

Viabilidad técnica de pavimentos permeables para calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla

Technical feasibility of permeable pavements for low-traffic streets in
Huauchinango, Puebla

Bonifacio Mateo Hernández

ma466791@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0003-5098-8045>
Universidad Autónoma del Estado De Hidalgo
Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Humberto Iván Navarro Gómez

humberto_navarro@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>
Universidad Autónoma del Estado De Hidalgo
Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Eber Pérez Isidro

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

Jesús Emmanuel Cerón Carballo

jesus_ceronc@uaeh.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2809-3387>
Universidad Autónoma del Estado De Hidalgo
Pachuca de Soto, Hidalgo – México

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5894>

Artículo recibido: 12 de enero de 2026.
Aceptado para publicación: 19 de mayo de 2026.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5894>

Viabilidad técnica de pavimentos permeables para calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla

Technical feasibility of permeable pavements for low-traffic streets in Huauchinango, Puebla

Bonifacio Mateo Hernández

ma466791@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0003-5098-8045>

Universidad Autónoma del Estado De Hidalgo

Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Humberto Iván Navarro Gómez¹

humberto_navarro@uaeh.edu.mx

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

Universidad Autónoma del Estado De Hidalgo

Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Eber Pérez Isidro

eber_perez@uaeh.edu.mx

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

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Jesús Emmanuel Cerón Carballo

jesus_ceronc@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2809-3387>

Universidad Autónoma del Estado De Hidalgo

Pachuca de Soto, Hidalgo – México

Artículo recibido: 12 de enero de 2026. Aceptado para publicación: 19 de mayo de 2026.

Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Se evaluó la viabilidad técnica de pavimentos permeables para calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla, mediante un enfoque cuantitativo que integró modelación hidrológica, verificación estructural y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Se caracterizaron dos tramos piloto con apoyo de ArcGIS Pro y se compararon tres alternativas de pavimento permeable: concreto permeable (PCP), adoquín permeable (PICP) y asfalto poroso (PA), bajo una lluvia de diseño con periodo de retorno de 10 años. Los resultados identificaron al concreto permeable como la alternativa óptima, con un puntaje AHP de 0.379 y ventajas en desempeño hidráulico y capacidad estructural. Esta configuración almacenó hasta 96.9 m³, redujo la escorrentía superficial en más del 25 % y presentó tiempos de vaciado menores a 5 horas, cumpliendo los criterios de diseño establecidos. Se concluye que el PCP es técnica y estructuralmente viable para su aplicación en vialidades de bajo tráfico del contexto estudiado y que representa una estrategia efectiva de adaptación climática y gestión pluvial urbana. Se recomienda su implementación progresiva en tramos piloto y el establecimiento de protocolos de mantenimiento para conservar su funcionalidad hidráulica a largo plazo.

Palabras clave: pavimentos permeables, drenaje urbano sostenible, escorrentía superficial,

¹Autor de correspondencia.

análisis multicriterio, infraestructura verde

Abstract

The technical feasibility of permeable pavements for low-traffic streets in Huauchinango, Puebla, was evaluated through a quantitative approach integrating hydrological modeling, structural verification, and the Analytic Hierarchy Process (AHP). Two pilot sections were characterized using ArcGIS Pro, and three permeable pavement alternatives were compared: pervious concrete pavement (PCP), permeable interlocking concrete pavement (PICP), and porous asphalt (PA), under a 10-year design storm. Results identified pervious concrete pavement as the optimal alternative, with an AHP score of 0.379 and advantages in hydraulic performance and structural capacity. This configuration stored up to 96.9 m³, reduced surface runoff by more than 25%, and exhibited drainage times shorter than 5 hours, meeting the established design criteria. It is concluded that PCP is technically and structurally viable for application in low-traffic streets under the studied context and represents an effective strategy for climate adaptation and urban stormwater management. Progressive implementation in pilot sections and the establishment of maintenance protocols is recommended to preserve long-term hydraulic functionality.

Keywords: permeable pavements, sustainable urban drainage, surface runoff, multicriteria analysis, green infrastructure

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



Cómo citar: Hernández, B. M., Navarro Gómez, H. I., Pérez Isidro, E., & Cerón Carballo, J. E. (2026). Viabilidad técnica de pavimentos permeables para calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 7 (2), 3151 – 3173. <https://doi.org/10.56712/latam.v7i2.5894>

INTRODUCCIÓN

La urbanización acelerada y la expansión de superficies impermeables han incrementado de forma significativa la vulnerabilidad hidrológica en ciudades intermedias, particularmente en contextos con topografía compleja y lluvias intensas concentradas en periodos cortos. En estos escenarios, la reducción de la infiltración natural y el incremento de la escorrentía superficial generan sobrecarga en los sistemas de drenaje y aumentan la frecuencia de inundaciones urbanas (Pantoja Cárdenas & Zambrano Nájera, 2024; Ali et al., 2025).

En localidades como Huauchinango, Puebla, caracterizadas por pendientes pronunciadas, desarrollo urbano reciente y exposición recurrente a lluvias hidrometeorológicas intensas documentadas para el estado de Puebla (CENAPRED, 2022; Gobierno del Estado de Puebla, 2025), estos procesos se intensifican debido a la limitada capacidad de la infraestructura pluvial para evacuar volúmenes concentrados en cortos intervalos de tiempo. Este desajuste entre la dinámica urbana y la capacidad hidráulica existente ha sido identificado como uno de los principales factores de riesgo en ciudades con crecimiento no planificado (Sánchez Almodóvar et al., 2022; Solórzano-Villegas & Quiroz-Fernández, 2021).

Frente a estas limitaciones, los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) han emergido como una alternativa técnica orientada a gestionar el agua de lluvia en el sitio de origen, mediante procesos de infiltración, almacenamiento temporal y control distribuido del escurrimiento. Dentro de estos sistemas, los pavimentos permeables constituyen una solución clave, ya que permiten interceptar y regular el flujo superficial, reduciendo los caudales pico y mejorando la respuesta hidrológica de las vialidades urbanas (Sousa et al., 2024; Tavasszy et al., 2024).

El desempeño de los pavimentos permeables depende de múltiples factores, entre los que destacan la porosidad conectada, el espesor de almacenamiento, la granulometría de las capas, las condiciones del suelo subyacente y los procesos de mantenimiento. Estudios recientes han demostrado que la eficiencia hidráulica de estos sistemas puede disminuir significativamente debido a procesos de colmatación, lo que resalta la importancia de considerar el ciclo de vida completo en su diseño y evaluación (Tota-Maharaj et al., 2025; Sousa et al., 2024).

Asimismo, la viabilidad de estas soluciones no puede evaluarse únicamente desde el punto de vista hidráulico. Es necesario integrar criterios estructurales, operativos y de factibilidad local, particularmente en calles de bajo tráfico donde las cargas son menores, pero las condiciones de mantenimiento y disponibilidad de recursos municipales juegan un papel determinante (Dalla Mora et al., 2025; Pantoja Cárdenas & Zambrano Nájera, 2024).

En este contexto, el uso de herramientas de análisis multicriterio, como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), permite estructurar decisiones complejas mediante la integración de variables cuantitativas y cualitativas, facilitando la selección de alternativas óptimas en función de criterios técnicos definidos (Saaty, 2008; Malczewski, 2006).

A pesar del avance en la literatura, persiste una brecha en la evaluación integrada de pavimentos permeables en contextos municipales específicos, donde las condiciones geotécnicas, hidrológicas y operativas difieren de los entornos donde se han desarrollado la mayoría de los estudios. En particular, existe una limitada aplicación de metodologías que combinen modelación hidrológica, verificación estructural y análisis multicriterio en ciudades intermedias con topografía compleja.

