

**MONOGRAFÍA**  
**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS**  
**ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PERMEABLES, COMO ALTERNATIVA**  
**DE DRENAJE URBANO PARA EL CONTROL DE ESCORRENTÍAS EN LA**  
**CIUDAD DE VILLAVICENCIO**



Por:  
**Sharon Marianie Rebolledo Camargo**



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2021

**MONOGRAFÍA**  
**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS**  
**ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PERMEABLES, COMO ALTERNATIVA**  
**DE DRENAJE URBANO PARA EL CONTROL DE ESCORRENTÍAS EN LA**  
**CIUDAD DE VILLAVICENCIO**

**Sharon Mariane Rebolledo Camargo**

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de ingeniero civil.

Asesor:

**I.C. Jessica María Ramírez Cuello, M.S.**

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2021

**Autoridades Académicas**

**P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P**

Rector General

**P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.**

Vicerrector Académico General

**P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**Ing. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN.**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

## **Dedicatoria**

*De manera especial, este trabajo va dedicado a mi familia, principalmente a mis padres, que durante todo este tiempo estuvieron junto a mi brindándome, dedicación, esfuerzo, motivación y sobre todo apoyo incondicional para nunca desistir.*

*A mis hermanas por ser grandes consejeras y ejemplos por seguir en mi vida tanto personal como profesionalmente, por brindarme su motivación y apoyo.*

*A mis abuelos Alfredo Rebolledo y Orlando Camargo que en paz descansen.*

*A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.*

## **Agradecimientos**

*Agradezco a Dios y mi familia por estar siempre presente en cada momento importante de mi vida, brindándome todo su amor, confianza y apoyo.*

*A la Universidad Santo Tomás y especialmente a la docente y directora I.C. Jessica María Ramírez Cuello, M.S. por brindarme su tiempo, dedicación, apoyo y conocimiento, con los cuales me guió en el transcurso del desarrollo de este trabajo.*

## Contenido

Resumen .....	10
Abstract.....	11
Glosario.....	12
1. Introducción.....	14
2. Formulación del problema .....	15
3. Objetivos.....	16
3.1.    Objetivo general .....	16
3.2.    Objetivos específicos .....	16
4. Justificación.....	17
5. Estado del Arte .....	18
5.1.    Antecedentes .....	18
5.1.1. Internacionales.....	18
5.1.2. Nacionales.....	21
5.2.    Definición y aplicación.....	21
6. Metodología.....	25
7. Fase 1: Definición de los daños del pavimento.....	27
7.1.    Tipos de pavimentos permeables.....	27
7.1.1. Pavimentos permeables discontinuos.....	27
7.1.1.1.    Césped o grava con refuerzos.....	27
7.1.1.2.    Adoquines con ranuras.....	29
7.1.2.    Pavimentos permeables continuos .....	30
7.1.2.1.    Mezclas asfálticas porosas.....	30
7.1.2.2.    Losa de concreto hidráulico poroso .....	31
7.2.    Calidad de drenaje en la ciudad de Villavicencio.....	32
7.3.    Deterioros en las estructuras de pavimento en la ciudad de Villavicencio.....	35
8. Fase 2: Metodología de diseño de los pavimentos permeables.....	37
8.1.    Diseño estructural del pavimento permeable .....	38
8.1.1. Consideraciones de diseño estructural .....	38
8.1.2. Consideraciones de diseño hidrológico.....	39
8.2.    Recomendaciones para la construcción de pavimentos permeables.....	41

9. Fase 3: Ventajas y desventajas .....	43
9.1.    Ventajas.....	43
9.2.    Desventajas .....	44
10. Resultados e impacto .....	45
10.1. Resultados .....	45
10.2. Impactos.....	45
11. Conclusiones.....	47
12. Referencias.....	48

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1 Clasificación propuesta de pavimentos permeables .....	27
Tabla 2 Precipitación media anual .....	34
Tabla 3 Temperatura media anual ponderada TMAP .....	34
Tabla 4 Tabla de resultados .....	45

**Lista de Figuras**

	Pág.
Figura 1 Estructura del pavimento permeable.....	23
Figura 2 Pavimento en concreto permeable .....	24
Figura 3 Metodología .....	25
Figura 4 Césped con refuerzos de hormigón .....	28
Figura 5 Césped con refuerzos de plástico .....	29
Figura 6 Adoquines de Bloques Montserrat con ranuras libres, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander. ....	30
Figura 7 Mezcla asfáltica porosa .....	31
Figura 8 Hormigón poroso hidráulico, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander .....	32
Figura 9 Glorieta de Postobón- Villavicencio Meta .....	33
Figura 10 Estructura del pavimento de los tramos estudiados .....	35
Figura 11 Daños presentes en los tramos con pavimento rígido .....	36
Figura 12 Daños presentes en los tramos con pavimento flexible .....	36
Figura 13 Sección transversal de pavimento de hormigón entrelazado permeable. ....	39
Figura 14 Ventajas .....	43
Figura 15 Desventajas .....	44

