

Recibido: 10 julio 2024
Aceptado: 05 noviembre 2024
Disponible: 23 diciembre 2024

©Instituto Tecnológico Metropolitano
Este trabajo está licenciado bajo
una Licencia Internacional
Creative Commons Atribución
(CC BY-NC-SA)



Evaluación de pavimentos permeables como técnica para mitigar picos de escorrentía superficial

Assessment of Permeable Pavements as a Technique to Mitigate Surface Runoff Peaks

  Jhoan Sebastián Pantoja Cárdenas¹;
 Jeannette Zambrano Nájera²

¹Universidad Nacional de Colombia
Manizales-Colombia
jspantojac@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia
Manizales-Colombia
jdzambanona@unal.edu.co

Cómo citar / How to cite

J. S. Pantoja Cárdenas, and J. Zambrano Nájera, “Evaluación de pavimentos permeables como técnica para mitigar picos de escorrentía superficial,” *Tecnológicas*, vol. 27, no. 61, e3165, 2024.
<https://doi.org/10.22430/22565337.3165>

Resumen

Las inundaciones pluviales causan emergencias y desastres en las ciudades a nivel mundial. Dichas inundaciones se producen principalmente por la impermeabilización de las cuencas. El problema se agrava en ciudades como Manizales, con altas y medias pendientes, ya que se presentan altas velocidades de flujo y por tanto incrementos de los volúmenes de escorrentía, lo que a su vez está asociado con altos caudales punta. Para mitigar dichos efectos negativos han surgido los pavimentos permeables (PP) como infraestructura alternativa. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad de los PP para mitigar las intensidades de escorrentía superficial en cuencas con medias y altas pendientes. La metodología empleada consistió en realizar una modelación hidrodinámica con SWMM en la cuenca experimental Palogrande San Luis, cuenca que presenta las características mencionadas y está ubicada en la ciudad de Manizales, Colombia. Se utilizaron PP para vías vehiculares de tráfico liviano en asfalto permeable, parqueaderos en concreto permeable y áreas comunes en adoquines de concreto permeable. Los PP propuestos para parqueaderos y áreas comunes presentaron reducciones de escorrentía solo entre el 0 % y el 20 %. Se concluye que los PP propuestos en vías vehiculares reducen más la escorrentía superficial que aquellos propuestos en áreas comunes y en parqueaderos debido al área impermeable aportante que le corresponde a cada uno.

Palabras clave

Altas pendientes, ciudades empinadas, inundaciones pluviales, pavimentos permeables, sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Abstract

Stormwater flooding causes emergencies and disasters in cities worldwide. These floods are mainly caused by the impermeabilization of the watersheds. The problem worsens in cities like Manizales, with medium to high slopes, as high flow velocities occur, leading to increased runoff volumes, which in turn are associated with high peak flows. To mitigate these negative effects, Permeable Pavements (PP) have emerged as an alternative infrastructure solution. Considering this, the objective of this research was to assess the impact of PP in mitigating surface runoff peaks in watersheds with medium to high slopes. The methodology used involved hydrodynamic modeling with SWMM in the Palogrande San Luis experimental watershed, which exhibits the mentioned characteristics and is located in the city of Manizales, Colombia. PP was used for light-traffic vehicle roads in permeable asphalt, parking lots in permeable concrete, and common areas with permeable concrete pavers. The proposed PP for parking lots and common areas showed runoff reductions of only between 0 % and 20 %. Finally, it was concluded that the proposed PP for vehicular roads reduces surface runoff more than those proposed for common areas and parking lots, due to the impermeable contributing area associated with each one.

Keywords

High slopes, steep cities, stormwater floods, permeable pavements, sustainable urban drainage systems.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones pluviales son un problema derivado de los procesos de urbanización, constituyéndose como uno de los fenómenos más problemáticos de las ciudades [1], [2]. En el 2019 el 95 % de los desastres fueron atribuidos a fenómenos de origen hidrometeorológico, y de estos, las inundaciones (tanto pluviales como fluviales) afectaron más personas que cualquier otro tipo de fenómeno natural en el siglo XXI en el mundo [3]. En Colombia la situación es similar a lo expuesto anteriormente, en el 2015 se tenía que el 19 % de la población colombiana había sido afectada por inundaciones, siendo una de las principales causas de desastres con daños económicos cercanos al 2 % del Producto Interno Bruto [4]. En Manizales se han registrado inundaciones pluviales desde 1953, las que adicionalmente vienen creciendo a través del tiempo [5]. Estas inundaciones tanto pluviales como fluviales, están altamente correlacionadas con el ordenamiento territorial y la urbanización en las ciudades. Las cuencas urbanas vienen presentando un incremento considerable de las superficies impermeables, al cambiar las coberturas naturales por coberturas impermeables en vías, parqueaderos, andenes, techos de viviendas, etc. Estos procesos de impermeabilización causan a su vez, entre muchos otros problemas, cambios en la hidrología de dichas cuencas [6], [7]. Los cambios más notorios son una disminución considerable de los procesos de interceptación y evapotranspiración, y de la infiltración, ocasionando esto un incremento de la escorrentía superficial [8]-[12].

Para atender los problemas anteriores se han propuesto diversas soluciones entre las que se destacan los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los que tienen como objetivo mitigar los efectos adversos de la escorrentía superficial de aguas lluvias integrando diversas soluciones basadas en el ciclo hidrológico, de manera que dichas soluciones imiten un proceso específico del ciclo hidrológico [13]. Algunos de los principios que se reconocen a los SUDS son: reducir la demanda de agua potable, minimizar la generación de aguas residuales, tratar el agua de escorrentía pluvial y utilizarlas para maximizar los servicios ecosistémicos visuales y recreativos [14]. Unas de las técnicas SUDS ampliamente utilizadas son los PP, que se constituyen como una herramienta estratégica ya que se considera que aproximadamente los pavimentos representan el 25 % de las áreas impermeables en las zonas urbanas [15]. De manera que, 2/3 partes de la precipitación que cae en áreas impermeables en cuencas urbanas tendrá que ser manejada por los pavimentos, por lo que es lógico que estos generen gran parte de los volúmenes de escorrentía de las cuencas urbanas y adicionalmente, estos flujos se encuentran usualmente contaminados por metales pesados e hidrocarburos [16], [17]. Los PP tienen como objetivo mitigar los efectos adversos generados por la escorrentía superficial urbana [14], [18]-[20] haciendo un uso efectivo del suelo al permitir la infiltración. También permiten y facilitan el almacenamiento y reutilización de las aguas pluviales para fines no potables [21], [22], beneficios que reducen considerablemente los caudales de evacuación hacia la red de drenaje y por ende los problemas generados por inundaciones pluviales. Actualmente, existe una oferta bastante amplia para ser aplicados en sitios residenciales, comerciales e industriales. Aplicaciones más comunes incluyen parqueaderos, vías de bajo volumen de tráfico, andenes o vías peatonales, vías residenciales, áreas comerciales y vías para bicicletas. Para vías de alto tráfico, cargas pesadas o con altas cargas contaminantes, no se consideran soluciones apropiadas debido a que se pueden producir fallas estructurales y reducción del desempeño en cuanto a infiltración.