En este marco, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica de tres configuraciones de pavimentos permeables —concreto permeable (PCP), adoquín permeable (PICP) y

asfalto poroso (PA)– para calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla, mediante la integración de modelación hidrológica, verificación estructural y análisis multicriterio.

La investigación busca identificar la alternativa con mejor desempeño integral y aportar una metodología reproducible para la toma de decisiones en la implementación de infraestructura urbana resiliente frente al cambio climático.

Este enfoque también se alinea con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030, que promueve la reducción de la exposición y vulnerabilidad urbana mediante acciones preventivas, planificación territorial y fortalecimiento de la resiliencia local (UNDRR, 2015).

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

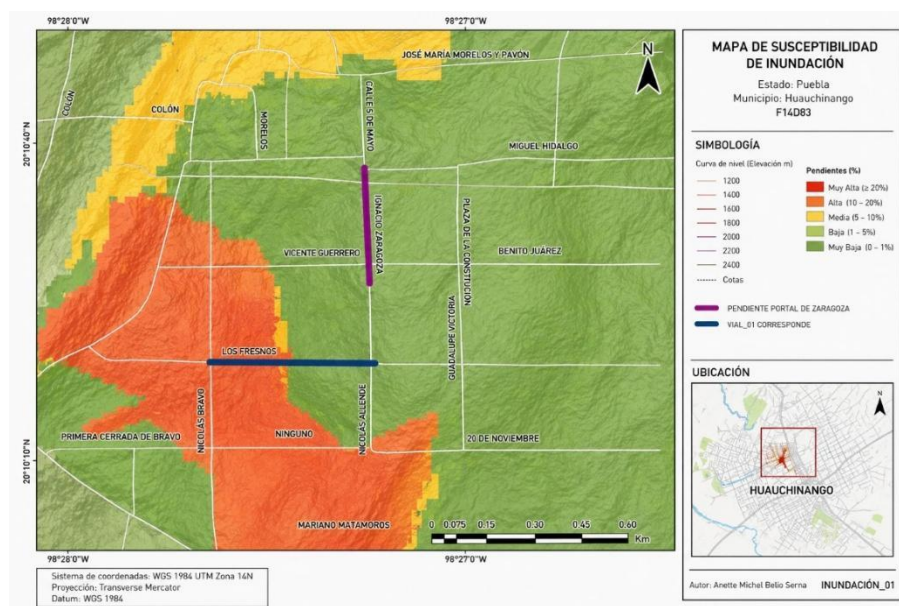
Se desarrolló un estudio cuantitativo, aplicado y comparativo, orientado a evaluar la viabilidad técnica de pavimentos permeables en calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla. La metodología se estructuró en cuatro fases: planeación, obtención de datos, análisis técnico y evaluación multicriterio, con el objetivo de integrar variables hidrológicas, estructurales y operativas en un marco de decisión reproducible.

Área de estudio y selección de tramos

El análisis se centró en la cabecera municipal de Huauchinango, Puebla, la cual presenta una población y distribución urbana que condicionan la generación de escorrentía superficial y la demanda de infraestructura pluvial (INEGI, 2020). Mediante ArcGIS Pro se procesó un modelo digital de elevación (MDE) para delimitar microcuencas y caracterizar dos tramos piloto con pendientes entre 5 % y 9 % y condiciones de bajo a medio tráfico.

Figura 1

Corredor piloto, red vial y pendientes en Huauchinango, Puebla



Fuente: elaboración propia con ArcGIS Pro, a partir de cartografía base y modelo digital de elevación.

Descripción: la figura localiza los tramos piloto seleccionados y muestra su relación con la topología vial y las pendientes del terreno, información utilizada para caracterizar la viabilidad técnica de las alternativas de pavimento permeable.

Tabla 1

Caracterización de los tramos piloto de estudio

Tramo	Calle	Longitud aproximada	Ancho de calzada	Pendiente media	Condición vial	ADT
T-1	Corregidora	142	6.5	5	0.25	845
T-2	Portal de Zaragoza	80	6.5	9	0.15	1270

Nota: ADT = tránsito diario promedio. Las mediciones de longitud y ancho de calzada fueron verificadas in situ.

Fuente: elaboración propia a partir de levantamiento en campo, conteo manual vehicular y procesamiento geoespacial en ArcGIS Pro, 2025.

Alternativas evaluadas

Se analizaron tres configuraciones de pavimentos permeables:

- Concreto permeable (PCP)
- Adoquín permeable intertrabado (PICP)
- Asfalto poroso (PA)

Estas alternativas fueron seleccionadas con base en su aplicación documentada en infraestructura de drenaje urbano sostenible (FHWA, 2016; ICPI, 2011).

Análisis hidrológico

El caudal pico se estimó mediante el método racional:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (1)$$

donde:

Q = caudal pico (m^3/s)

C = coeficiente de escorrentía

I = intensidad de lluvia (mm/h)

A = área de la cuenca (km^2)

Las intensidades se obtuvieron a partir de curvas IDF con periodo de retorno de 10 años (IMTA/CONAGUA, 2021). Para validar los resultados, se construyó un hidrograma triangular equivalente para un evento de 30 minutos, comparando los caudales obtenidos con el método racional. Se estableció como criterio de coherencia una diferencia relativa máxima de $\pm 20\%$, conforme a criterios hidrológicos aplicados en microcuencas urbanas (Chow et al., 1988).

Evaluación hidráulica

Se evaluaron los siguientes indicadores:

- Tasa de infiltración (mm/h)
- Volumen de almacenamiento (m³)
- Tiempo de vaciado (h)
- Reducción de escorrentía (%)

El volumen de almacenamiento se estimó como:

$$V = A \cdot n \cdot h \quad (2)$$

donde:

V = volumen de almacenamiento (m³)

A = área (m²)

n = porosidad efectiva

h = espesor de la capa de almacenamiento (m)

Los criterios de aceptación fueron:

infiltración ≥ 100 mm/h

tiempo de vaciado ≤ 48 h

Este umbral debe verificarse mediante mediciones periódicas de infiltración superficial, ya que los métodos de evaluación en sitio permiten identificar pérdida de funcionalidad, necesidad de mantenimiento y variabilidad espacial del desempeño hidráulico (Khan & Ahmad, 2023; Jiang et al., 2023). Adicionalmente, se consideró la posible pérdida de desempeño hidráulico por colmatación, debido a que estudios recientes han demostrado que la acumulación de partículas reduce la permeabilidad efectiva y modifica la respuesta hidráulica de pavimentos porosos y permeables (Lu et al., 2024).

Evaluación estructural

La capacidad estructural se evaluó considerando:

- Ejes equivalentes de carga (ESAL)
- Módulo resiliente del suelo (MR)
- Espesores de capa

Los criterios se basaron en lineamientos de diseño para pavimentos permeables de bajo tráfico (FHWA, 2019; ACI 522R, 2023).

Análisis multicriterio (AHP)

Se implementó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con cuatro niveles:

- Objetivo
- Criterios

- Subcriterios
- Alternativas

Los criterios evaluados fueron:

- Desempeño hidráulico
- Capacidad estructural
- Operación y mantenimiento
- Factibilidad

Se utilizaron matrices de comparación pareada con escala de Saaty (1-9). Se verificó la consistencia mediante la razón de consistencia (RC), estableciendo como criterio de aceptación $RC \leq 0.10$ (Saaty, 2008).