## **Resumen**

Esta monografía tiene como objetivo principal evaluar la viabilidad de implementación de los pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano para el control de escorrentías en la ciudad de Villavicencio, haciendo una revisión de la literatura mediante trabajos de grado e investigaciones, teniendo en cuenta los antecedentes de la aplicación de este tipo de técnica a nivel nacional e internacional; además se contemplan los tipos de pavimentos permeables, los deterioros de la malla vial en la ciudad de Villavicencio teniendo en cuenta la calidad de drenaje y la metodología de diseño de las este tipo de pavimentos.

Por lo dicho, se concluye que los pavimentos permeables son una alternativa viable de drenaje sostenible, ya que reduce los costos de mantenimiento e instalación de obras de drenaje tradicionales, pues al implementar este tipo de estructura, se reduce el escurrimiento de aguas pluviales debido a la permeabilidad de la capa de rodadura.

**Palabras Clave:** aguas pluviales, calidad de drenaje, drenaje sostenible, obras de drenaje, pavimento permeable.

### **Abstract**

The main objective of this monograph is to evaluate the feasibility of implementing permeable pavements as an urban drainage alternative to control runoff in the city of Villavicencio, reviewing the literature through graduate work and research, taking into account the background of the application of this type of technique at national and international level; In addition, the types of permeable pavements, the deterioration of the road network in the city of Villavicencio, are considered, taking into account the quality of drainage and the design methodology of this type of pavement.

Therefore, it is concluded that permeable pavements are a viable alternative for sustainable drainage, since it reduces the costs of maintenance and installation of traditional drainage works, since by implementing this type of structure, the runoff of rainwater is reduced due to the permeability of the wearing course.

**Key Word:** drain quality, drain Works, Permeable Pavement, rainwater, sustainable drain.

## Glosario

**Adoquín:** Un adoquín, es una piedra o bloque labrado de forma rectangular que se utiliza en la construcción de pavimentos.

**Afluente:** En hidrología, un afluente corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que no desemboca en el mar, sino en otro río que suele ser más importante, con el cual se une en un lugar llamado confluencia.

**Capa de rodadura:** Es la capa superior del pavimento que soporta directamente las cargas del tráfico.

**Cargas de tráfico:** Es la carga que es transmitida por los distintos vehículos hacia una vía cualquiera.

**Curva IDF:** Las curvas IDF, es una herramienta que permite la estimación de crecidas de cuencas hidrográficas y su utilidad principal es la estimación de la intensidad - Duración-Frecuencia de la precipitación de un lugar.

**Escorrentía superficial:** Es la precipitación que sobre la superficie del terreno discurre por la acción de la gravedad sin infiltrarse en el suelo.

**Hormigón:** El hormigón es un material de construcción formado por una mezcla de cemento, arena, agua y grava.

**Infiltración:** Es el proceso de entrada de agua en el suelo y es de vital importancia durante la aplicación del riego. Se llama infiltrabilidad a la velocidad o tasa de infiltración y normalmente se mide en mm/hora.

**Losa de concreto hidráulico:** Este es un tipo de concreto utilizado ampliamente en la industria de la construcción, gracias a que aporta rendimiento a las obras en términos de resistencia, producción y duración. Está hecho de cemento, agua, arena, grava y otros componentes dependiendo del proyecto.

**Mezcla asfáltica:** En general es una combinación de un ligante hidrocarbonato y agregados minerales pétreos. Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya

sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación.

**Obras de drenaje:** Las obras de drenaje son elementos estructurales que eliminan la inaccesibilidad de un camino provocada por el agua o la humedad, su principal objetivo es evitar que el agua provoque daños estructurales y evitar que el agua se llegue a acumular en el camino.

**Pavimento:** Es una estructura multicapa diseñada para soportar el paso repetido de las cargas generadas por el paso de vehículos comerciales y los cambios en las condiciones ambientales durante un periodo de diseño que varía entre 10 y 20 años.

**Precipitación:** Es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre.

**Relación de vacíos:** Es una relación entre: a) el volumen de espacios vacíos, y b) el volumen de las partículas sólidas en una masa de suelo. Su valor puede ser menor a 1, y puede alcanzar valores muy altos. En teoría  $0 < e \leq 1$ .

**Tormenta de diseño:** Es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Las tormentas de diseño se basan en la información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes.

