cambio, el sistema combinado presenta costos menores a largo plazo debido a su capacidad de reducir la carga sobre el sistema pluvial y mitigar los riesgos hidrológicos, lo que se traduce en una infraestructura más resiliente y eficiente (y depende directamente del propietario).

F. Impacto ambiental

Finalmente, el sistema convencional contribuye a la impermeabilización del suelo, al aumento del efecto de isla de calor y a la degradación ambiental urbana (Palla et., al 2020). Por el contrario, el sistema combinado favorece la permeabilidad del terreno, mejora el microclima local, reduce las temperaturas urbanas y promueve la biodiversidad, consolidándose como una alternativa sostenible para la gestión del agua en zonas urbanas.

4.4.5 Beneficios ambientales

- El sistema propuesto permite la retención e infiltración de una proporción significativa del agua de lluvia directamente en el sitio, lo que contribuye a la disminución de los caudales pico generados por eventos de precipitación y reduce la carga hidráulica sobre los sistemas de drenaje urbano convencionales. Esta estrategia ha demostrado ser eficaz para la mitigación de inundaciones urbanas y la gestión sostenible de aguas pluviales (Wang, 2024 y González, 2025.).

- La combinación de procesos de filtración, a través de la banqueta permeable elaborada con RCD, mediante el jardín de lluvia, favorece la remoción de sedimentos, metales pesados, hidrocarburos y otros contaminantes característicos de la escorrentía urbana. Esto contribuye a mejorar la calidad del agua infiltrada o conducida hacia los sistemas de drenaje, en concordancia con los principios de la infraestructura verde.

- El aprovechamiento de RCD en la construcción de elementos permeables promueve la reutilización de materiales que comúnmente son considerados desechos, lo que reduce la demanda de agregados naturales y los impactos ambientales asociados a su extracción y procesamiento.

- La incorporación de jardines de lluvia como parte del sistema de manejo de aguas pluviales genera espacios verdes funcionales que actúan como hábitats temporales o permanentes para polinizadores, insectos benéficos y aves. En consecuencia, estos sistemas contribuyen al incremento de la biodiversidad urbana y a la mejora de los servicios ecosistémicos en entornos altamente urbanizados (Wang, 2024 y NRC Solutions, 2025).

4.4.6 Beneficios sociales

- La disminución de encharcamientos e inundaciones locales asociada a la implementación de infraestructura verde mejora la accesibilidad peatonal y vehicular, incrementa la seguridad vial y contribuye a la creación de espacios urbanos más seguros, funcionales y resilientes frente a eventos de precipitación intensa.

- Los sistemas de manejo sostenible de aguas pluviales, como los jardines de lluvia, pueden ser empleados como herramientas de educación ambiental en contextos comunitarios, escolares o institucionales, facilitando la comprensión del ciclo hidrológico urbano y fomentando una cultura de uso responsable del recurso hídrico.

- La planeación, construcción y mantenimiento de infraestructura verde favorecen la participación de la comunidad local, fortaleciendo el tejido social y el sentido de pertenencia, además de incrementar la disposición social hacia la adopción de prácticas sostenibles en la gestión del agua urbana (Kresge Foundation, 2025).

4.4.7 Beneficios estéticos

- Renaturalización del paisaje urbano: el jardín de lluvia introduce vegetación nativa y elementos naturales en áreas duras e impermeables, mejorando la estética del entorno.

- Textura y diseño sostenible en banquetas: el concreto permeable con RCD puede ofrecer una textura rústica e innovadora, permitiendo acabados visualmente atractivos que comunican su origen reciclado.

- Aumento del valor urbano y de la percepción positiva: las zonas intervenidas con SUDS tienden a valorizarse socialmente por su imagen de sostenibilidad, limpieza y confort ambiental (Johnson y Geisendorf, 2022).

4.5 Criterios de evaluación integral

4.5.1 Costo-beneficio

Desde una perspectiva de inversión y mantenimiento, el sistema representa una alternativa más eficiente que los métodos convencionales. Al utilizar materiales reciclados (RCD) en la fabricación de la banqueta, se reducen los costos asociados a la adquisición de materiales nuevos y se promueve la economía circular.

Además, al gestionar el agua a nivel local, se reducen los gastos recurrentes de limpieza y reparación de las redes pluviales sobrecargadas. El ahorro a largo plazo también se refleja en la prevención de daños por inundaciones urbanas y en la reducción del mantenimiento correctivo de pavimentos deteriorados por acumulaciones de agua.

A estos beneficios económicos se suman los ambientales y sociales, que, aunque no siempre se cuantifican directamente, representan un valor agregado sustancial para las comunidades.

4.5.2 Replicabilidad

Este tipo de intervención es altamente replicable en distintos contextos urbanos debido a su diseño modular, adaptable y de bajo requerimiento tecnológico. Puede implementarse tanto en nuevas urbanizaciones como en proyectos de rehabilitación de espacios públicos existentes.

Además, al no requerir equipos especializados ni técnicas constructivas complejas, su ejecución puede ser realizada por mano de obra local, lo que promueve la participación comunitaria y fortalece las capacidades técnicas locales.