Tabla 2

Criterios, pesos y sentido de evaluación del análisis multicriterio

Criterio	Símbolo	Peso	Sentido de evaluación	Indicadores asociados
Desempeño hidráulico	H	0.512	Mayor es mejor	infiltración, almacenamiento, reducción de escorrentía
Capacidad estructural	E	0.210	Mayor es mejor	ESAL, módulo resiliente, espesor
Operación y mantenimiento	O&M	0.078	Menor complejidad es mejor	limpieza, frecuencia, colmatación
Factibilidad	F	0.200	Mayor es mejor	disponibilidad de materiales, constructibilidad, costo relativo

Nota: AHP = Proceso Analítico Jerárquico; O&M = operación y mantenimiento.

Fuente: elaboración propia con base en Saaty (2008), Malczewski (2006) y criterios técnicos de diseño de pavimentos permeables.

Validación

Los resultados se contrastaron con:

- registros históricos de inundación
- mapas de riesgo elaborados en SIG

Esto permitió validar la coherencia entre el modelo y el comportamiento real del sistema urbano.

Consideraciones de validez

Validez interna: verificación cruzada de métodos hidrológicos

Validez externa: comparación con eventos históricos

Fiabilidad: uso de normas ASTM (2023), ACI (2023) y FHWA (2019)

DESARROLLO

La gestión sostenible de aguas pluviales ha evolucionado en las últimas décadas desde un enfoque centrado en la evacuación rápida del escurrimiento hacia modelos que priorizan la infiltración, retención y control distribuido del agua en el sitio de origen. Este cambio responde a la creciente evidencia de que los sistemas convencionales de drenaje urbano resultan insuficientes frente al incremento de eventos extremos asociados al cambio climático (IPCC, 2022; Ali et al., 2025).

En este contexto, los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) buscan replicar procesos hidrológicos naturales mediante soluciones descentralizadas que reduzcan la escorrentía superficial, favorezcan la recarga de acuíferos y disminuyan los caudales pico. Diversos estudios han demostrado que estas estrategias pueden reducir significativamente el riesgo de inundaciones urbanas cuando se aplican de manera integrada en la infraestructura urbana (Sánchez Almodóvar et al., 2022; Sousa et al., 2024).

Estudios recientes sobre soluciones basadas en la naturaleza e infraestructura verde han confirmado que la reducción de superficies impermeables y la incorporación de sistemas descentralizados favorecen la regulación de escorrentías urbanas, especialmente bajo escenarios de lluvia intensa y cambio climático (Su et al., 2023; Wübbelmann et al., 2023; George et al., 2025). Dentro de los SUDS, los pavimentos permeables constituyen una de las tecnologías más relevantes para la gestión pluvial en vialidades urbanas.

Estos sistemas permiten el paso del agua a través de su estructura, almacenándola temporalmente en capas granulares y facilitando su infiltración hacia el subsuelo o su evacuación controlada. Además, los pavimentos permeables han sido evaluados recientemente como sistemas de bajo impacto capaces de reducir escorrentía, retener contaminantes y apoyar la gestión descentralizada del agua pluvial urbana, aunque su eficacia depende de la estructura de capas, la permeabilidad inicial y la conservación de vacíos funcionales (Tota-Maharaj et al., 2025; Franco et al., 2025).

Su desempeño depende de la interacción entre la capa superficial permeable, la base de almacenamiento y las condiciones del suelo natural (Tavasszy et al., 2024; Pantoja Cárdenas & Zambrano Nájera, 2024).

Las revisiones recientes sobre pavimentos permeables destacan que su desempeño depende no solo de la infiltración superficial, sino también de la capacidad de almacenamiento, reutilización del agua, control de contaminantes y mantenimiento durante el ciclo de vida del sistema (Franco et al., 2025; Yang et al., 2024).

El comportamiento hidráulico de estos sistemas está directamente relacionado con la porosidad conectada, la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento. La tasa de infiltración, comúnmente medida en mm/h, representa uno de los parámetros clave para evaluar su funcionamiento, mientras que el tiempo de vaciado permite determinar la eficiencia del sistema para restablecer su capacidad ante eventos sucesivos de lluvia (ASTM International, 2023; Tota-Maharaj et al., 2025).

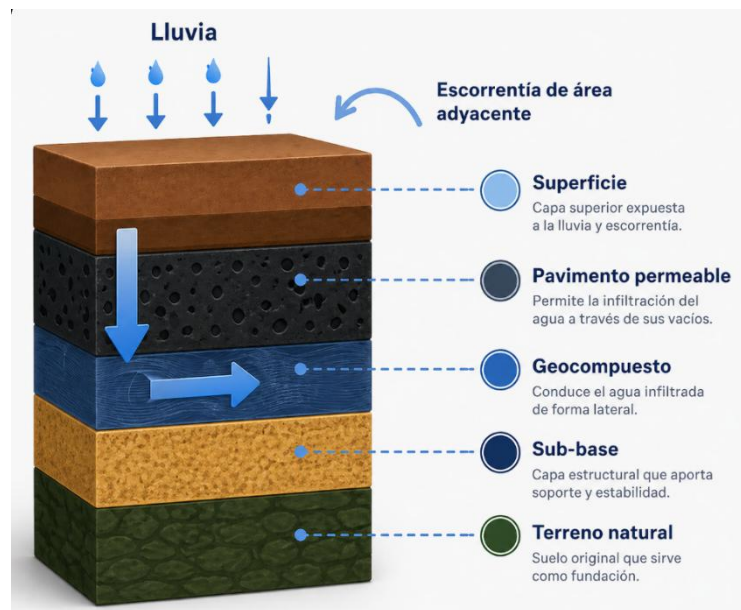
Uno de los principales desafíos en el uso de pavimentos permeables es la colmatación, proceso mediante el cual partículas finas obstruyen los vacíos del sistema, reduciendo su capacidad hidráulica.

Investigaciones recientes han señalado que este fenómeno puede disminuir significativamente el desempeño si no se implementan estrategias adecuadas de mantenimiento, lo que convierte a la operación y mantenimiento en un componente crítico de su viabilidad a largo plazo (Sousa et al., 2024; Tota-Maharaj et al., 2025).

Desde el punto de vista estructural, los pavimentos permeables deben diseñarse para soportar cargas vehiculares sin comprometer su funcionalidad hidráulica. En vialidades de bajo tráfico, el diseño se basa en parámetros como el número de ejes equivalentes de carga (ESAL), el módulo resiliente del suelo y el espesor de las capas, buscando un equilibrio entre resistencia mecánica y permeabilidad (FHWA, 2019; Dalla Mora et al., 2025).

Figura 2

Estructura típica de un sistema de pavimento permeable con geocompuesto



Fuente: adaptado de Acosta Michel (2016).

El esquema muestra la disposición estratigráfica de un pavimento permeable, incluyendo capa superficial, base granular, subbase de almacenamiento y geo compuesto filtrante para conducción e infiltración pluvial.

Dado que el desempeño de los pavimentos permeables depende de múltiples variables, su evaluación requiere metodologías integradas que permitan comparar alternativas bajo criterios diversos. En este sentido, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se ha consolidado como una herramienta útil para la toma de decisiones en ingeniería civil, ya que permite jerarquizar criterios y evaluar alternativas mediante comparaciones estructuradas con control de consistencia (Saaty, 2008; Malczewski, 2006).

La aplicación de este tipo de metodologías en contextos urbanos específicos permite adaptar configuraciones estandarizadas a condiciones locales, considerando variables como pendiente, tipo de suelo, intensidad de lluvia y capacidades de mantenimiento.

Esta adaptación resulta fundamental para garantizar la viabilidad técnica de los pavimentos permeables en ciudades intermedias con limitaciones operativas y alta variabilidad hidrológica (Ali et al., 2025; Sousa et al., 2024).