Los PP pueden ser diseñados para permitir infiltración total hacia el subsuelo, parcial o sin infiltración teniendo en cuenta las características de cada zona [14], [23]. La capa de rodadura también influye en el diseño y se reconocen PP en adoquines que pueden ser en Pavimento de hormigón entrelazado permeable (PICP, por sus siglas en inglés) [24], o en plástico con

Pavimentos de Hormigón con Rejilla (CGP, por sus siglas en inglés) Pavimento de Hormigón Poroso (PCP, por sus siglas en inglés), en asfalto permeable o poroso (PA, por sus siglas en inglés) y en concreto permeable (PC, por sus siglas en inglés) [19]. Los PICP son diseñados de manera que contengan espacios libres entre los bloques para permitir la infiltración del agua en la estructura de este, dichos espacios se rellenan con el agregado que se utiliza para la capa de soporte, y no con arena, lo que promueve la infiltración de manera rápida [25]. Los CGP y PGP son similares a los PICP, pero con diferencias en área de la superficie del pavimento permeable. Los bloques utilizados en estos generalmente son mucho más grandes que los utilizados en los PICP y tienen mayores espacios vacíos (20-50 % para los CGP y entre 90-98 % para PGP) [25]. De manera que, en estos se tienen grandes huecos en los que la infiltración se puede producir mucho mejor. Esos espacios se rellenan con grava o se plantan con pastos. Por su parte, los PA son similares a los pavimentos tradicionales en cuanto a la mezcla, pero el agregado se elimina. El espesor de la capa superficial tradicionalmente estará entre 75-180 mm dependiendo del tráfico. Estos PP han sido muy utilizados de manera exitosa en países como Estados Unidos desde 1970. Los PC consisten en una mezcla especialmente diseñada de cemento Portland, agregados uniformemente gradados y agua. Los finos se eliminan de los PP lo que incrementa su capacidad de infiltración. Estas estructuras permeables han sido ampliamente utilizadas y se les reconocen ventajas como reducción del ruido, de salpicadura y el incremento de la resistencia al deslizamiento [25].

Los PP se han utilizado en numerosos programas experimentales como en áreas peatonales y vías de bajo tráfico [26]-[31], siendo reconocidas su ayuda hidrológica en torno a la atenuación de escorrentía (la que se ha documentado entre el 50-90 %), la capacidad de infiltración y la reducción de picos [32], [33]. Inclusive, se apunta a que con estos se pueden obtener las condiciones de pre-urbanización [34] y que estos son más eficaces en las tormentas pequeñas y frecuentes, y en retener el primer flujo en las lluvias más intensas [35], [36]. Varios autores indican que la distribución de diámetros es uno de los rasgos más determinantes de la conductividad hidráulica ya que define la capacidad de infiltración y de tratamiento de contaminantes [26], [32], [34], [37]. Algunos autores establecen que el resto de las variables de los PP pueden ser determinadas a través de la simulación hidrológica e hidráulica [38]. A los PP se les reconoce mejores resultados en lo referente a la mitigación de inundaciones urbanas que las técnicas de cosecha de agua. A pesar de lo anterior, muchos países han dejado de implementarlos debido a que faltan más investigación sobre su longevidad, sustentabilidad y aspectos económicos [27], específicamente, preocupa su impacto sobre las aguas subterráneas.

A pesar de las muchas implementaciones existentes, la mayoría se ha concentrado en evaluar la técnica en sí, con poca información cuantitativa sobre sus impactos a nivel de cuenca. Actualmente en Colombia la información y el procedimiento de diseño de PP es ambiguo y escaso. Por tanto, se hace necesario continuar con investigaciones que conduzcan a la implementación de guías de diseño de PP específicas para el país, incluyendo todo tipo de topografías en las que permitan considerar los PP como una medida fácil de diseñar e implementar.

Este artículo tuvo como objetivo evaluar la capacidad de los PP para mitigar los caudales pico generados por las precipitaciones intensas y cortas propias de las cuencas de montaña.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

El estudio se desarrolló en la cuenca Palogrande San Luis Ruta 30, la cual está ubicada en la ciudad de Manizales (ver Figura 1) sobre la cordillera central de los Andes, siendo afluente del río Chinchiná con un área total de aproximadamente 2.5 km² [39]. La cuenca tiene un uso predominantemente urbano donde el 69 % corresponde a uso residencial y el restante a bosques. La topografía es quebrada con pendientes medias entre el 8 % y el 42 % y pendientes bajas entre el 0.5 % y el 8 % en la zona alta. La precipitación promedio anual es de 1904 mm, la máxima anual es de 2721 mm y la mínima anual de 1378 mm [39]. Las condiciones climáticas de la cuenca se pueden establecer a partir de la instrumentación instalada en la misma que consta de dos estaciones meteorológicas y una hidrometeorológica, telemétricas y automáticas que registran sus variables cada 5 minutos. El área de estudio corresponde a la porción de la cuenca que está instrumentada, con un área de aproximadamente 1 km².

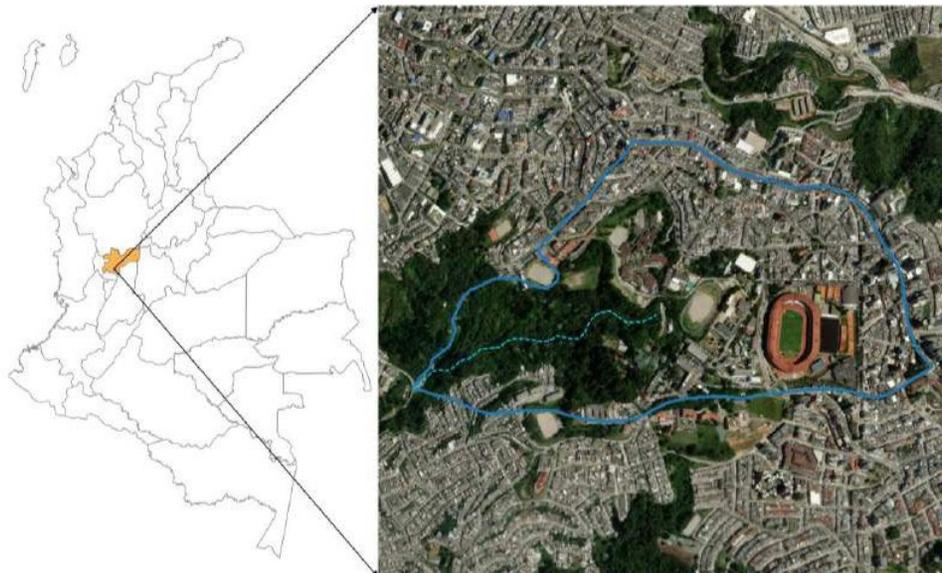


Figura 1. Localización de la cuenca Palogrande San Luis Ruta 30. Fuente: elaboración propia.

La cuenca fue modelada mediante SWMM, siendo este un modelo de concepción simple, en donde la cuenca es dividida en diferentes subcuencas con sus respectivos parámetros y la escorrentía de cada subcuenca es transitada por la red de alcantarillado; siendo este, el mayor exponente del tipo de modelos por subcuencas. Esta cuenca ha sido ampliamente estudiada por medio de diferentes trabajos, es así como el mapa de coberturas y usos del suelo fue obtenida de manera expresa mediante la realización de un sobrevuelo por medio del cual se obtuvo una fotografía aérea de alta resolución en el 2014 [40]. Posteriormente, en el año 2022 la Alcaldía de Manizales obtuvo una ortofotografía por medio de técnicas LIDAR. Con esta información se pudo definir que la cuenca presenta concentración de suelo urbano con mayor proporción en la parte media de la cuenca, seguido por bosques y matorrales principalmente en la parte baja. En el 2016 se caracterizaron los suelos, mediante la realización de 30 sondeos geotécnicos, mediante la cual se pudo establecer que los suelos son en su mayoría finos con bajas permeabilidades, que oscilan entre 0.025-5 cm/h. Por último, la cartografía de la red de alcantarillado fue suministrada por la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P. En el proceso de discretización en el modelo se obtuvieron 92 subcuencas con áreas entre 0.30 ha y 4.08 ha.