4.6 Discusión

Los hallazgos encontrados mediante el análisis hidrológico confirman que los SUDS funcionan como alternativas efectivas frente a los sistemas convencionales de drenaje (ya que estos no recuperan ni infiltran directamente la escorrentía). Los resultados muestran que los componentes del prototipo presentan un comportamiento coherente con lo reportado en la literatura, especialmente en cuanto a:

- Mayores gastos instantáneos para eventos cortos e intensos, típicos de climas semiáridos (Figura 4.1),
- Disminución progresiva del caudal con lluvias más prolongadas, lo que confirma la capacidad del sistema para sostener procesos de infiltración,
- Y una respuesta más estable del jardín de lluvia, que actúa como regulador hidrológico al recibir tanto la precipitación directa como el excedente del pavimento permeable (Figura 4.5).

Este comportamiento respalda lo descrito en el Capítulo 2 respecto a la función amortiguadora de los jardines de lluvia y a la necesidad de integrarlos con pavimentos permeables para mejorar la retención y la disipación de los caudales (p. ej., los principios hidrológicos de las Tablas 2.3 y 2.4). El sistema integral confirma esta sinergia: la banqueta capta y transmite el flujo, mientras que el jardín regula y almacena, lo cual coincide con los mecanismos teóricos descritos en la literatura.

Por ejemplo, los resultados indican una mayor eficiencia hidráulica en un TR 10, con promedio del 41.31%, a diferencia de los TR 5 y TR 25 con 40.74% y 40.26% respectivamente, donde se tuvo un desempeño particularmente destacado del pavimento permeable, que retuvo más del 70% del volumen infiltrado con su volumen más alto en el TR 25, seguido del jardín de lluvia con cerca del 23%. Este comportamiento refleja la interacción entre los componentes del sistema, en el que el pavimento actúa como una barrera inicial que atenúa los picos de escorrentía y promueve la infiltración superficial, mientras que el jardín de lluvia complementa el proceso mediante la filtración biológica y el almacenamiento temporal. Tales resultados coinciden con los hallazgos de Fletcher et al. (2015) y Coleman et al. (2018), quienes señalan que los SUDS, cuando se implementan de manera integrada, logran reducir la impermeabilización efectiva del suelo y mejorar la resiliencia del drenaje urbano frente a lluvias intensas.

Asimismo, la eficiencia global del prototipo supera los valores reportados en la literatura para dispositivos individuales, como los jardines de lluvia de Álvarez-Castillo y Jalire-Valdivia (2024), quienes registraron una reducción promedio del 22% en el volumen de escorrentía. En el presente estudio, la combinación de pavimento permeable y jardín de lluvia alcanzó una reducción superior al 40%, lo que valida la efectividad del enfoque modular propuesto. Esta tendencia coincide con las conclusiones de Wang et al. (2017) y Buurman et al. (2021), que destacan la importancia de las soluciones híbridas (integradas por SUDS y dispositivos de infiltración) para mejorar la resiliencia hídrica urbana y mitigar los efectos de los eventos pluviales extremos.

El desempeño observado frente a periodos de retorno de 10 y 25 años, con volúmenes de infiltración superiores a 900 L/h, coincide con las recomendaciones de Chapman y Hall (2022), quienes enfatizan la necesidad de diseñar infraestructuras urbanas capaces de operar en condiciones críticas de precipitación. Además, la adopción de materiales reciclados como los RCD como medio filtrante en el pavimento permeable contribuye al cumplimiento de los principios de economía circular (Fletcher et al., 2015; Ruíz-Pérez et al. (2020). Finalmente, la eficiencia sostenida del sistema, basada en su comportamiento en suelos semi-permeables con vegetación xerófita, se relaciona con las condiciones experimentales descritas por Zubelzu et al. (2019), quienes documentan coeficientes de escorrentía bajos y alta infiltración en sustratos no compactados. En conjunto, los resultados demuestran que la integración de materiales reciclados y estrategias vegetadas puede consolidarse como una alternativa resiliente, ecológica y replicable.

Por último, la revisión bibliográfica también menciona limitaciones importantes, como el riesgo de colmatación, los desafíos de mantenimiento y la incertidumbre sobre el desempeño de estas tecnologías al incorporar materiales alternativos, como los RCD. Esta tesis confirma parcialmente esas interrogantes. Aunque el análisis hidráulico demuestra que el prototipo es funcional, no se incluyen mediciones experimentales del desempeño mecánico o hidrodinámico del concreto permeable con RCD, pese a que la bibliografía advierte que la incorporación de reciclados puede modificar la porosidad, la resistencia y la estabilidad estructural.

En este capítulo se confirma una correspondencia clara entre el comportamiento hidráulico reportado en la literatura y el desempeño observado en el prototipo diseñado, en particular en la operación complementaria del concreto permeable y del jardín de lluvia para regular los caudales y favorecer la recuperación de la escorrentía. Aunque este estudio analítico no consideró pruebas mecánicas in situ ni una modelación numérica, el análisis hidráulico facilita el diagnóstico de las pruebas mecánicas e hidráulicas necesarias en caso de que el prototipo se construya y se pruebe, con el fin de obtener información que permita su adaptación a condiciones reales.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

Los resultados obtenidos en este estudio permiten afirmar que la integración de una banqueta de concreto permeable con un jardín de lluvia, ambos con incorporación parcial de residuos de construcción y demolición (RCD), constituye una alternativa técnica y pertinente para mejorar la gestión del agua pluvial en contextos urbanos altamente impermeabilizados, como en la zona de estudio. La evaluación hidráulica desarrollada evidenció que el sistema propuesto incrementa la infiltración puntualmente, reduce los volúmenes de escurrimiento superficial y atenúa los excedentes que, bajo condiciones tradicionales, saturan la infraestructura de drenaje y pueden provocar inundaciones.