RESULTADOS

Los resultados se organizaron en cuatro bloques: verificación estructural de las alternativas, capacidad de almacenamiento y tiempo de vaciado, validación hidrológica independiente y análisis multicriterio mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Esta estructura permite verificar si las tres configuraciones evaluadas –concreto permeable (PCP), adoquín permeable intertrabado (PICP) y asfalto poroso (PA)– cumplen simultáneamente con criterios hidráulicos, estructurales y operativos para calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla.

Verificación estructural de las alternativas

La Tabla 3 sintetiza la verificación estructural de las tres alternativas evaluadas. Los resultados indican que PCP, PICP y PA cumplen los requerimientos para calles de bajo tráfico, considerando la capacidad de carga estimada, el módulo resiliente y los criterios normativos aplicables.

El PICP presentó la mayor capacidad estimada, con 52,000 ejes equivalentes de carga simple (ESAL), seguido por el PCP con 45,000 ESAL y el PA con 38,000 ESAL. Aunque las tres opciones resultaron técnicamente admisibles, el PCP mantuvo un equilibrio más favorable entre capacidad estructural y desempeño hidráulico, condición relevante para calles secundarias donde se busca reducir escorrentía sin sobredimensionar la solución.

Estos resultados son consistentes con investigaciones recientes que señalan que los pavimentos permeables pueden mantener desempeño estructural suficiente en aplicaciones de bajo tránsito, siempre que se controle la configuración de capas, la porosidad y el soporte de la subrasante.

Tota-Maharaj et al. (2025) documentaron que la capacidad portante y el comportamiento frente a colmatación dependen de la selección de materiales de base y subbase, mientras que Wang et al. (2023) destacaron que el concreto permeable requiere balancear conectividad de poros, resistencia mecánica y resistencia a obstrucción para conservar su funcionalidad a largo plazo.

Tabla 3

Síntesis de la verificación estructural de alternativas de pavimento permeable

Alternativa	Capacidad de carga (ESAL)	Módulo resiliente (MPa)	Cumplimiento para bajo tráfico	Normativa aplicable
PCP (concreto permeable)	45,000	28.5	Sí	ACI 522R
PICP (adoquín permeable intertrabado)	52,000	31.2	Sí	ICPI / FHWA
PA (asfalto poroso)	38,000	24.8	Sí	AASHTO / FHWA

Nota: ESAL = ejes equivalentes de carga simple; ICPI = Interlocking Concrete Pavement Institute; FHWA = Federal Highway Administration; AASHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials.

Fuente: elaboración propia con criterios ACI 522R (2023), ICPI (2011), AASHTO (2019) y FHWA (2016, 2019).

Capacidad de almacenamiento y tiempo de vaciado

La Tabla 4 presenta la capacidad de almacenamiento y el tiempo de vaciado de cada alternativa. Los resultados muestran que las tres configuraciones cumplen con el criterio de almacenamiento requerido para el evento de 30 minutos y con el límite de vaciado menor a 48 horas.

El PCP almacenó 52.5 m³ frente a un volumen de diseño de 43.75 m³; el PICP almacenó 49.0 m³ frente al mismo volumen de referencia; y el PA almacenó 31.5 m³ frente a 26.25 m³. En todos los casos, el volumen almacenado fue superior al volumen efectivo de diseño, lo que confirma la suficiencia hidráulica inicial de las alternativas.

El tiempo de vaciado también se mantuvo dentro del criterio establecido: 36 h para PCP, 40 h para PICP y 28 h para PA. Aunque el PA presentó el menor tiempo de vaciado, su menor almacenamiento absoluto y su comportamiento estructural más limitado reducen su ventaja integral. En contraste, el PCP ofreció una relación más equilibrada entre capacidad de almacenamiento, tiempo de drenaje y resistencia estructural.

Este resultado debe interpretarse como desempeño inicial del sistema, ya que investigaciones recientes han mostrado que la capacidad de infiltración puede disminuir por colmatación progresiva y que la recuperación hidráulica depende del tipo de limpieza, frecuencia de mantenimiento y características del material superficial (Merten et al., 2022; Li et al., 2023).

La literatura reciente muestra que el desempeño hidrológico de los pavimentos permeables varía de forma importante según la intensidad y duración de la lluvia. Huang et al. (2025) reportaron que la reducción del caudal pico en pavimentos permeables recién construidos puede ser igual o superior a 52 %, aunque también identificaron pérdida de desempeño en ciertos sistemas después de un año de servicio, lo que confirma la importancia de considerar mantenimiento y vida útil en la interpretación de resultados.

Tabla 4

Verificación de la capacidad de almacenamiento y tiempos de vaciado

Alternativa	Área (m ²)	Volumen almacenado (m ³)	V ₃₀ (m ³)	Cumple almacenamiento	t_vac (h)	Cumple vaciado
PCP (concreto permeable)	350	52.5	43.75	Sí	36	Sí
PICP (adoquín permeable intertrabado)	350	49.0	43.75	Sí	40	Sí
PA (asfalto poroso)	210	31.5	26.25	Sí	28	Sí

Nota: V₃₀ = volumen efectivo del evento de diseño de 30 minutos; t_vac = tiempo de vaciado.

Fuente: elaboración propia con base en parámetros geomorfológicos y superficies procesadas en ArcGIS Pro.

La interpretación de estos tiempos de vaciado debe considerar que la colmatación reduce gradualmente la conectividad de vacíos y altera la distribución interna del flujo, por lo que el cumplimiento inicial no sustituye el monitoreo durante operación (Lu et al., 2024).

Caudal pico y verificación hidrológica independiente

El caudal pico se estimó mediante el método racional y se contrastó con un hidrograma triangular equivalente del evento de 30 minutos. La Tabla 5 muestra que las diferencias entre ambos procedimientos fueron menores a $\pm 20\%$, criterio adoptado como umbral de coherencia hidrológica. Para el tramo T-1, el caudal racional fue de $0.0456 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal triangular de $0.0486 \text{ m}^3/\text{s}$, con una diferencia de -6.3% . Para el tramo T-2, los valores fueron $0.0280 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.0292 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, con una diferencia de -3.9% . En ambos casos, la coherencia metodológica fue satisfactoria.

Estos resultados respaldan la consistencia interna del procedimiento hidrológico utilizado y justifican el empleo de los valores obtenidos para dimensionar la capacidad de almacenamiento de las alternativas. La comparación entre método racional e hidrograma simplificado es pertinente en microcuencas urbanas pequeñas, donde el tiempo de concentración es reducido y los cambios en intensidad de lluvia, coeficiente de escorrentía y área tributaria pueden modificar de forma sensible el caudal estimado.

La necesidad de evaluar los pavimentos permeables bajo diferentes condiciones de lluvia ha sido resaltada en estudios recientes. Huang et al. (2025) observaron que el mecanismo dominante puede cambiar entre escorrentía por exceso de infiltración y escorrentía por saturación del reservorio, dependiendo de la intensidad y duración del evento. Asimismo, Zhu et al. (2021) propusieron un marco de decisión con AHP difuso para evaluar escenarios de pavimentos permeables considerando criterios hidrológicos, hidráulicos, de calidad del agua y económicos, lo que refuerza la conveniencia de integrar más de una métrica en la selección de alternativas.

Tabla 5

Verificación hidrológica independiente para evento de 30 minutos

Tramo	C	I (mm/h)	A (km ²)	Qp racional (m ³ /s)	V ₃₀ (m ³)	Qp triangular (m ³ /s)	Δ (%)	Coherencia $\pm 20\%$
T-1	0.75	95	0.0023	0.0456	43.75	0.0486	-6.3	Sí
T-2	0.70	90	0.0016	0.0280	26.25	0.0292	-3.9	Sí

Fuente: elaboración propia con base en parámetros hidráulicos, superficies tributarias y curvas intensidad–duración–frecuencia.