El proceso de calibración se realizó con 5 eventos de un solo pico, con magnitudes entre 12 mm y 30 mm e intensidades medias entre 9.58 mm/h y 20.12 mm/h. Se obtuvieron índices de Nash Sutcliffe (NSE) entre 0.72-0.94, errores volumétricos entre -10.04 % y 18.57 %, errores en el caudal pico entre -26.16 % y 28.57 %, y diferencias en tiempos al pico de 0 minutos para casi todos los eventos lo que se considera aceptable según Molnar [41]. Para la validación se utilizaron 11 eventos con diferentes características incluyendo varios picos de precipitación, obteniendo NSE entre 0.50-0.90, errores volumétricos entre 10 % y 15 % excepto un evento con el 30 %, errores al pico entre -22 % y 20 % excepto un evento con el 60 %. Con el modelo calibrado y validado se realizaron los análisis hidráulicos.

2.2 Revisión de metodologías de diseño

Para el diseño de los PP se revisaron de manera exhaustiva diferentes manuales de diseño a nivel internacional. Estos fueron: 1) Manual de criterios de drenaje pluvial urbano y mejores prácticas de gestión de aguas pluviales del distrito de drenaje urbano y control de inundaciones, en Denver [42], 2) Manual de diseño de mejores prácticas de gestión de desarrollo de bajo impacto del distrito de control de inundaciones y conservación del agua del Condado de Riverside [43], 3) Guía de diseño de pavimento permeable del Departamento de Transporte de California [44], 4) Manual de diseño hidrológico del concreto permeable de Illinois, Estados Unidos [45], 5) Guía de diseño de Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible de la alcaldía mayor de Bogotá, Colombia [46], 6) Manual de Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible de la asociación de investigación e información de la industria de la construcción en Reino Unido [14], 7) Guía de diseño, construcción y mantenimiento de PP en bloques de hormigón de la Asociación de pavimentación y bordillos de hormigón en concreto permeable en Reino Unido [24], 8) Manual de criterios de diseño y operación de PP de la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos [47], 9) Manual de diseño mecanicista - empírico para un pavimento totalmente permeable bajo tráfico de la academia nacional de ciencia, ingeniería y medicina de los estados unidos [48], y 10) Recomendaciones de diseño estructural para pavimentos asfálticos porosos de la academia nacional de ciencia, ingeniería y medicina de los estados unidos [49].

2.3 Selección de pavimentos permeables y ubicación

Se seleccionaron PP sin infiltración directa al suelo (es decir con conducción de sus aguas) ya que la cuenca presenta altas pendientes y se pueden presentar deslizamientos debido al agua infiltrada. De manera que, los PP propuestos se diseñan sin infiltración a la subrasante, es decir como estructuras de almacenamiento, los cuales tendrán como objetivo atenuar la escorrentía superficial en la zona de estudio. Se seleccionaron PP para vías vehiculares de tráfico liviano en asfalto permeable, parqueaderos en concreto permeable y áreas comunes en adoquines de concreto permeables (Figura 2).

La selección de los espacios se realizó utilizando Google Maps y la cartografía base de la Alcaldía de Manizales. Los PP en parqueaderos se propusieron teniendo en cuenta aquellos con áreas superiores a 100 m² debido a la relación directamente proporcional del área permeable del pavimento con la capacidad de atenuación de escorrentía superficial. Los PP de áreas comunes se propusieron en canchas de microfútbol o baloncesto, parques deportivos, bulevares, plazas universitarias, entre otros. Se consideraron zonas comunes con áreas superiores a 100 m². De manera que, teniendo en cuenta lo anterior se obtuvieron 50 PP en vías vehiculares (V), 20 PP en parqueaderos (P) y 20 PP en áreas comunes (C) como se indica en la Figura 3. En total los 90 PP cubren 328321.84 m² (0.032 km²) es decir el 2.25 % del área

impermeable de la cuenca (1.42 km²), los PP en vías vehiculares representan el 70.50 % del área total de los PP propuestos, en parqueaderos el 11.50 % y en áreas comunes el 18.00 %.

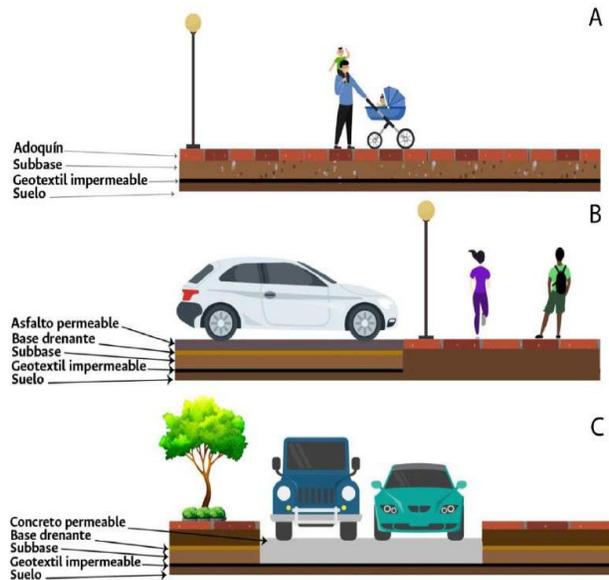


Figura 2. Sección transversal tipo de PP propuestos en, A) áreas comunes en adoquines permeables y B) parqueaderos y C) vías vehiculares terciarias. Fuente: elaboración propia.

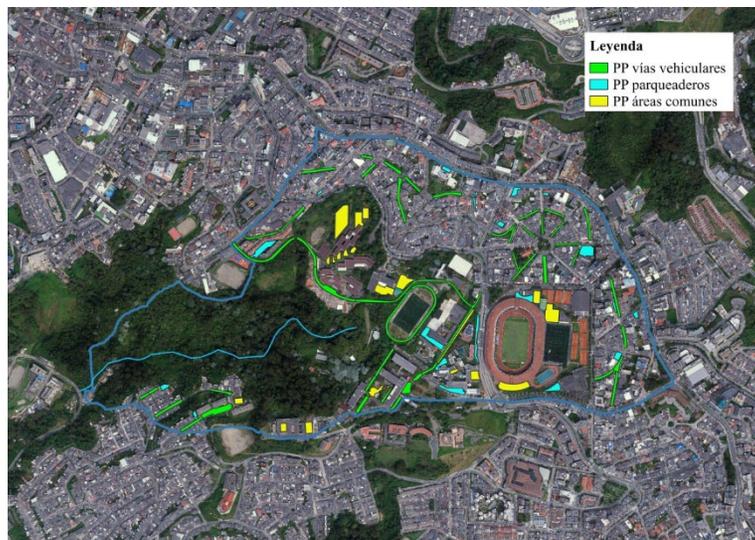


Figura 3. Distribución de pavimentos permeables en el área de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de fotografía aérea y SIG.