En el caso del concreto permeable con RCD, el análisis mostró que mantiene niveles adecuados de permeabilidad para aplicaciones en banquetas, al tiempo que reduce la dependencia de agregados vírgenes. Este resultado confirma que es posible avanzar hacia una gestión más responsable de los RCD sin comprometer la funcionalidad hidráulica del material. A su vez, el jardín de lluvia operó como un espacio de retención e infiltración eficiente, con capacidad para recibir el flujo proveniente de la banqueta permeable y favorecer la infiltración, reduciendo los caudales pico asociados a eventos de lluvia con distintos periodos de retorno.

La interacción entre ambos componentes sirvió para conformar un sistema integral con un desempeño hidráulico distinto del de soluciones aisladas. En comparación con la banqueta de concreto hidráulico convencional (que apenas permite reducir el volumen que recibe en torno al 10%), el prototipo diseñado retuvo e infiltró volúmenes significativamente mayores, incluso en escenarios hidrológicos con intensidades moderadas y altas. Estos resultados reafirman que este tipo de sistemas puede desempeñar un papel clave en la mitigación de las inundaciones urbanas y en la restauración parcial del ciclo hidrológico local (si se implementan a gran escala).

Si bien este estudio se desarrolló a partir de un prototipo analítico, sus resultados proporcionan bases suficientes para avanzar hacia pruebas piloto y diseños a escala real. La replicabilidad del sistema depende, no obstante, de la adecuada caracterización hidrológica y geotécnica del sitio, así como del mantenimiento periódico del pavimento permeable y del medio filtrante del jardín de lluvia, factores que condicionan su desempeño a largo plazo.

En conjunto, los hallazgos demuestran que el sistema integral evaluado es una alternativa viable y estratégica para fortalecer la resiliencia hídrica urbana en ciudades con altos niveles de impermeabilización y en condiciones semiáridas. Su implementación contribuiría a disminuir la vulnerabilidad frente a lluvias intensas, a mejorar la capacidad de infiltración del entorno construido y a promover soluciones constructivas con menor impacto ambiental,

alineadas con los principios de sostenibilidad que actualmente demanda la gestión urbana del agua.

5.2 Limitaciones del estudio

La investigación se centró en la evaluación analítica de un único prototipo, por lo que los resultados reflejan su desempeño local y no permiten inferir directamente el comportamiento del sistema en su conjunto ni su impacto a escala urbana. La eficacia general dependerá del número de unidades instaladas, de su distribución espacial, de las pendientes, de las características del terreno, así como de la intensidad y la frecuencia de las precipitaciones. Además, el análisis consideró únicamente las condiciones de precipitación locales, sin contemplar la variabilidad climática ni topográfica de otras regiones, lo que limita la generalización de los resultados.

En términos de tipo de suelo, el estudio se realizó en suelos Pheozem con vegetación xerófita y alta capacidad de infiltración; por tanto, los resultados podrían diferir significativamente en suelos con texturas más finas o con elevadas condiciones de compactación. Tampoco se efectuó una evaluación económica integral del sistema, ya que los costos pueden variar según el tipo de material reciclado, la mano de obra y los requisitos normativos. Finalmente, el estudio no abordó los posibles efectos estructurales derivados de la infiltración prolongada en proximidad de cimentaciones, muros de carga u otras estructuras, aspecto que deberá considerarse en futuras implementaciones.

5.3 Recomendaciones

Para futuras aplicaciones, se recomienda evaluar el comportamiento del prototipo como parte de un sistema urbano ampliado, considerando el número óptimo de unidades, su interacción hidráulica, las distancias y las pendientes, con el fin de estimar el tiempo de respuesta ante eventos de inundación. Asimismo, se sugiere realizar estudios geotécnicos y de infiltración específicos para cada sitio de implementación, priorizando el uso de vegetación nativa y de suelos con permeabilidad adecuada.

Desde el punto de vista económico, se recomienda realizar un análisis específico que considere las condiciones del terreno donde se implementará el prototipo, así como la mano de obra local, los materiales y el aumento por inflación vigente en la fecha de su análisis.

Desde el punto de vista técnico, la integración de tanques de almacenamiento podría incrementar la eficiencia del sistema; sin embargo, se recomienda establecer protocolos de control de calidad del agua para evitar riesgos sanitarios, dado que el escurrimiento urbano puede contener aceites, hidrocarburos, metales y desechos orgánicos. El uso del agua

recuperada deberá restringirse a actividades no potables, tales como el riego o la limpieza de áreas comunes.

Finalmente, se recomienda incorporar herramientas de modelación hidrológica e hidráulica (p. ej., SWMM) para simular el desempeño del sistema ante diferentes escenarios de precipitación, incluyendo lluvias torrenciales o huracanes, y realizar un análisis de costo-beneficio que determine su viabilidad económica y ambiental a mediano o largo plazo. Este tipo de evaluación fortalecerá la base técnica para escalar la propuesta, contribuyendo a la adaptación y a la sostenibilidad hídrica de los asentamientos urbanos en continuo crecimiento.