Nota. C = coeficiente de escorrentía; I = intensidad de lluvia; A = área tributaria; Qp = caudal pico; V₃₀ = volumen del evento de diseño de 30 minutos; Δ = diferencia relativa entre caudal racional y caudal triangular.

Validación histórica con mapa de riesgo de inundación

La Figura 3 permitió contrastar los tramos seleccionados con zonas de riesgo por inundación identificadas mediante registros históricos y análisis espacial. El tramo T-1, ubicado en calle Corregidora, se localizó en una zona de riesgo alto, consistente con anegamientos recurrentes registrados durante eventos de lluvia intensa.

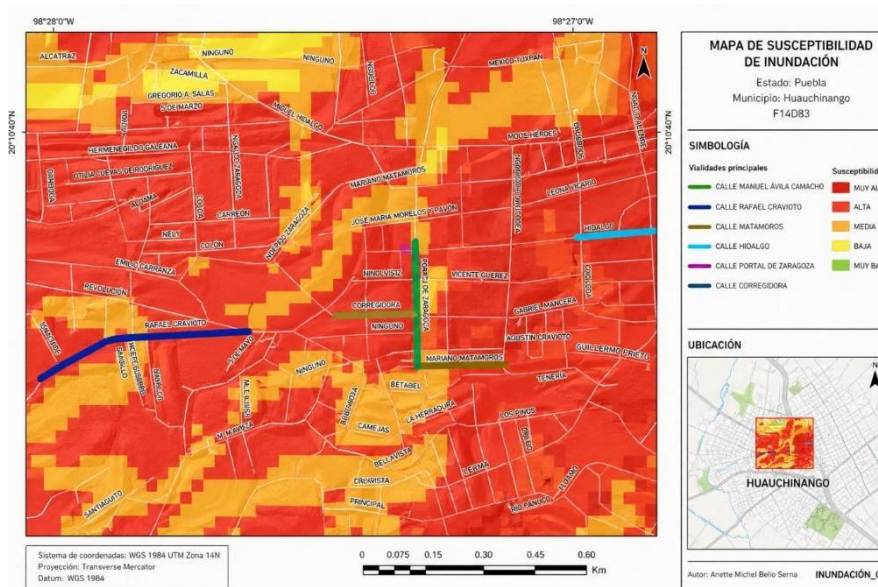
El tramo T-2, ubicado en calle Portal de Zaragoza, coincidió con una zona de riesgo medio-alto, asociada con afectaciones a la movilidad durante temporada de lluvias.

Esta correspondencia espacial confirma que los tramos piloto no fueron seleccionados de manera arbitraria, sino que representan puntos sensibles dentro de la red vial urbana. En consecuencia, la

priorización de pavimentos permeables en estos sitios tiene justificación técnica, ya que permite intervenir zonas donde la reducción de escorrentía superficial puede traducirse en beneficios directos para movilidad, seguridad vial y continuidad de actividades urbanas.

Figura 3

Mapa de riesgo por inundación en microcuencas urbanas de Huauchinango, Puebla



Fuente: elaboración propia con procesamiento en ArcGIS Pro a partir de registros históricos de anegamiento y cartografía urbana municipal.

El mapa muestra la superposición entre zonas de riesgo por inundación y los tramos piloto T-1 y T-2. La figura permite verificar la pertinencia espacial de los sitios seleccionados para evaluar pavimentos permeables.

Análisis multicriterio AHP

La Tabla 6 presenta los resultados del análisis multicriterio. El PCP obtuvo el mayor puntaje global, con 0.379, seguido del PICP con 0.362 y del PA con 0.259. La diferencia entre PCP y PICP fue relativamente estrecha, lo que indica que ambas alternativas presentan viabilidad técnica; sin embargo, el PCP obtuvo mejor equilibrio entre desempeño hidráulico y capacidad estructural. El PA obtuvo una puntuación menor debido a su menor desempeño hidráulico relativo, aunque mostró ventaja en operación y mantenimiento.

El índice de consistencia fue de 0.04 y la razón de consistencia de 0.045, por debajo del umbral de aceptación de 0.10, por lo que los juicios de comparación pareada se consideran consistentes. Esta validación es relevante porque permite sostener que la jerarquización no responde a una selección subjetiva aislada, sino a una comparación estructurada entre criterios.

El resultado coincide con Zhu et al. (2021), quienes encontraron que los pavimentos permeables en vías de carga ligera pueden ser más costo-efectivos y ofrecer ventajas hidrológicas relevantes cuando se evalúan mediante marcos multicriterio. Además, Lekuona-Orkaizagirre et al. (2025) reportaron que sistemas combinados de pavimento permeable y almacenamiento pluvial pueden mejorar el manejo

de escorrentía urbana y reducir sólidos suspendidos y turbidez, lo que refuerza la pertinencia de considerar los pavimentos permeables como componentes de infraestructura urbana resiliente.

Tabla 6

Resultados del AHP: pesos, puntuación y ranking

Alternativa	H	E	O&M	F	Puntaje AHP	Ranking
PCP (concreto permeable)	0.450	0.350	0.150	0.300	0.379	1
PICP (adoquín permeable intertrabado)	0.400	0.300	0.100	0.400	0.362	2
PA (asfalto poroso)	0.150	0.350	0.750	0.300	0.259	3

Nota: H = desempeño hidráulico; E = capacidad estructural; O&M = operación y mantenimiento; F = factibilidad; AHP = Proceso Analítico Jerárquico. Índice de consistencia = 0.04; razón de consistencia = 0.045.

Fuente: elaboración propia con base en análisis multicriterio en gabinete.

En conjunto, los resultados respaldan la selección del PCP como alternativa prioritaria para calles de bajo tráfico en Huauchinango. Su ventaja no depende de un único indicador, sino de la convergencia entre almacenamiento suficiente, vaciado dentro del umbral admisible, coherencia hidrológica, cumplimiento estructural y mejor puntuación multicriterio. Por ello, el PCP constituye la opción más sólida para una intervención piloto orientada a reducir escorrentía superficial y fortalecer la adaptación climática urbana.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que los pavimentos permeables son técnicamente viables para calles de bajo tráfico en Huauchinango, siempre que la selección de la alternativa considere de manera integrada el desempeño hidráulico, la capacidad estructural, la operación, el mantenimiento y la factibilidad local.

La comparación entre concreto permeable (Permeable Concrete Pavement, PCP), adoquín permeable intertrabado (Permeable Interlocking Concrete Pavement, PICP) y asfalto poroso (Porous Asphalt, PA) mostró que las tres configuraciones cumplen criterios básicos de almacenamiento y vaciado; sin embargo, el PCP presentó el mejor equilibrio global al obtener el mayor puntaje en el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP). Este resultado es congruente con la literatura reciente, que señala que los pavimentos permeables pueden reducir escorrentía y caudales pico siempre que conserven suficiente capacidad de infiltración, almacenamiento y mantenimiento funcional durante su vida útil (Huang et al., 2025; Pantoja Cárdenas & Zambrano Nájera, 2024; Sousa et al., 2024).

La verificación estructural indicó que las tres alternativas son admisibles para condiciones de bajo tráfico; no obstante, la selección del PCP se justifica por su balance entre capacidad resistente, almacenamiento hidráulico y factibilidad de implementación. Este punto es relevante porque los pavimentos permeables no deben valorarse únicamente por su capacidad de infiltración inicial, sino por su desempeño combinado ante cargas vehiculares, colmatación, mantenimiento y condiciones reales de servicio.