2.4 Diseño hidrológico

La lluvia de diseño se determinó a partir de la IDF de la estación Agronomía de Cenicafé (ver ecuación 1), utilizando el tiempo de concentración (t_c) de la cuenca Palogrande, el cual se estimó en 22 minutos [50], con periodo de retorno (T) de 3 años, según la resolución 0330 de 2017 [51].

$$I = \frac{3896 \times T^{0.154}}{(t_c + 25)^{1.02}} \quad (1)$$

A partir de esta se obtuvo una precipitación de intensidad media 90.9 mm/h y lámina de agua de 33.33 m. El volumen de agua a almacenar se puede obtener bien sea mediante el método racional o el Número de Curva, siendo el primero el más utilizado. En este caso se utilizó el Método Racional utilizando la tabla de coeficientes de escorrentía C del Ministerio de Vivienda. Luego se obtiene la relación de impermeabilidad total como una proporción entre el área de PP considerada y el área tributaria total. Posteriormente, se obtiene la profundidad requerida para almacenar el agua dividiendo el volumen a almacenar entre el área multiplicada por una relación de vacíos considerada para dicha capa, la que se suele considerar superior al 30 % [46]. En terrenos inclinados se debe definir si se requieren barreras transversales para evitar el desbordamiento [42].

2.5 Diseño estructural

Las metodologías de diseño estructural convergen en la importancia de la resistencia al corte de los materiales o CBR (por sus siglas en inglés) de acuerdo con cada tipo de suelo. El manual de CIRIA [14] relaciona el CBR con los rangos de permeabilidad del suelo e Interpave, 2018 con el índice de plasticidad del suelo. En este segundo manual, los valores de CBR que recomiendan son más bajos que los del primer manual especialmente para los suelos con texturas finas. Otro punto de convergencia entre las metodologías de diseño estructural es el tráfico que opera sobre el pavimento permeable para definir el espesor de las capas estructurales, ya sea por alguna clasificación local del tránsito [47] o por el número de ejes equivalentes [24]. La primera metodología es compleja de aplicar ya que los valores de permeabilidades normalmente no se tienen, de manera que se recomienda determinar dicho espesor en función de las categorías de tráfico, ya que éstas siempre estarán claramente definidas. En dicho caso, Interpave recomienda < 70 ejes para vías poco transitadas, < 7 para parqueaderos y 0 para el resto de vías como peatonales y demás. Para estos tres tipos de PP recomiendan espesores de capa de pavimento de 250 (asfalto), 80 (concreto) y 60 mm (adoquín) respectivamente, base de 90 mm, 100 mm, 0 mm respectivamente, y para subbase 150 para los dos primeros y 100 para vías comunes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diseño hidrológico y estructural

En la Tabla 1 se presenta el diseño de los PP propuestos, los espesores son valores promedio de todos los PP ya que de acuerdo con cada diseño para cada pavimento estos pueden variar.

Tabla 1. Diseño pavimentos permeables propuestos en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Pavimentos permeables	Cantidad (Un)	Volumen agua almacenar (m ³)	Espesor (m) Subbase (dcr)	Espesor promedio (m) base (db)	Espesor promedio (m) pavimento (dc)
Vías vehiculares	50	2744.37	0.39	0.10	0.25
Parqueaderos	20	357.65	0.31	0.10	0.08
Áreas comunes	20	550.98	0.31	NA	0.06

3.2 Análisis hidráulico sin pavimentos permeables

En la Figura 4 se observa que, a los 10 minutos de iniciada la lluvia comienza la respuesta de la cuenca (es decir, muy rápidamente) en las subcuencas 19 y 22, a los 15 minutos la escorrentía superficial se ha incrementado en todas las subcuencas especialmente en la zona

urbanizada en la parte alta de la misma, donde se presentan valores entre 100-500 l/s de escorrentía, incluso la subcuenca 22 presenta valores entre 500-100 l/s (subcuenca en amarillo en la Figura 4 para el minuto 15). Para ese minuto, las Subcuencas 19 y 22 presentan los valores pico más altos (> 1000 l/s), seguidas muy de cerca por subcuencas cercanas (observar en verde varias subcuencas en la Figura 4). Para el minuto 25, las subcuencas 19 y 22 (subcuencas en rojo) presentan valores máximos; aquí es importante mencionar que en la parte baja varias subcuencas presentan valores altos de escorrentía desde el minuto 20. El anterior comportamiento se presenta debido a las altas pendientes de dichas subcuencas ($> 48\%$) y de los conductos, lo que genera altas velocidades. De manera que el minuto 25, la mayor parte de la cuenca está con valores de escorrentía superiores a los 250 l/s. En el minuto 30, gran parte de la escorrentía es evacuada, ya que se presenta una disminución considerablemente de estos flujos y a partir de allí en 15 minutos más se evacúan totalmente estos. De manera que, los volúmenes más altos de escorrentía se presentan muy rápidamente, entre los 15-25 minutos de iniciada la lluvia, siendo el minuto 25 el más crítico si se tiene en cuenta la cantidad de subcuencas con altos volúmenes de escorrentía superficial.

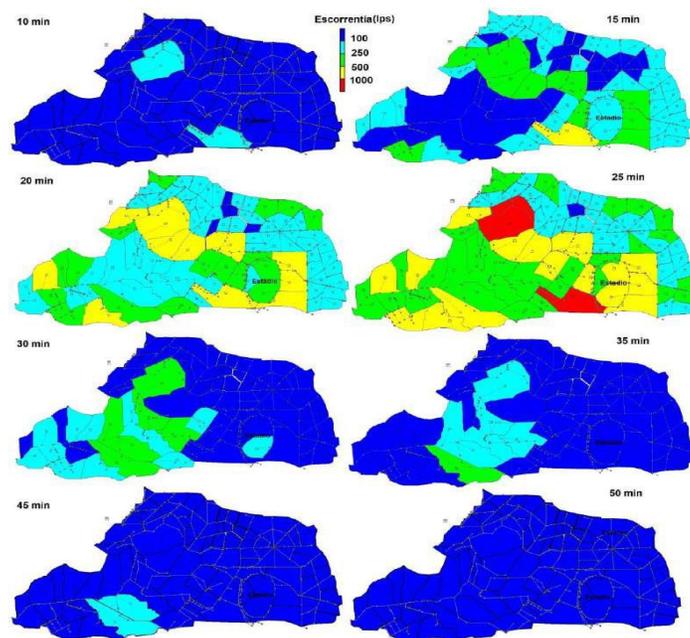


Figura 4. Escorrentía superficial en las subcuencas sin implementar pavimentos permeables.
Fuente: elaboración propia.

Las subcuencas donde tempranamente se producen volúmenes altos de escorrentía, coinciden casi totalmente con aquellas donde se presentan los picos de escorrentía. Estos valores máximos de volumen y picos de escorrentía se producen en una zona o cordón donde se presentan cambios bruscos de pendiente (en muchas de 24 % al 12 %), es decir de zonas de alta pendiente a zonas de media pendiente. En otras cuencas (al noroccidente) no se presenta el cambio de pendientes mencionado, pero sí un cambio brusco de usos del suelo, de zonas urbanizadas de media intensidad (en la parte alta) a zonas con cobertura vegetal y zonas impermeabilizadas, o zonas abiertas caracterizadas por altos niveles de impermeabilización. En algunos casos se presentan ambas condiciones. Casi totalmente estos cambios, están demarcados por dos vías, aguas arriba la avenida Paralela que es una vía principal de Manizales y aguas abajo la vía Ruta 30. Es decir, que estas vías representan cambios drásticos en el tipo de cobertura y pendiente (de muy impermeabilizado a poco impermeabilizado, o de

muy impermeabilizado y alta pendiente a media pendiente), los que se proyectan en la cobertura de alcantarillado, que resulta poca para las áreas más aguas abajo, y, por tanto, generan cambios bruscos en la escorrentía superficial, en el sentido de que la zona aguas arriba evacúa hacia la zona aguas abajo, pero esta no tiene suficiente red drenante causando los mayores volúmenes de escorrentía superficial.