Referencias bibliográficas

Alsobrooks, A. (2022). Informativo sobre Pavimento Permeable. Recuperado de https://cbtrust.org/wp-content/uploads/Fact-Sheet-and-Guidelines_Permeable-Pavement_030922_Spanish.pdf

Alvarez Castillo, J. J., y Jalire Valdivia, M. V. (2024). Propuesta de implementación de jardines de lluvia basados en infraestructura verde para mitigar inundaciones pluviales en el distrito de Mariano Melgar, Arequipa. [Tesis profesional de Ingeniería civil]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. Obtenido de http://hdl.handle.net/10757/682807

Aoki, Y. (2009). Development of pervious concrete (Master's thesis). University of Technology, Sydney.

American Concrete Institute. (2010). Report on Pervious Concrete (ACI 522R). Obtenido de: https://es.scribd.com/document/405513984/ACI-522R-traducido-pdf

American Concrete Institute (ACI). (2020). ACI 522R-20: Report on Pervious Concrete. ACI.

American Society for Testing and Materials. (2020). Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method (ASTM G57). Obtenido de: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CG0057-20%7Cen-US

American Society for Testing and Materials. (2024). Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33/C33M). Obtenido de: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0033_C0033M-24%7Cen-US

ASTM International. (2017). *ASTM D5268-13: Standard test method for measuring mass per unit area of geotextiles*. ASTM International.

ASTM International. (2020). ASTM C1701/C1701M-17: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. ASTM.

Badillo, C. P. (2017). Jardines de lluvia, una estrategia paisajista para aprovechar el agua pluvial de las ciudades: Caso de estudio, Azcapotzalco. Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado de https://zaloamati.azc.uam.mx/items/5acdadd8-3bb7-4985-9ab1-5d0c6405a585

Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. Ecological Engineering, 36(4), 351–360. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014

Buurman, J. J. G., Lee, T. K., Iftekhar, M. S., y Yu, S. M. (2021). Strategies to promote the adoption of sustainable drainage by private developers: A case study from Singapore. Urban Water Journal, 18(1), 61-67. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1850804

Burns, M. J., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., Ladson, A. R., y Hatt, B. E. (2012). Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform. Landscape and Urban Planning, 105(3), 230-240. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.12.012.

Cáredenas Gutiérrez, E., Albiter Rodrígez, Á., y Jaimes Jaramillo, J. (2016). Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/104/10450491009/html/

CENAPRED. (2018). Inundaciones en México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/336984/1._180503_SRI_Inundaciones.pdf

Cerda, V., Osheen y Gironás, J. Evaluación del rendimiento a largo plazo y los beneficios económicos de los SUDS mediante simulación continua. *Water Resour Manage* **39**, 5391–5413 (2025). https://doi.org/10.1007/s11269-025-04209-3

Chapman, C., y 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

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

Coleman, S., Hurley, S., Rizzo, D., Koliba, C., y Zia, A. (2018). From the household to watershed: A cross-scale analysis of residential intention to adopt green stormwater infrastructure. Landscape and Urban Planning, 180, 195-206. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.09.005

Concreto Ecológico de México. (s.f.). Ecocreto. Recuperado de https://www.ecoconcretos.com/concreto-ecologico-en-mexico.html

Congreso del Estado de Hidalgo. (1999). Ley Estatal de Agua y Alcantarillado para el Estado de Hidalgo. Recuperado de https://www.congreso-hidalgo.gob.mx/biblioteca_legislativa/leyes_cintillo/Ley%20Estatal%20de%20Agua%20y%20Alcantarillado%20para%20el%20Estado%20de%20Hidalgo.pdf

Congreso del Estado de Hidalgo. (2000). Reglamento de la Ley Estatal de Agua y Alcantarillado. Recuperado de https://zacualtipan.hidalgo.gob.mx/descargables/transparencia/FRACCION_I/REGLAMENTO_DE_LA_LEY_ESTATAL_DE_AGUA_Y_ALCANTARILLADO.pdf

Congreso del Estado de Hidalgo. (2015). Ley para la Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo. Recuperado de https://www.congreso-hidalgo.gob.mx/biblioteca_legislativa/leyes_cintillo/Ley%20para%20la%20Proteccion%20al%20Ambiente%20del%20Estado%20de%20Hidalgo.pdf

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). *Guía técnica para la implementación de infraestructura verde en entornos urbanos*. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/documentos/infraestructura-verde

Damodaram, C., Giacomoni, M. H., Prakash, K., Khedun, C. P., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., y Zechman, E. M. (2010). Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management. Journal of the American Water Resources Association, 46(5), 907–918. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x

Delleur, J. W. (2003). The evolution of urban hydrology: Past, present, and future. Journal of Hydraulic Engineering, 129(8), 563-573. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:8(563)

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2018). Lineamientos para el diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Recuperado de https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/Lineamientos-PT-SUDS-V1-261218.pdf

Dunnett, N., & Clayden, A. (2007). *Rain gardens: Managing water sustainably in the garden and designed landscape*. Timber Press.