Tota-Maharaj et al. (2025) demostraron que la capacidad portante y el comportamiento frente a colmatación dependen de la interacción entre material superficial, base y subbase; de forma similar, Wang et al. (2023) subrayan que el concreto permeable exige equilibrar conectividad de poros,

resistencia mecánica y resistencia a la obstrucción. Por ello, en el caso de Huauchinango, el PCP no se propone como solución universal, sino como alternativa prioritaria para tramos donde el tránsito bajo y las pendientes controladas permiten aprovechar su desempeño hidráulico sin comprometer la estabilidad estructural.

Los resultados de almacenamiento y tiempo de vaciado muestran que las tres configuraciones cumplen con el criterio hidráulico establecido para el evento de diseño. No obstante, el cumplimiento del volumen requerido no basta para garantizar un desempeño sostenido, ya que la eficiencia hidráulica puede variar con la intensidad de lluvia, la duración del evento, el nivel de saturación del reservorio y la posible ocurrencia de eventos consecutivos.

Huang et al. (2025) documentaron que los mecanismos de generación de escorrentía en pavimentos permeables pueden cambiar entre eventos de alta intensidad y corta duración y eventos de menor intensidad, pero mayor duración. Este hallazgo es importante para Huauchinango, donde las lluvias intensas pueden producir respuestas rápidas en microcuencas urbanas con pendientes pronunciadas. En consecuencia, el diseño debe considerar no solo el volumen almacenado, sino también el tiempo de recuperación del sistema entre tormentas.

La verificación hidrológica independiente, basada en la comparación entre el método racional y un hidrograma triangular equivalente, fortaleció la consistencia del análisis. Las diferencias menores a $\pm 20\%$ entre ambos procedimientos indican que los caudales estimados son técnicamente razonables para microcuencas urbanas pequeñas, donde el tiempo de concentración es reducido y las variaciones en el coeficiente de escorrentía, el área tributaria o la intensidad de lluvia pueden modificar de forma sensible el resultado. Además, evita que la selección de alternativas dependa de un único procedimiento de cálculo y aporta mayor solidez al dimensionamiento hidráulico.

En este sentido, Zhu et al. (2021) señalan que la evaluación de pavimentos permeables para manejo pluvial urbano debe integrar múltiples criterios y fuentes de incertidumbre, en lugar de basarse exclusivamente en una métrica hidráulica aislada.

La validación espacial con el mapa de riesgo por inundación permitió confirmar que los tramos seleccionados corresponden a zonas urbanas sensibles. La coincidencia entre los tramos T-1 y T-2 con áreas de riesgo alto y medio-alto refuerza la pertinencia de implementar soluciones de control in situ, ya que las intervenciones se ubicarían donde la reducción de escorrentía puede traducirse en beneficios directos para la movilidad, la seguridad vial y la continuidad de actividades urbanas.

Este tipo de validación territorial es congruente con estudios aplicados en contextos urbanos mexicanos, donde los sistemas de retención-detención han demostrado capacidad para reducir escorrentía y mejorar la gestión pluvial a escala local, especialmente en zonas con crecimiento urbano reciente y limitaciones en infraestructura hidráulica (Hipólito-Jiménez et al., 2024). Asimismo, coincide con investigaciones recientes sobre drenaje urbano sostenible e infraestructura verde, las cuales destacan que estas soluciones alcanzan mayor eficacia cuando se integran al análisis territorial y funcional del sistema urbano, en lugar de implementarse como intervenciones aisladas (Ali et al., 2025; Sánchez Almodóvar et al., 2022).

La evidencia reciente sobre infraestructura verde confirma que la priorización territorial de intervenciones debe considerar exposición a inundación, disponibilidad espacial y condiciones locales de resiliencia urbana, ya que estos factores permiten seleccionar sitios con mayor beneficio hidrológico y social (Khodadad et al., 2025; Kim & Kim, 2025; Ali et al., 2025).

El análisis multicriterio confirmó la ventaja del PCP sobre el PICIP y el PA, aunque la diferencia con el PICIP fue relativamente estrecha. Esto indica que el PICIP también constituye una alternativa técnicamente viable, especialmente en contextos donde la operación, el mantenimiento o la sustitución modular sean prioritarios. Sin embargo, el PCP obtuvo una mejor combinación de desempeño hidráulico y capacidad estructural, lo que explica su posición como alternativa preferente.

El uso del AHP resultó adecuado porque permitió integrar criterios heterogéneos y controlar la consistencia de los juicios mediante una razón de consistencia menor a 0.10. Esta forma de análisis es congruente con enfoques recientes de evaluación de infraestructura urbana, donde la decisión técnica requiere combinar datos hidráulicos, estructurales y operativos bajo un esquema transparente de ponderación (Zhu et al., 2021).

Un punto crítico para la implementación futura es la colmatación. Aunque los resultados del modelo indican cumplimiento de almacenamiento y vaciado, el desempeño real puede reducirse si no se establecen programas de mantenimiento basados en mediciones periódicas de infiltración. Sousa et al. (2024) señalan que la acumulación de sedimentos es uno de los principales factores de pérdida funcional en pavimentos asfálticos permeables, mientras que Simpson et al. (2021) muestran que la evaluación in situ de técnicas de mantenimiento es indispensable para recuperar la función hidráulica de pavimentos permeables colmatados.

Estudios recientes sobre concreto permeable y asfalto poroso muestran que la obstrucción puede ser física, química o biológica, y que la recuperación hidráulica depende tanto del tipo de sedimento como del método de limpieza aplicado (Kang et al., 2025; Ding et al., 2025; Goya-Heredia et al., 2025). Por ello, la recomendación de implementar protocolos de mantenimiento adaptativo no debe considerarse un complemento menor, sino una condición necesaria para preservar la viabilidad técnica del sistema.

La discusión también debe considerar los beneficios ambientales y urbanos complementarios. Además de reducir la escorrentía, los pavimentos permeables pueden contribuir a mejorar la calidad del agua, disminuir sólidos suspendidos y apoyar estrategias de adaptación climática. La evidencia reciente indica que estos sistemas pueden retener metales pesados, micro plásticos y otros contaminantes asociados al tránsito, lo cual amplía su valor como infraestructura de control de escurrimientos urbanos más allá de la reducción de caudales (Sun et al., 2024; Holzer et al., 2024; Kong et al., 2025).

Esta interpretación se refuerza con Essien et al. (2025), quienes documentaron que los sistemas porosos de manejo pluvial pueden retener micro plásticos y nano plásticos mediante mecanismos de sedimentación, filtración, atrapamiento, acumulación e interacciones superficiales.

Lekuona-Orkaizagirre et al. (2025) reportaron que un sistema combinado de pavimento permeable y tanque de tormenta puede mejorar la calidad del escurrimiento urbano, mientras que Dalla Mora et al. (2025) documentaron beneficios potenciales de pavimentos porosos y permeables en la mitigación de isla de calor urbana. En el caso de Huauchinango, estos beneficios no fueron cuantificados directamente, pero justifican que la implementación piloto incluya monitoreo hidráulico, térmico y de calidad del agua en fases posteriores.

Esta línea de monitoreo es pertinente porque estudios recientes han confirmado que el concreto permeable puede actuar como medio de tratamiento del escurrimiento urbano, reduciendo sólidos suspendidos, turbidez, demanda química de oxígeno y otros indicadores de contaminación, aunque su eficiencia depende de la mezcla, la porosidad, el contenido de agregados reciclados y el riesgo de colmatación (Azad et al., 2024; Gunathilake et al., 2025).

En términos de sostenibilidad, la selección del PCP como alternativa prioritaria debe interpretarse dentro de una visión de ciclo de vida. Tavasszy et al. (2024) señalan que la evaluación de pavimentos permeables requiere incorporar mantenimiento, durabilidad y efectos ambientales, ya que una solución hidráulicamente eficiente puede perder ventaja si su vida útil o sus costos de operación no son considerados.