En la parte baja de la cuenca, también se producen altos volúmenes de escorrentía superficial pero menos intensa, siendo, el minuto 25 también el más crítico. Dichos volúmenes se presentan aquí por las altas pendientes, a pesar de que son zonas con mucha cobertura vegetal. En el sur de la cuenca, se encuentra otra zona urbanizada pero poco drenada y por tanto los volúmenes de escorrentía también son importantes en el minuto 25.

A diferencia de lo que sucede con la escorrentía, las velocidades son especialmente altas (superiores a 6 m/s) solo en unos pocos conductos (Figura 5). Dichas velocidades se comienzan a visualizar desde el minuto 10, siendo persistente la situación hasta casi una hora después de iniciada la lluvia. Al comparar con las pendientes de las subcuencas se observa (Figura 5) que las mayores pendientes se encuentran en la zona baja de la cuenca, donde las velocidades no son especialmente altas, excepto por un par de conductos al sur. Sin embargo, en la parte media las pendientes, aunque no son las más altas, siguen siendo considerables (superiores al 36 %), lo que aunado a las altas pendientes de los conductos que entregan al río, hacen que en esta zona se presenten las mayores velocidades en los conductos (superiores a la 10 m/s).

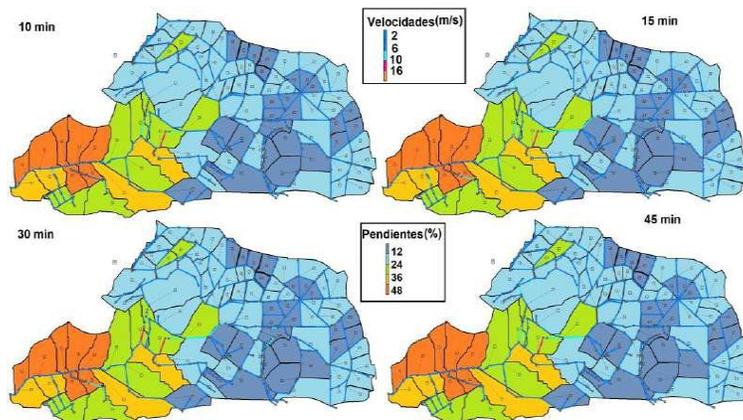


Figura 5. Velocidades en conductos de la red sin pavimentos permeables. Fuente: elaboración propia.

3.3 Análisis hidráulico con pavimentos permeables

Al implementar los PP los volúmenes de escorrentía disminuyen de manera diferenciada según el tipo de pavimento que se aplicó. Al minuto 15 los volúmenes que se presentan en el cordón que se resaltó anteriormente en la parte alta de la cuenca, ahora disminuyen sus valores, a excepción de la zona circundante al estadio donde en general los volúmenes se mantienen similares a la condición sin PP. De aquí, la subcuenca 22 presenta reducción de dichos volúmenes.

El impacto de los PP en áreas comunes se puede apreciar en la subcuenca 19 dónde sólo se implementaron estos. En dicha subcuenca el volumen de escorrentía disminuye, pero se mantiene el comportamiento de valores considerables hacia el minuto 25 (subcuenca en rojo en la Figura 6). El aporte en la reducción de este tipo de PP se observa cuando los caudales son bajos, a partir del minuto 30, es decir cuando se superan los valores punta. Este tipo de PP, debido a la manera en cómo se diseñan, no permiten incluir grandes áreas aportantes, razón por la cual no se logran los resultados que se esperan.

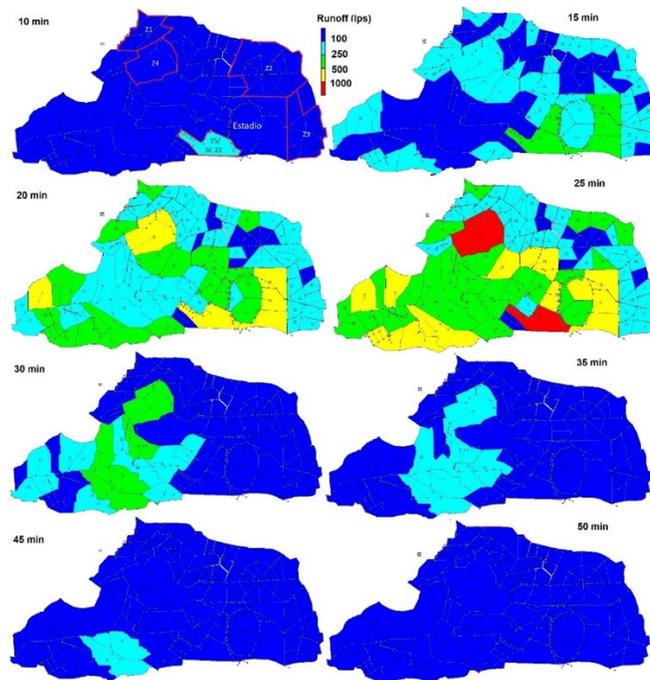


Figura 6. Localización de cámaras en las que se incrementan los caudales con la implementación de PP.
Fuente: elaboración propia.

Los PP viales se observan en la parte alta, aplicados en tres zonas (identificadas como Z1, Z2 y Z3 en la Figura 6 para el minuto 15). En todas las zonas estos PP logran reducciones en los caudales, siendo mucho más eficientes en la Z2. En la zona que tributa hacia el estadio (Z3), el impacto de la implementación de estos PP no es relevante ya que, se logra una reducción del 4.35 % en los volúmenes y del 18.34 % en el pico de escorrentía, es decir muy baja. Por tanto, el comportamiento general de los volúmenes de escorrentía generados se mantiene casi igual (Figura 4 y Figura 6). En cambio, los PP viales implementados en la Z2, en las subcuencas con formas concéntricas, generan reducciones de hasta el 52.83 % en los caudales en el minuto 30 (ver Tabla 2). Esta zona se diferencia de las otras donde se implementaron PP viales en la pendiente, ya que aquí está alrededor del 12 % en promedio, mientras que en las otras se tiene un 24 % en promedio, lo que indica que la pendiente no permite a los PP realizar el trabajo de manera apropiada.

Por último, en la subcuenca 22 se implementaron todos los PP a la vez, sin embargo, los resultados no son considerables en términos de reducción de la escorrentía superficial, ya que la máxima reducción se logra al principio del evento de escorrentía con un 20.60 % (ver Tabla 2). Esta zona se caracteriza por presentar altas pendientes (en promedio del 24 %), pero además por recibir los flujos de la zona superior, donde está ubicado el estadio. La zona circundante del estadio se encuentra altamente impermeabilizada y las redes de drenaje están conformadas de manera tal que se bordea al estadio evitando el ingreso de flujos en este, por lo que se realizan grandes descargas en la subcuenca 22, es decir, la que se menciona en este apartado.