Economistas y Recursos Agropecuarios. (2022). Impermeabilización del Suelo. Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios, 2(6), I-VIII. Recuperado de: https://doi.org/10.19136/era.a2n6.840

El Sol de Hidalgo. (2024). Inspeccionan concreto permeable para el Ben Gurión. El Sol de Hidalgo. Recuperado de https://www.elsoldehidalgo.com.mx/local/inspeccionan-concreto-permeable-para-el-ben-gurion-12107288.html

Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *Stormwater Best Management Practices: Bioretention Systems*. Recuperado de https://www.epa.gov/soakuptherain/what-bioretention

Ferguson, B. K. (2005). Porous pavements. CRC Press.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., y Deletic, A. (2015). SUDS, LID, BMPs, and more: The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water Journal, 12(7), 525-542. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

García, J., y Rodríguez, A. (2021). Concreto permeable en áreas urbanas para la gestión del agua: Un caso en Bogotá, Colombia. Revista de Ingeniería y Tecnología, 15(4), 32-44

General Services Administration (GSA). (2011). *Sustainable Sites Handbook: Green Infrastructure for Urban Environments*. Recuperado de https://www.gsa.gov/sustainable-sites

Ghafoori, N., y Dutta, S. (1995). Building and nonpavement applications of no-fines concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 7(4), 286-289. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(286)

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., y Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. Built Environment, 33(1), 115-133. https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115

Gonzalez, D. (2025). *Rain gardens: A sustainable solution for stormwater management*. University of California Agriculture and Natural Resources. https://ucanr.edu/blog/water-supply-security-wss/article/jardines-de-lluvia-una-solucion-sostenible-para-la-gestion

Grupo COMPRE. (2022). Conozcan al concreto permeable. Recuperado de https://www.compre.com.mx/conozcan-al-concreto-permeable/

Hu, M., Zhang, X., Siu, Y., Li, Y., Tanaka, K., Yang, H., y Xu, Y. (2018). Flood Mitigation by Permeable Pavements in Chinese Sponge City Construction. Water, 10(2), 172. Recuperado de: https://doi.org/10.3390/w10020172

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021a). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, serie VI*. Escala 1:250,000.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021b). *México en cifras: Datos geográficos del municipio de Mineral de la Reforma*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/13/13051.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Clima*. *Hidalgo*. Recuperado de https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/clima.aspx

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2021). El Acueducto IMTA No. 6. Recuperado de https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/acueducto/2021/El_acueducto_IMTA_no6.pdf

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2024) Problemática de inundaciones en zonas urbanas y propuestas de solución desde UN Enfoque Matemático, gob.mx. Recuperado de: https://www.gob.mx/imta/documentos/problematica-de-inundaciones-en-zonas-urbanas-y-propuestas-de-solucion-desde-un-enfoque-matematico

Intendencia de Montevideo. (2009). Diseño de Sistemas de Aguas Pluviales Urbanas. Recuperado de https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/manualdinasa.pdf

Jiménez, P., y Martínez, S. (2020). Sistemas urbanos de drenaje sostenible: Estrategias para mitigar inundaciones urbanas. Urban Water Journal, 18(2), 89-102

Johnson, D., y Geisendorf, S. (2022). *Valuing ecosystem services of sustainable urban drainage systems: A discrete choice experiment to elicit preferences and willingness to pay. Journal of Environmental Management, 307*, 114508. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.1145

Juárez, A., y Rodríguez, P. (2020). Influencia de la granulometría en el concreto reciclado. Revista de Ingeniería Estructural, 45(2), 67-72.

Kasprzyk, M., Szpakowski, W., Poznańska, E., Boogaard, F. C., Bobkowska, K., y 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

Krebs, P., Qiu, X., y Ziegler, M. (2020). Sustainable urban drainage with permeable pavements: Effectiveness and applications. Sustainable Cities and Society, 62, 102379. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102379

Kresge Foundation. (2025). *Green infrastructure: Cities turn to nature to solve urban flooding*. https://kresge.org/news-views/green-infrastructure-cities-turn-to-nature-to-solve-urban-flooding

Lasa, P. (2008). SUDS S.L- Atlantis. Jornada Arquitectura Ecológica 3, Cádiz, España.

La Ciudad Saludable. (2016). *Manual de diseño de banquetas accesibles y sustentables*. Recuperado de https://laciudadsaludable.com/wp-content/uploads/2016/03/banqueta-aep-cdmx-borrador.pdf

Ledezma, A. L. (2012). *Obtención de la relación intensidad, duración, frecuencia de la precipitación en el altiplano central mexicano* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro]. Repositorio Institucional UAQ. https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/6212

Li, X., Zhang, Y., y Jiang, H. (2021). Recent advances in the development and application of permeable concrete: A review. Construction and Building Materials, 270, 121934. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121934

Lucas, W. C., Medina, D. E., Montalto, F. A., Skripnik, S., & Sokolovskaya, N. (2023). *Computational methods in low impact development stormwater control measures*. American Society of Civil Engineers.

Masís, R. y Vargas, H. (2014). Incremento de áreas impermeables por cambios de usos de la tierra en la microcuenca del río Burío. Revista Geográfica de América Central, (52), 1-22. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-28592014000100003&script=sci_arttext

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2019). Guía para la adaptación al riesgo de inundación mediante el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Recuperado de https://www.miteco.gob.es/...