En la misma línea, Martins Vaz et al. (2024) destacan que los análisis de evaluación de ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA) y costo del ciclo de vida (Life Cycle Cost Assessment, LCCA) en pavimentos permeables todavía presentan diferencias metodológicas importantes, por lo que los proyectos locales deben definir claramente límites, indicadores y horizonte de evaluación. Esto refuerza la necesidad de que la fase piloto en Huauchinango no se limite a la construcción, sino que incluya seguimiento operativo, mantenimiento programado y evaluación periódica.

Finalmente, los resultados permiten aceptar la hipótesis de que una configuración adecuada de pavimento permeable puede reducir la escorrentía superficial en al menos 25 % frente a soluciones impermeables convencionales en calles de bajo tráfico. Sin embargo, esta aceptación debe entenderse dentro del alcance del estudio: modelación hidrológica, verificación estructural y análisis multicriterio, no como prueba definitiva de desempeño a largo plazo en campo. Por ello, la contribución principal del artículo es metodológica y aplicada: ofrece una ruta técnica para seleccionar, priorizar y justificar pavimentos permeables en un contexto municipal específico, con base en criterios verificables y reproducibles.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que los pavimentos permeables son técnicamente viables para calles de bajo tráfico en Huauchinango, Puebla, siempre que su selección integre desempeño hidráulico, capacidad estructural, operación, mantenimiento y factibilidad local.

La comparación entre concreto permeable (PCP), adoquín permeable intertrabado (PICP) y asfalto poroso (PA) mostró que las tres alternativas cumplen los criterios mínimos de almacenamiento y vaciado; sin embargo, el PCP presentó el mejor balance integral en el análisis multicriterio.

La hipótesis de investigación se aceptó dentro del alcance metodológico del estudio. La configuración seleccionada permitió estimar una reducción de escorrentía superficial igual o superior al 25 % respecto a una solución impermeable convencional, además de cumplir con los criterios de almacenamiento, tiempo de vaciado y coherencia hidrológica definidos para el evento de diseño. No obstante, este resultado corresponde a una evaluación técnico-modelada y requiere validación mediante monitoreo de campo en el tramo piloto.

El PCP fue identificado como la alternativa prioritaria porque combinó almacenamiento suficiente, capacidad estructural admisible para tránsito bajo, factibilidad constructiva y mejor puntuación en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Esta selección no descarta la viabilidad del PICP ni del PA; indica que, para los tramos evaluados, el PCP ofreció la relación más equilibrada entre desempeño hidráulico y resistencia.

La validación espacial con zonas de riesgo por inundación confirmó la pertinencia territorial de los tramos seleccionados.

Al coincidir con puntos sensibles de la red vial urbana, la intervención propuesta no debe entenderse como una solución aislada, sino como una medida de control en sitio capaz de reducir anegamientos, mejorar la continuidad de la movilidad local y fortalecer la adaptación urbana frente a lluvias intensas.

La principal limitación del estudio fue la ausencia de mediciones posteriores a la construcción. Los resultados se sustentan en modelación hidrológica, verificación estructural y análisis multicriterio; por ello, la viabilidad identificada debe complementarse con monitoreo de infiltración, tiempo real de vaciado, acumulación de sedimentos, desempeño estructural y calidad del escurrimiento durante al menos un ciclo hidrológico completo.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones técnicas

Implementar una fase piloto en el tramo T-1 con concreto permeable (PCP), por ser la alternativa con mejor desempeño integral. La intervención debe incluir medición inicial de infiltración, registro de lluvia, verificación del tiempo de vaciado y revisión superficial posterior a eventos intensos.

Establecer un programa de mantenimiento basado en umbrales de desempeño hidráulico: estado adecuado cuando la infiltración sea igual o superior al 80 % de la infiltración inicial; estado de alerta entre 50 % y 80 %; y estado crítico por debajo del 50 %. Estos umbrales deberán activar acciones de barrido mecánico, succión, descompactación superficial o rehabilitación localizada, conforme a guías técnicas de mantenimiento de pavimentos permeables (Concrete Masonry & Hardscapes Association, 2020).

Registrar de forma sistemática la tasa de infiltración, el tiempo real de vaciado, la presencia de sedimentos y el estado superficial del pavimento. Este seguimiento permitirá diferenciar entre pérdida funcional por colmatación superficial y deterioro estructural.

Elaborar especificaciones constructivas diferenciadas para PCP, PICP y PA, incluyendo granulometría, espesor de capas, compactación, control de pendiente, protección contra arrastre de finos y criterios de aceptación en obra.

Evitar la implementación en calles con pendientes, cargas vehiculares o aporte de sedimentos superiores a los considerados en este estudio, salvo que se realice un rediseño hidráulico y estructural específico.

Recomendaciones para la gestión pública

Incorporar los pavimentos permeables como infraestructura de drenaje urbano sostenible en los instrumentos municipales de desarrollo urbano, priorizando calles de bajo tráfico, zonas con anegamientos recurrentes y tramos donde la reducción de escorrentía tenga beneficio directo sobre movilidad y seguridad vial.

Desarrollar capacidades técnicas en el personal municipal de obras públicas y mantenimiento urbano para instalación, inspección, limpieza y rehabilitación de pavimentos permeables.

Gestionar recursos estatales y federales asociados con adaptación climática, reducción del riesgo de desastres e infraestructura verde, utilizando los resultados del análisis multicriterio como soporte técnico para justificar la inversión.

Implementar un sistema básico de indicadores de desempeño que incluya reducción de anegamientos, frecuencia de mantenimiento, costos de operación, tasa de infiltración, tiempo de vaciado y reportes ciudadanos de funcionamiento.

Recomendaciones para investigaciones futuras

Evaluar el desempeño hidráulico y estructural del PCP bajo eventos con periodo de retorno (TR) de 25 y 50 años, para determinar la sensibilidad del sistema ante lluvias más severas que el evento de diseño considerado.

Desarrollar mezclas de concreto permeable con agregados regionales, verificando resistencia, permeabilidad, durabilidad, riesgo de colmatación y costo de implementación.

Cuantificar beneficios ambientales complementarios, particularmente remoción de sólidos suspendidos, metales pesados, hidrocarburos y microplásticos presentes en escurrimientos urbanos.

Realizar un análisis de ciclo de vida y costo del ciclo de vida que compare el PCP con soluciones convencionales de pavimentación y drenaje pluvial, incorporando construcción, mantenimiento, rehabilitación, vida útil y beneficios hidrológicos.

Modelar el efecto acumulado de una red de pavimentos permeables conectada con jardines de lluvia, zanjas de infiltración, áreas verdes y sistemas de almacenamiento temporal, para valorar su contribución a escala de microcuenca urbana.