Los resultados son consistentes con otros reportados en la literatura, ya que reducciones en los volúmenes de escorrentía superiores al 30 % han sido reportadas solamente en PP que drenan a suelos arenosos [33], [52]-[55], sin embargo, los suelos de esta cuenca son suelos arcillosos por tanto las permeabilidades naturales son bajas. Por otro lado, las reducciones en

el caudal punta también han sido reportadas, pero de manera menos frecuente, y en lo que menos impactan los PP en generar retrasos en alcanzar los caudales punta. En este caso, los PP reducen el volumen de agua en buen número (32 de 36) de cámaras de la red de drenaje en los momentos críticos, 17 de las cuales mayores al 25 % y las 15 restantes entre el 0 y el 25 %, lo que implica que las primeras 17 cumplirían con la reducción del 25 % del volumen de acuerdo la normativa colombiana. Mientras que para la duración total sólo se incrementan 3 cámaras adicionales, lo que quiere decir que los PP en los primeros minutos de un evento son determinantes para amortiguar los caudales punta. Sin embargo, en algunas cámaras se incrementa el caudal, lo que se atribuye a que en el minuto 20 se presentan tiempos de retardo debido al almacenamiento del agua en los PP, lo que eleva los caudales en el minuto 25 y por esto se da el incremento de caudal.

Tabla 2. Reducción de caudales en la cámara de salida de cada subcuenca con la aplicación de PP (%).
Fuente: elaboración propia.

Cámara	20195C	20073C	21340C	20593C	20130C
	PP implementado				
Minuto	Vías	Vías	Vías	Áreas comunes	todos
10	12.47	22.73	14.16	1.40	20.60
15	6.82	21.59	3.76	5.35	19.94
20	9.64	21.11	4.60	19.77	19.58
25	4.35	19.39	3.83	28.05	10.62
30	12.72	52.83	10.41	80.20	11.15
35	8.85	0.84	24.53	88.99	2.61
40	4.04	11.11	4.63	88.22	19.90
% área PP sobre el total	3.00	5.46	5.27	6.07	3.25
% área PP sobre el aferente	26.06	21.29	29.23	34.40	18.17
% reducción inundación cámara	37.28	No aplica	No aplica	11.70	No aplica

La implementación de PP reduce la escorrentía superficial en las subcuencas de la parte alta del área de estudio lo que corresponde a la zona urbanizada de la cuenca; en el 58 % de las subcuencas (32) se presentan reducciones superiores al 20 %, mientras que el 38 % (21) entre el 0 % y el 20 %. Los PP asociados a las subcuencas donde se presentan mayores reducciones de escorrentía superficial, en su gran mayoría son PP en vías vehiculares. Los PP asociados a las subcuencas que presentan reducción de escorrentía entre el 0 % y el 20 % son en su mayoría, PP para parqueaderos y áreas comunes, lo que implica que los PP propuestos en vías vehiculares reducen más la escorrentía superficial que aquellos propuestos en áreas comunes y en parqueaderos debido al área impermeable aportante que le corresponde a cada uno.

Esto es consistente con otros estudios donde se observa que los PP en asfalto permeable son las técnicas más costo-eficientes, ya que logran las mayores reducciones de volúmenes de escorrentía, así como de los valores punta [35], [36]. Sin embargo, se encuentran limitaciones al comparar este estudio con otros, ya que no se encuentra en la literatura análisis específicos para cuencas con medias y altas pendientes. De allí la importancia de este tipo de estudios, ya que proponen técnicas específicas para zonas donde no se han hecho implementaciones de este tipo, ya que al demostrar su bondad se anima a los constructores a complementar las técnicas convencionales con este tipo, de modo que se puedan mitigar los efectos de la impermeabilización.

3.4 Análisis económico de pavimentos permeables

Realizar un análisis de costos de los PP resulta complejo, ya que estos dependen de la disponibilidad de materiales en cada sector. Debido a la poca oferta de materiales de este tipo en los países en vías de desarrollo el costo será más elevado. En varios artículos se menciona que este sobrecosto corresponde a entre el 20-50 % del de un pavimento convencional [56]. En general, el uso de PP requiere mayor planificación y es más costoso que los pavimentos tradicionales, además de requerir un mayor mantenimiento que las vías tradicionales, lo que eleva aún más los costos [56]. Estas deficiencias se ven compensadas por los beneficios ambientales e hidráulicos. Sin embargo, los PP con asfalto permeable resultan más económicos que los otros tipos de PP [56].

A pesar de lo anterior, se encuentran estudios que afirman lo contrario, ya que indican que los PP resultan ser un 30 % más económico que los pavimentos convencionales, ya que además de contemplar la construcción, mantenimiento, rehabilitación, también consideran dentro los costos el ahorro en el tratamiento de aguas pluviales. También, se encuentra en la literatura que los PP tienen costos de funcionamiento menores que otros pavimentos, debido a que en los que se permite infiltración total no es necesario realizar obras de drenaje de escorrentía [57].

Por otra parte, al comparar los costos de los PP contra otros SUDS, sí existe uniformidad en las conclusiones. la operación y el mantenimiento anual de los PP es más económico frente a alternativas SUDS cómo lo son los techos verdes y las celdas de bioretención [28], [58], [59].

4. CONCLUSIONES

En la generación de escorrentía urbana las altas pendientes tienen gran incidencia en esta; y con modelación hidráulica se puede demostrar que los cambios bruscos de coberturas y pendientes, así como la existencia de límites muy marcados entre zonas, tienen un mayor impacto. Es así como cambios bruscos de pendientes y la concentración de usos en grandes zonas, hace que la escorrentía no se maneje donde se produce, sino que se trasladen dichos flujos a zonas donde se pueden realizar las descargas. En el caso de la cuenca Palogrande, la vía avenida Paralela ejerce un control muy notable, ya que es un límite que crea en el paisaje un cambio brusco de pendientes (de altas a medias) y del tipo de uso (de un uso urbano de media intensidad con muy pocas áreas verdes a zonas con cobertura vegetal elevada). De manera que, los flujos de escorrentía están altamente dominados por un uso no apropiado del territorio, el que desconoce e incluso va en contravía de la hidrología pre-urbanización. Las reducciones logradas con los PP implementados son similares a los encontrados en otros estudios, es decir, no se obtienen reducciones considerables a nivel de cuenca, pero sí a nivel de zona intervenida. Sin embargo, los PP viales tuvieron mejor respuesta ante la reducción de los volúmenes de escorrentía, los caudales punta y en retardar el tiempo en alcanzar el valor punta. En dicho sentido, la pendiente media de la cuenca ejerce un impacto significativo en el impacto que se puede obtener con los PP, ya que pendientes superiores al 24 % disminuyen considerablemente el efecto de estos. Por otra parte, se encontró que el uso del territorio ejerce un control fuerte en la generación de la escorrentía y el comportamiento de los PP, ya que la concentración de zonas impermeabilizadas y el uso de redes de drenaje en serie o en cascada, genera flujos de muy altas velocidades, con caudales punta considerables, que resultan muy complejos de manejar, aunque se cuente con grandes áreas aportantes.

Se propone crear manuales o guías de diseño de PP específicos para Colombia teniendo en cuenta todo tipo de topografías que permitan considerar los PP como una medida fácil de diseñar e implementar debido a su aporte hidrológico al restituir la permeabilidad al suelo urbanizado.

Una dificultad grande para el desarrollo de esta investigación consistió en contar con información confiable sobre las propiedades de los PP, por lo que, se encuentra que muchos diseñadores utilizan recomendaciones extranjeras. Por lo que se recomienda realizar investigaciones sobre estos según su producción específica.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Este proyecto de investigación se pudo realizar gracia a la beca de la Alcaldía de Manizales, en el marco del programa Manizales Campus Universitario y al equipo de Manizales +innovadora el que se realizó en coordinación con la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés con el contenido de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Jhoan Sebastián Pantoja: metodología, investigación, revisión y edición.