Nibhanupudi, N., et al. (2020). Uso de residuos de construcción para concreto. Revista de Ingeniería Civil.

NRC Solutions. (2025). *Rain gardens*. https://nrcsolutions.org/rain-gardens/

Oliveira, R., y Silva, P. (2021). Recycling construction and demolition waste in pervious concrete. Journal of Sustainable Materials and Technologies, 25(3), 59-68.

Ossa López, A., y Rojas Valencia, M. N. (2023). Generación de residuos de la construcción y normativa aplicable en la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería UNAM. Recuperado de: https://www.iingen.unam.mx/esmx/AlmacenDigital/Gaceta/Gaceta_Septiembre_Octubre_2023/Paginas/Generacion-de-residuos-de-la-construccion-y normativa-aplicable-en-la-Ciudad-de-Mexico.aspx

Palla, B., Moni, C., y De Laurentiis, V. (2020). Urban soil sealing and its environmental impacts: A review. *Soil y Tillage Research, 195*, 104338. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.1043

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 327, 1-73. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20141120

Pérez Porto, J., y Gardey, A. (2021, 17 de junio). *Isoyeta – Qué es, historia, definición y concepto*. Definicion.de. https://definicion.de/isoyeta/

Pérez, L., Rodríguez, C., y Castro, M. (2018). Sistemas de drenaje sostenible y su impacto en el ciclo hidrológico urbano. Environmental Engineering Journal, 22(1), 120-135

Poon, C. S., y Chan, D. (2022). *Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review*. Journal of Building Engineering, 52, 104452. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. (2016). *Normas técnicas complementarias para el diseño y ejecución de banquetas*. México: Gobierno de la Ciudad de México. Recuperado de: http://www.data.seduvi.cdmx.gob.mx/portal/images/banners/banner_derecho/documentos/Manual_Normas_Tecnicas_Accesibilidad_2016.pdf

Rodriguez, M. R., De Jesús, M., Higuera, R. C., Rea, S. A., Gonzalez, J. C., Miguel, G. F. S., Guevara, H. J. P., y Chinchillas, M. C. (2023). Estudio de permeabilidad y propiedades mecánicas de concreto elaborado con sustituciones de grueso reciclado. agregado: Alternativa sostenible. LATIN AMERICAN JOURNAL OF APPLIED ENGINEERING, 6(1), 1-8. Recuperado de: https://doi.org/10.69681/lajae.v6i1.30

Rodríguez, G. A., y Martínez, H. (2018). Desarrollo de concreto permeable para la purificación del agua de lluvia y recarga de mantos acuíferos. Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM. Recuperado de https://unamglobal.unam.mx/global_revista/estudiantes-de-la-unam-disenan-concreto-ecologico/

Rodrígez Arbelo, A. M. (2017). Sistemas urbanos de drenaje sostenible. Hacia una gestión integral del ciclo urbano del agua. doi:https://oa.upm.es/47528/1/TFG_Rodriguez_Arbelo_AntonioMiguel.pdf

Ruíz-Pérez, M. R., Alba-Rodríguez, M. D., y Marrero, M. (2020). The water footprint of city naturalisation. Evaluation of the water balance of city gardens. Ecological Modelling, 424, 109031. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109031

Sakthibala, R. K., Vasanthi, P., Hariharasudhan, C., y Partheeban, P. (2025). A critical review on recycling and reuse of construction and demolition waste materials. Cleaner Waste Systems, 100375.

Santos, M., y Silva, D. (2019). Jardines de infiltración en áreas urbanas: Caso de estudio en Curitiba, Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Ambiental, 17(3), 195-206

Santos-Gentil, F., y Rojas-Manzano, M. A. (2020). Métodos de dosificación de concreto permeable - Revisión de estado del arte. IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica - LEMIT. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/346334709_METODOS_DE_DOSIFICACION_DE_CONCRETO_PERMEABLE_-_REVISION_DE_ESTADO_DEL_ARTE

Schueler, T. R., y Holland, H. K. (2000). The practice of watershed protection. Center for Watershed Protection.

Scholz, M., y Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. Building and Environment, 42(11), 3830-3836. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2022). *Isoyetas de intensidad - duración - periodo de retorno. Hidalgo*. Dirección General de Servicios Técnicos. https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/hidalgo/

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). (2021). *Guía de accesibilidad en la movilidad urbana*. Recuperado de https://www.gob.mx/sedatu/documentos/guia-de-accesibilidad

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2021). Cosecha de Lluvia: Instalación de sistemas de captación de agua de lluvia en viviendas de la Ciudad de México. Recuperado de https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Cuadernillos-Ambientales/6-LLUVIAS.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). Inundaciones. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112861/3-FASCCULOINUNDACIONES-ilovepdf-compressed.pdf

Silva, R., de Brito, J., y Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117

Sorigué. (2023). Sistemas urbanos de drenaje sostenible para una gestión eficiente y natural del agua de lluvia. Recuperado de https://blog.sorigue.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-para-un-una-gestion-eficiente-y-natural-del-agua-de-lluvia

Timm, C., y Jones, M. (2017). Evaluating permeable pavements for stormwater management in urban areas. Water Research, 113, 97-107. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.015

Toxement. (2020). *Concreto poroso compactado: guía técnica de aplicación*. Recuperado de https://www.toxement.com.co/media/4333/concreto_poroso-comprimido.pdf

Trapote, A. (s. f.). *Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de drenaje sostenible*. Universidad de Alicante. En esta obra se señala que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) permiten aminorar y retrasar los picos de tormenta y controlar la escorrentía superficial en zonas urbanas, lo que contribuye al manejo más eficaz del recurso hídrico

Unilock. (2024). *Nueve componentes de un pavimento permeable exitoso*. Recuperado de https://commercial.unilock.com/es/nine-components-of-a-highly-successful-permeable-pavement/

United States Environmental Protection Agency. (2015). *Storm Water Management Model (SWMM) version 5.1 user's manual* (EPA/600/R-14/413b). U.S. EPA, Office of Research and Development.