REFERENCIAS

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

Acosta Michel, G. (2016). Factibilidad de una infraestructura hidráulica urbana sustentable de captación y conducción de agua pluvial [Trabajo de fin de grado, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente]. <https://rei.iteso.mx/items/c05117ce-7369-4b4a-95a8-84747962db0d>

Ali, L., Khan, A., Rehman, A. U., Maqsoom, A., Ali, T. H., & Ullah, F. (2025). Green infrastructure and urban flooding: A survey of knowledge gaps, future research directions and conceptual framework. *Water Resources Management*, 39, 1871–1897. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04125-6>

AASHTO. (2019). *Geometric design of very low-volume local roads (ADT ≤ 400)* (2nd ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://store.transportation.org/Common/DownloadContentFiles?id=451>

ASTM International. (2023). ASTM C1701/C1701M-17a (2023): Standard test method for infiltration rate of in-place pervious concrete. https://www.madcad.com/library/ASTM-C1701_C1701M-17a-Reapproved2023/

Azad, A., Sheikh, M. N., & Hai, F. I. (2024). A critical review of the mechanisms, factors, and performance of pervious concrete to remove contaminants from stormwater runoff. *Water Research*, 251, 121101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121101>

CENAPRED. (2022). Impacto socioeconómico 2021: Lluvia severa y afectaciones asociadas (20–24 de agosto de 2021). Centro Nacional de Prevención de Desastres. https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/493-IMPACTO_SOCIOECONOMICO_2021.pdf

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

Concrete Masonry & Hardscapes Association. (2020). Maintenance guide for permeable interlocking concrete pavements (PAV-TEC-023-20). <https://interlock-concrete.com/resources/cmha-tech-notes/PAV-TEC-023-20.pdf>

Dalla Mora, T., Emmi, G., Ruggeri, P., De Bei, M., & Peron, F. (2025). Mitigation urban heat island by using porous and permeable block pavement. *Energy and Buildings*, 346, 116149. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116149>

Ding, Y., Xia, Y., Rao, Y., Xia, Z., Xiao, H., Zhang, L., Kang, C., & Nong, L. (2025). Short-term bioclogging and recovery characteristics of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 475, 141186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141186>

Essien, A. E., Dickson-Anderson, S. E., & Guo, Y. (2025). Microplastics and nanoplastics in stormwater management engineered porous media systems: A systematic review of their sources, transport, retention, and removal characteristics. *Environmental Science: Advances*, 4, 1998–2026. <https://doi.org/10.1039/D5VA00169B>

Federal Highway Administration. (2016). Permeable concrete pavements (FHWA-HIF-16-004). U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16004.pdf>

Federal Highway Administration. (2019). Permeable interlocking concrete pavement (FHWA-HIF-19-021). U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif19021.pdf>

Gobierno del Estado de Puebla. (2025). Plan hidrometeorológico del Estado de Puebla. Coordinación General de Protección Civil Estatal. <https://proteccioncivil.puebla.gob.mx/images/site/planes/PLAN-HIDROMETEOROLOGICO.pdf>

Gunathilake, T. A., Egodawatta, P., & Goonetilleke, A. (2025). Reviving urban landscapes: Harnessing pervious concrete pavements with recycled materials for sustainable stormwater management. *Water*, 17(21), 3096. <https://doi.org/10.3390/w17213096>

Hipólito-Jiménez, U., Navarro-Gómez, H. I., Cerón-Carballo, J. E., Contreras López, C., Flores-Badillo, J., & Lozano-Hernández, J. A. (2024). Gestión del agua pluvial mediante sistemas de retención-detención para la zona de Tulancingo Hidalgo. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(Especial 3), 181–190. <https://doi.org/10.29057/tch.v12iEspecial3.13441>

Huang, P., Zhang, K., & Chui, T. F. M. (2025). Hydrologic performance of permeable pavements under extreme and regular rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, 652, 132653. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132653>

ICPI (Interlocking Concrete Pavement Institute). (2011). Permeable interlocking concrete pavement—Design, specification and construction guide. Interlocking Concrete Pavement Institute. <https://www.icpi.org>

IMTA/CONAGUA. (2021). Curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF). Comisión Nacional del Agua. https://vortice.conagua.gob.mx/storage/files.conagua/upload/28052021_1622222423.pdf

INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020: Principales resultados por localidad (ITER), Huauchinango, Puebla. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/698176/21_071_PUE_Huauchinango.pdf

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf

Khodadad, M., Kim, H., Lee, S., & Choi, Y. (2025). Green infrastructure site prioritization to improve urban flood resilience in Monterrey and Brussels using a decision support model. *Scientific Reports*, 15, 12989. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94851-z>

Kim, J.-P., & Kim, J.-O. (2025). Green infrastructure for urban flooding: Knowledge domains and research evolution (2015–2024). *Land*, 14(5), 921. <https://doi.org/10.3390/land14050921>

Lekuona-Orkaizagirre, A., Meaurio, M., Madrazo-Uribeetxebarria, E., Garmendia Antín, M., & Gredilla, A. (2025). Field-based assessment of the influence of a combined SUDS system consisting of a permeable pavement and a stormwater tank on urban runoff quality. *Journal of Hydrology*, 662, 133906. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133906>

Li, B., Sun, M., Zhu, X., Cao, K., & Kong, Y. (2023). Investigation of permeability persistence of porous asphalt concrete under coupled conditions of clogging and cleaning. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 149(3), 05023001. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1252>

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

Li, H., Zhu, Y., & Zhang, X. (2022). Clogging mechanisms and mitigation strategies for permeable pavements: A review. *Journal of Environmental Management*, 317, 115394. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115394>

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>

Martins Vaz, I. C., Matos Silva, C., Neves, L. C., & Gomes, M. G. (2024). Life cycle assessment of pervious pavements: Integrative review. *Water*, 16(10), 1403. <https://doi.org/10.3390/w16101403>

Merten, F. R. M., Dutra, V. F. P., Strieder, H. L., & Graeff, Â. G. (2022). Clogging and maintenance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 342, 127939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127939>

Pantoja Cárdenas, J. S., & Zambrano Nájera, J. (2024). Assessment of Permeable Pavements as a Technique to Mitigate Surface Runoff Peaks. *Tecnológicas*, 27(61), e3165. <https://doi.org/10.22430/22565337.3165>

Pérez-Hernández, J. R., Areu-Rangel, O. S., & Lizárraga-Mendiola, L. (2025). Estrategias de mitigación de inundaciones. *Pädi*, 12(24), 207–218. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i24.12769>

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759>

Sánchez Almodóvar, E., Martí Talavera, J., & Olcina Cantos, J. (2022). Buenas prácticas en el manejo y gestión del agua pluvial. Casos de estudio en la comarca del Bajo Segura. *Cuadernos Geográficos*, 61(1), 229-250. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i1.21086>

Simpson, I. M., Winston, R. J., Tirpak, R. A., Dorsey, J. D., & Hunt, W. F. (2021). Assessing maintenance techniques and in-situ pavement surface infiltration testing for permeable interlocking concrete pavements. *Journal of Environmental Management*, 288, 112484. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112484>

Solórzano-Villegas, C. A., & Quiroz-Fernández, L. S. (2021). Estrategia de la gestión de cuencas hidrográficas para la mitigación de inundaciones en la ciudad de Chone, Provincia de Manabí. *Polo del Conocimiento*, 6(3), 637-658. <https://www.polodelconocimiento.com/>

Sousa, M., Dinis Almeida, M., Fael, C., & Bentes, I. (2024). Permeable asphalt pavements (PAP): Benefits, clogging and maintenance – a review. *Materials*, 17(24), 6063. <https://doi.org/10.3390/ma17246063>

Tavasszy, S., Maier, S., & van der Meer, J. (2024). Life cycle assessment of permeable pavements: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 441, 144217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144217>

Tota-Maharaj, K., Madushani, S. S., Monrose, J., & Rathnayake, U. (2025). Diagnosis of Low-Carbon Permeable Pavements: Bearing Capacity and Long-Term Clogging Behaviour. *International Journal of Pavement Research Technology* (2025). <https://doi.org/10.1007/s42947-025-00523-6>

UNDRR. (2015). Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf

Wang, H., Li, F., & Zhao, X. (2023). Multi-criteria evaluation of green infrastructure for urban flood mitigation. *Sustainable Cities and Society*, 90, 104341. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104341>

Zhu, Y., Li, H., Yang, B., Zhang, X., Mahmud, S., Zhang, X., Yu, B., & Zhu, Y. (2021). Permeable pavement design framework for urban stormwater management considering multiple criteria and uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126114. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126114>

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