Jeannette Zambrano Nájera: conceptualización, metodología, investigación, revisión y edición. Todos los autores leyeron y están de acuerdo con la publicación de esta versión del manuscrito.

6. REFERENCIAS

- [1] S. Ertan, and R. N. Çelik, "The Assessment of Urbanization Effect and Sustainable Drainage Solutions on Flood Hazard by GIS," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2293, Feb. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13042293>
- [2] M. Ahern, R. S. Kovats, P. Wilkinson, R. Few, and F. Matthies, "Global health impacts of floods: Epidemiologic evidence," *Epidemiol. Rev.*, vol. 27, no. 1, pp. 36–46, Jul. 2005. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxi004>
- [3] L. Sean, and O. Abiodun, "Natural Disasters, Their Health Effects, and the Significance of Disaster Epidemiology: A Review," *TPHA journal*, vol. 73, no. 1, p. 10-14, 2021. <https://web.p.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=1968c2c2-150b-43ec-bd5a-e96be02a8726%40redis>
- [4] Departamento Nacional de Planeación. "3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014." dnp.gov.co, Accessed: Jun. 9, 2024. [Online]. Available: <https://2022.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>
- [5] D. M. Rey Valencia, "Propuesta de sistema de drenaje urbano sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente," Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2019. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76582>
- [6] A. Trapote Jaume, "Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible," *Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 26–40, Dec. 2016.

- https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/65629/1/2016_Trapote_JEngTechnol.pdf
- [7] R. Ashley *et al.*, “UK sustainable drainage systems: past, present and future,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Civ. Eng.*, vol. 168, no. 3, pp. 125–130, Aug. 2015. <https://doi.org/10.1680/cien.15.00011>
- [8] L. B. Leopold, *Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use*, New York, NY, USA: U.S., Geological Survey, 1968. <https://pubs.usgs.gov/circ/1968/0554/report.pdf>
- [9] I. Alcántara-Ayala, and A. Oliver-Smith, “Early Warning Systems: Lost in Translation or Late by Definition? A FORIN Approach,” *Int. J. Disaster Risk Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 317–331, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00231-3>
- [10] M. Karbasi, A. Shokoohi, and B. Saghafian, “Loss of Life Estimation Due to Flash Floods in Residential Areas using a Regional Model,” *Water Resour. Manag.*, vol. 32, no. 14, pp. 4575–4589, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2071-9>
- [11] W. R. Derrick Sewell, “Human Response to Floods,” in *Introduction to Geographical Hydrology*, United Kingdom, UK: Routledge, 2019, pp. 121–141. <https://doi.org/10.4324/9780429273322-12>
- [12] K. R. Trubey, S. Culpepper, Y. Maruyama, S. C. Kinnamon, and N. Chaudhari, “Tastants evoke cAMP signal in taste buds that is independent of calcium signaling,” *Am. J. Physiol. Physiol.*, vol. 291, no. 2, pp. C237–C244, Aug. 2006. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00303.2005>
- [13] S. M. Perales, A. Doménech, and E. A. Fernández Escalante, “Los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en la hidrogeología urbana,” *Grupo TRAGSA Madrid. IX Simp. Hidrogeol. AIH. Elche, Val.*, pp. 1–12, 2008. <https://www.adta.es/actuaciones/agua/2011%2006%2015%20SistemasUrbanosDrenajeSostenible.pdf>
- [14] B. Woods Ballard *et al.*, *The SuDS Manual. (2015)*. CIRIA. London. Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.scotsnet.org.uk/data/assets/pdf_file/0023/51764/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf
- [15] C. García-Casuso, P. Lapeña-Mañero, E. Blanco-Fernández, A. Vega-Zamanillo, and J. M. Montenegro-Cooper “Laboratory Assessment of Water Permeability Loss of Geotextiles Due to Their Installation in Pervious Pavements,” *Water*, vol. 12, no. 5, p. 1473, May. 2020. <https://doi.org/10.3390/w12051473>
- [16] T. D. Fletcher, H. P. Duncan, P. Poelsma, and S. D. Lloyd, “Storm Water Flow and Quality, and the Effectiveness of Non-Proprietary Storm Water Treatment Measures – a Review and Gap Analysis,” Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Technical Report, Clayton, Australia, 2005. [Online]. Available: <https://ewater.org.au/archive/crcch/archive/pubs/1000163.html>
- [17] B. E. Hatt, T. D. Fletcher, and A. Deletic, “Hydrologic and Pollutant Removal Performance of Stormwater Biofiltration Systems at the Field Scale,” *Journal of Hydrology*, vol. 365, no. 3–4, pp. 310–321, Feb. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.001>
- [18] B. Horton, C. J. Digman, R. M. Ashley, and E. Gill, *BeST (Benefits of SuDS Tool) Technical Guidance. (2016)*. CIRIA. London. Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: http://observatoriagua.uib.es/repositori/suds_ciria_technical_2.pdf
- [19] M. L. Castro Espinosa, “Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano,” Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2011. <https://core.ac.uk/download/pdf/71418921.pdf>
- [20] L. A. Sañudo-Fontaneda, “Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones,” Tesis de grado, Universidad de Cantabria, España, 2014. <https://portalinvestigacion.uniovi.es/documentos/5e57ae0b2999527d991a3453>
- [21] G. Hammes, L. P. Thives, and E. Ghisi, “Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings,” *J. Environ. Manage.*, vol. 222, pp. 338–347, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.094>
- [22] M. Perales, “Construcción del aparcamiento de firmes permeables del Parque de Las Llamas, Santander,” Tesis de grado, Universidad de Cantabria, España, 2014. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5571>
- [23] J. Rodríguez Hernández, “Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros,” Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Cantabria - España, 2008. <https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/estudio-an%C3%A1lisis-y-dise%C3%B1o-de-secciones-permeables-de-firmes-para->
- [24] A. Mohamed, “Performance of Underside Shaped Concrete Blocks for Pavement,” Ph.D. dissertation, University Teknologi Malaysia, Johor, Malasia, 2014. <https://eprints.utm.my/77868/1/AzmanMohamedPFKA2014.pdf>
- [25] J. Mullaney, and T. Lucke, “Practical Review of Pervious Pavement Designs,” *Clean – Soil, Air, Water*, vol. 42, no. 2, pp. 111–124, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1002/clen.201300118>