Valdés, J., et al. (2020). Residuos de construcción y demolición como agregado de concreto. Ecorfan

Wang, M., Sweetapple, C., Fu, G., Farmani, R., y Butler, D. (2017). A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. Journal of Environmental Management, 201, 145-152. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.034

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., y Shaffer, P. (2015). The SuDS Manual (C753). CIRIA. Recuperado de https://www.ciria.org/ItemDetail?iProductCode=C753

Zhou, J., Li, J., Wang, Y., y Li, H. (2022). Performance and environmental benefits of permeable concrete pavements: A review. Journal of Cleaner Production, 338, 130433. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130433.

Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L., Andrés-Domenech, I., Castillo-Rodríguez, J. T., y Perales-Momparler, S. (2019). Design of water reuse storage facilities in Sustainable Urban Drainage Systems from a volumetric water balance perspective. Science of The Total Environment, 663, 133-143. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.342

ANEXOS

ANEXO 1. CÁLCULO DE GASTOS DE SISTEMAS INTEGRADOS (BANQUETA DE CONCRETO HIDRÁULICO, BANQUETA DE CONCRETO PERMEABLE, JARDINES DE LLUVIA) EN UN PERÍODO DE RETORNO DE 5 AÑOS

Lluvia

Duración (hora):	0.5
Intensidad (m/h):	0.046
Tr (años)	5

Nota:

La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)

Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.326025	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.036225	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.5823186	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.3844404	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301				
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)		
Q (m^3/h)	0.48244938	Este volumen entra al tanque de almacenamiento			
Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc				Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas). Se toma el valor mínimo, porque la zanja es pequeña y poco profunda	
tc (h):	1				Kasprzyk et al. (2022)
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado un 10–30% por consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.48244938	m^3	482.44938	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	1
Intensidad (m/h):	0.03
Tr (años)	5

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.212625	entrante al patio
Vretenido:	0.023625	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.252198	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.378297	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.2763684	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y de la pendiente (p. ej., 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.2763684	m^3	276.3684	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	1.5
Intensidad (m/h):	0.022
Tr (años)	5

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.155925	entrante al patio
Vretenido:	0.017325	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.1849452	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.2774178	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.20267016	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.20267016	m^3	202.67016	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	2
Intensidad (m/h):	0.018
Tr (años)	5

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.127575	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.014175	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.1513188	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.2269782	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.16582104	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.16582104	m^3	165.82104	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	2.5
Intensidad (m/h):	0.015
Tr (años)	5

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.1063125	entrante al patio
Vretenido:	0.0118125	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.126099	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.1891485	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.1381842	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.1381842	m^3	138.1842	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	3
Intensidad (m/h):	0.013
Tr (años)	5

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.0921375	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0102375	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.1092858	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.1639287	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.11975964	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.11975964	m^3	119.75964	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

ANEXO 2. CÁLCULO DE GASTOS DE SISTEMAS INTEGRADOS (BANQUETA DE CONCRETO HIDRÁULICO, BANQUETA DE CONCRETO PERMEABLE, JARDINES DE LLUVIA) EN UN PERÍODO DE RETORNO DE 10 AÑOS

Lluvia:

Duración (hora):	0.5
Intensidad (m/h):	0.057
Tr (años)	10

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.4039875	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0448875	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.4791762	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.7187643	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.52509996	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc	Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–	Kasprzyk et al. (2022)

					6 h para tormentas cortas). Se toma el valor mínimo, porque la zanja es pequeña y poco profunda
tc (h):	1				
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.52509996	m^3	525.09996	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	1
Intensidad (m/h):	0.037
Tr (años)	10

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.2622375	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0291375	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.3110442	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.4665663	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.34085436	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.34085436	m^3	340.85436	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	1.5
Intensidad (m/h):	0.027
Tr (años)	10

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.1913625	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0212625	

Patio (pavimento permeable):

Área (m2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m3/h)	0.2269782	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.3404673	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.24873156	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.24873156	m^3	248.73156	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	2
Intensidad (m/h):	0.022
Tr (años)	10

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.155925	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.017325	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.1849452	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.2774178	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.20267016	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.20267016	m^3	202.67016	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	2.5
Intensidad (m/h):	0.018
Tr (años)	10

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.127575	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.014175	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.1513188	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.2269782	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.16582104	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.16582104	m^3	165.82104	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	3
Intensidad (m/h):	0.015
Tr (años)	10

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.1063125	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0118125	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.126099	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.1891485	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.1381842	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.1381842	m^3	138.1842	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