- [26] M. Chopra, S. Kakuturu, C. Ballock, J. Spence, and M. Wanielista, "Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 15, no. 6, pp. 426–433, Oct. 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000117)
- [27] J. A. P. Drake, A. Bradford, and J. Marsalek, "Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge," *Water Qual. Res. J.*, vol. 48, no. 3, pp. 203–222, Aug. 2013. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2013.055>
- [28] F. Li, Y. Liu, B. A. Engel, J. Chen, and H. Sun, "Green infrastructure practices simulation of the impacts of land use on surface runoff: Case study in Ecorse River watershed, Michigan," *J. Environ. Manage.*, vol. 233, pp. 603–611, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.078>
- [29] A. Palla, and I. Gnecco, "Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale," *Journal of Hydrology*, vol. 528, pp. 361–368 Sep. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>
- [30] T. H. Papakos, M. Gould, and J. Brunner, "Redeveloping Brownfields with LID Design," in *Low Impact Development 2010*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2010, pp. 1684–1697. [https://doi.org/10.1061/41099\(367\)145](https://doi.org/10.1061/41099(367)145)
- [31] Q. Hua-Peng, I. Zhuo-xi, and F. Guangtao, "The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics," *J. Environ. Manage.*, vol. 129, pp. 577–585, Nov. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- [32] J. Huang, J. He, C. Valeo, and A. Chu, "Temporal evolution modeling of hydraulic and water quality performance of permeable pavements," *J. Hydrol.*, vol. 533, pp. 15–27, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.042>
- [33] K. Collins, W. F. Hunt, and J. Hathaway, "Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in easter North Carolina," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 13, no. 12, pp. 1146–1157, Dec. 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:12\(1146\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:12(1146))
- [34] E. A. Fassman, and S. Blackbourn, "Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System Over Impermeable Soils," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 15, no. 6, pp. 475–485, Mar. 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000238](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000238)
- [35] T. Liu, Y. Lawluyv, Y. Shi, and Y. Pow-Seng, "Low Impact Development (LID) Practices: A Review on Recent Developments, Challenges and Prospects," *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 232, no. 9, p. 344, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05262-5>
- [36] M. Shafique, and R. Kim, "Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions," *Ecol. Chem. Eng. S.*, vol. 22, no. 4, pp. 543–563, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1515/eces-2015-0032>
- [37] M. Kamali, M. Delkash, and M. Tajrishy, "Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff," *J. Environ. Manage.*, vol. 187, pp. 43–53, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.027>
- [38] C. Damodaram *et al.*, "Simulation of Combined Best Management Practices and Low Impact Development for Sustainable Stormwater Management," *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 46, no. 5, pp. 907–918, Oct. 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x>
- [39] D. M. Rey Valencia, and J. del C. Zambrano Nájera, "Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande," *Rev. UIS ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 115–126, Jan. 2018. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011>
- [40] Y. C. Cabezas Suárez, and J. del C. Zambrano Najera, "Evaluación del Impacto de los Cambios de Usos del Suelo sobre la Hidrología de Cuencas Urbanas. Caso de aplicación cuenca San Luis," in *V Encuentro Regional de Semilleros de Investigación RREDSI*, Manizales, Colombia, Sep-oct 2015. https://rredsi.com.co/wp-content/uploads/2018/10/memorias_VIII/MEMORIAS%20RREDSI%202015%20COMPLETO.pdf
- [41] Q. Duan, H. V. Gupta, S. Sorooshian, A. N. Rousseau, and R. Turcotte, *Calibration of watershed models*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2003. <https://www.wiley.com/en-us/Calibration+of+Watershed+Models-p-9780875903552>
- [42] Urban Drainage and Flood Control District. *Urban Storm Drainage Criteria Manual Volume 3, Best Management Practice*. Denver. Colorado. (2010). Accessed: Apr. 1, 2024. [Online]. Available: [https://yosemite.epa.gov/oa/eab_web_docket.nsf/Attachments%20By%20ParentFilingId/AD542E028730375785257C5100567622/\\$FILE/EPA-BAFB-00001518.pdf](https://yosemite.epa.gov/oa/eab_web_docket.nsf/Attachments%20By%20ParentFilingId/AD542E028730375785257C5100567622/$FILE/EPA-BAFB-00001518.pdf)
- [43] Riverside County Flood Control and Water Conservation District. *Low Impact Development Best Management Practice Design Handbook*. United States. (2011). Accessed: Apr. 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.conservenorthtexas.org/item/Riverside-County-Flood-Control-and-Water-Conservat>
- [44] California Department of Transportation, *Pervious Pavement Design Guidance*. California. Estados Unidos. (2013). Accessed: Apr. 1, 2024. [Online]. Available: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/design/documents/pervious-pavement-dg-dor.pdf>

- [45] L. M. Leming, H. R. Malcom, and D. P. Tennis, *Hydrologic Design of Pervious Concrete*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Eds., Silver Spring, Maryland, USA: PCA, 2007, pp. 72.
<https://secement.org/wp-content/uploads/2016/02/EB303.pdf>
- [46] F. Leiva Villacorta. *Nueva guía de diseño mecánica-empírica para estructuras de pavimento (vistazo a la guía 2002, proyecto nchrp i 37a)*. San Pedro. Costa Rica. (2006). Accessed: Apr. 1, 2024. [Online]. Available:
https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/438/GUIA_DISENO_MECANICA_EMPIRICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [47] B. K. Ferguson, *Porous Pavements*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2005.
<https://doi.org/10.1201/9781420038439>
- [48] H. Li, D. Jones, and J. Harvey, “Development of mechanistic–empirical design procedure for fully permeable pavement under heavy traffic,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2305, no. 1, pp. 83–94, 2012.
<https://doi.org/10.3141/2305-09>
- [49] K. D. Hall, and C. W. Schwartz, “Development of structural design guidelines for porous asphalt pavement,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2672, no. 40, pp. 197–206, Mar. 2018.
<https://doi.org/10.1177/0361198118758335>
- [50] P. Cárdenas, and J. Sebastián, “Evaluación de la capacidad de atenuación de flujos de escorrentía superficial de pavimentos permeables en cuencas con medias y altas pendientes” Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2024. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86721>
- [51] Resolución 330 de 2017. RAS 2017 Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento Básico, Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, Bogotá, Colombia, 2017.
<https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- [52] C. J. Pratt, J. D. G. Mantle, and P. A. Schofield, “UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality,” *Water Sci. Technol.*, vol. 32, no. 1, pp. 63–69, 1995. <https://doi.org/10.2166/wst.1995.0016>
- [53] B. T. Rushton, “Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 127, no. 3, pp. 172–179, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:3\(172\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:3(172))
- [54] C. L. Abbott, and L. Comino-Mateos, “In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system,” *Water Environ. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 187–190, Jul. 2003.
<https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2003.tb00460.x>
- [55] E. Zachary Bean, W. Frederick Hunt, and D. Alan Bidelspach, “Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts,” *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 133, no. 6, pp. 583–592, 2007.
<https://programs.ifas.ufl.edu/media/programsifasufledu/shed/publications/2007-Bean-Evaluation-of-four-permeable-pavement-sites-in-Eastern-North-Carolina-for-runoff-reduction-and-water-quality-impacts.pdf>
- [56] L. Zanoni, A. Boysen, M. Carlson, and J. Harris “The Benefits of Using Porous Asphalt Pavement in Comparison with Other Forms of Pervious Pavements,” Degree thesis, University of Illinois at Chicago College of Engineering, 2018.
https://www.il-asphalt.org/files/3715/4896/1291/Luke_Zanoni_2018_UIUCgo.pdf
- [57] A. Singh, P. Vaddy, and K. P. Biligiri, “Quantification of embodied energy and carbon footprint of pervious concrete pavements through a methodical lifecycle assessment framework,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 161, p. 104953, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104953>
- [58] J. Zeng, G. Huang, Y. Mai, and W. Chen, “Optimizing the cost-effectiveness of low impact development (LID) practices using an analytical probabilistic approach,” *Urban Water J.*, vol. 17, no. 2, pp. 136–143, 2020. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1748208>
- [59] L. N. Antunes, E. Ghisi, and L. P. Thives, “Permeable pavements life cycle assessment: A literature review,” *Water*, vol. 10, no. 11, p. 1575, Nov. 2018. <https://doi.org/10.3390/w10111575>