ANEXO 3. CÁLCULO DE GASTOS DE SISTEMAS INTEGRADOS (BANQUETA DE CONCRETO HIDRÁULICO, BANQUETA DE CONCRETO PERMEABLE, JARDINES DE LLUVIA) EN UN PERÍODO DE RETORNO DE 25 AÑOS

Lluvia:

Duración (hora):	0.5
Intensidad (m/h):	0.07
Tr (años)	25

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.496125	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.055125	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.588462	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.882693	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.6448596	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc	Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–	Kasprzyk et al. (2022)

					6 h para tormentas cortas). Se toma el valor mínimo, porque la zanja es pequeña y poco profunda
tc (h):	1				
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.6448596	m^3	644.8596	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	1
Intensidad (m/h):	0.045
Tr (años)	25

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.3189375	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0354375	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.378297	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.5674455	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.4145526	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es	Kasprzyk et al. (2022)

					pequeña y poco profunda
Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.					
ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.4145526	m^3	414.5526	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	1.5
Intensidad (m/h):	0.033
Tr (años)	25

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.2338875	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0259875	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.2774178	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.4161267	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.30400524	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas). Se toma el valor mínimo, porque la zanja es pequeña y poco profunda	Kasprzyk et al. (2022)
tc (h):	1		

Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.

ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.30400524	m^3	304.00524	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	2
Intensidad (m/h):	0.027
Tr (años)	25

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.1913625	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0212625	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.2269782	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.3404673	

Jardín d e lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.24873156	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas). Se toma el valor mínimo, porque la zanja es pequeña y poco profunda	Kasprzyk et al. (2022)
tc (h):	1		

Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.

ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.24873156	m^3	248.73156	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	2.5
Intensidad (m/h):	0.022
Tr (años)	25

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.155925	entrante al patio

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.1849452	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.2774178	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.20267016	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas).	
tc (h):	1	Se toma el valor mínimo, porque la zanja es pequeña y poco profunda	Kasprzyk et al. (2022)

Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.

ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.20267016	m^3	202.67016	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

Lluvia:

Duración (hora):	3
Intensidad (m/h):	0.019
Tr (años)	25

Nota:
La intensidad de lluvia se seleccionó a partir de las isoyetas de precipitaciones, elaborada por la SCT para Hidalgo (2022)
Estas isoyetas corresponden a Pachuca

Banqueta (concreto hidráulico):

Área (m^2)	7.875	
C	0.9	
Q (m^3/h)	0.1346625	entrante al patio
Vretenido (m^3):	0.0149625	

Patio (pavimento permeable):

Área (m^2)	13.929	
C	0.4	Fletcher et al. (2015)
Q (m^3/h)	0.1597254	entrante a zanja
Vinfiltrado (m^3):	0.2395881	

Jardín de lluvia:

Área (m^2)	22.301		
C	0.3	Suelo permeable, vegetación xerófita; infiltración alta (>70%) en suelos no compactados y con capas de grava.	Zubelzu et al. (2019)
Q (m^3/h)	0.17503332	Este volumen entra al tanque de almacenamiento	

Tiempo de contacto agua-suelo (horas)= tc		Depende del caudal de entrada y pendiente (ej. 2–6 h para tormentas cortas). Se toma el valor mínimo, porque la zanja es pequeña y poco profunda	Kasprzyk et al. (2022)
tc (h):	1		

Factor de corrección por vegetación xerófita (0.7–0.9): ff - Reduce el volumen infiltrado en un 10–30% debido al consumo de raíces.

ff:	0.7				
tc con ff(h):	0.7				
Conductividad Hidráulica (K, Pheozem; 10-20 mm/h)					
K (m/h):	0.01				
Vinfiltrado:	0.156107	m^3			
Vtanque:	0.17503332	m^3	175.03332	litros	Representa el volumen que ingresará al tanque de almacenamiento bajo estas condiciones de lluvia (no determina el tamaño del tanque)

ANEXO 4. VOLÚMENES RETENIDOS EN PROMEDIO POR EL PROTOTIPO POR PERÍODO DE RETORNO.

Volumen total retenido por el prototipo (L) TR=5 años							Volumen promedio	Porcentaje de retención
Elemento	**Horas**							
	0.5	1	1.5	2	2.5	3		
Banqueta	18.1125	23.625	25.9875	28.35	29.53125	30.7125	26.05313	4.468525
Patio	192.2202	378.297	416.1267	453.9564	472.8713	491.7861	400.8763	68.75665
Jardín de lluvia	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	26.77483

Volumen total retenido por el prototipo (L) TR=10 años							Volumen promedio	Porcentaje de retención
Elemento	**Horas**							
	0.5	1	1.5	2	2.5	3		
Banqueta	22.44375	29.1375	31.89375	34.65	35.4375	35.4375	31.5	4.552003
Patio	359.3822	466.5663	510.701	554.8356	567.4455	567.4455	504.396	72.88928
Jardín de lluvia	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	22.55872

Volumen total retenido por el prototipo (L) TR=25 años							Volumen promedio	Porcentaje de retención
Elemento	**Horas**							
	0.5	1	1.5	2	2.5	3		
Banqueta	27.5625	35.4375	38.98125	42.525	43.3125	44.8875	38.78438	4.753401
Patio	441.3465	567.4455	624.1901	680.9346	693.5445	718.7643	621.0376	76.11417
Jardín de lluvia	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	156.107	19.13243