## **1. Introducción**

Los pavimentos empleados en la ciudad de Villavicencio están expuestos a diversos factores como los son las condiciones pluviales, las cargas de tránsito entre otras. Se evidencia una problemática entre las cuales se encuentran los deterioros en las estructuras de pavimentos, la falta de sistemas de drenaje óptimos para la evacuación de escorrentía de agua pluvial, es por esto que se presentan encharcamientos en la estructura de pavimento afectando la funcionalidad, disminuyendo el nivel de servicio, además que se incrementan los costos de mantenimiento debido a las altas precipitaciones, todo esto conlleva a que no se presenta una capa de rodadura apta para el tránsito de los vehículos.

Por tal razón, este documento plantea realizar una evaluación y revisión de la literatura de los pavimentos permeables, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de este, por medio del análisis teórico de investigaciones realizadas por academias, casas matrices de normas internacionales, y artículos de investigación de países pioneros en la aplicación de esta técnica de pavimentación como los son España, Estados Unidos, Inglaterra entre otros. Posteriormente se evidenciará las condiciones sociales, técnicas, económicas y ambientales, para así evaluar la viabilidad de implementación de esta técnica en la ciudad de Villavicencio.

## 2. Formulación del problema

Las precipitaciones en Villavicencio, Meta superan los 4000 mm anuales, las cuales han causado deterioros a las estructuras de los pavimentos, principalmente por falta de obras de drenaje y subdrenaje, así mismo se asocia con el crecimiento poblacional; al ser una ciudad capital ha ido incrementando con el pasar de los años, por lo tanto, cuenta con la necesidad de una mejor infraestructura vial para el buen tránsito.

En Colombia se han utilizado estructuras convencionales por muchos años, estas a pesar de que cumplen con el propósito de brindar una seguridad en la superficie de rodadura, no cuenta con otros aspectos. Por ejemplo, los pavimentos tradicionales necesitan de obras complementarias como alcantarillados para la recolección de aguas lluvia. Estas obras complementarias, generan altos costos tanto en construcción como en materiales requeridos. Otra problemática a resaltar es el componente de seguridad para los usuarios de las vías, cuando se generan represamientos de agua en la superficie de rodadura de las carreteras estos ocasionan grandes riesgos para los conductores y generan desgaste acelerado a la estructura, ocasionando un fenómeno llamado hidropneumático *“que afecta gravemente la seguridad ya que conlleva a la pérdida del contacto entre la vía y la llanta, evitando que el vehículo responda a cualquier acción de reacción del conductor, ya sea dar dirección, frenar o acelerar”* (Gómez, 2017, pág. 11).

A nivel mundial, se han desarrollado nuevas tecnologías que mitigan estos efectos negativos, como los pavimentos permeables, los cuales permiten la infiltración del agua de escorrentía a través de la estructura, evitando así represamientos de agua sobre la capa de rodadura. Mediante este documento se pretende realizar una evaluación a las estructuras de pavimentos permeables, las cuales se proponen como una alternativa de drenaje urbano en la Ciudad de Villavicencio, Meta. Con la cual se lograría determinar la viabilidad de su implementación, proyectando a futuro el uso de capas asfálticas y de concreto que generen un impacto positivo al medio ambiente.

**Pregunta problema:** ¿Será el pavimento permeable un sistema alternativo eficiente de drenaje urbano para el control de escorrentías en la ciudad de Villavicencio, Meta?

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar la viabilidad de implementación de las estructuras de pavimentos permeables, como alternativa de drenaje urbano para el control de escorrentías en la ciudad de Villavicencio.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Establecer el estado de arte de los pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano.
- Determinar los deterioros más comunes que presentan las estructuras de pavimentos teniendo en cuenta la calidad del drenaje en la ciudad de Villavicencio, Meta.
- Identificar las diferentes metodologías de diseño de los pavimentos permeables y sus variables de estudio.
- Definir las ventajas y desventajas en la implementación de los pavimentos permeables, teniendo en cuenta aspectos técnicos, ambientales y económicos.

#### **4. Justificación**

El crecimiento poblacional y desarrollo urbanístico ha tenido un cambio considerable en los últimos años; lo que ocasiona que las ciudades sustituyan por asfalto y concreto lo que habían sido terrenos agrícolas y superficies forestales, alterando así la naturaleza del ciclo hidrológico del agua, lo cual reduce de manera considerable el volumen de agua infiltrada al mismo, incrementando el caudal de escurrimiento superficial y las amenazas por inundación en los sectores más bajos de las ciudades. Esta modificación va aumentando los riesgos sobre la población y la presión sobre las fuentes receptoras, traducido en problemas de inundaciones y pérdidas económicas, teniendo como agravante la reducida capacidad de los sistemas de drenaje existentes (Vela Tafur & Cruz Goñas, 2018, pág. 20).

Villavicencio, es una Ciudad que cuenta con calles pavimentadas y no pavimentadas, sin obras de drenaje para la recolección de aguas lluvia lo que ocasiona el desgaste en los pavimentos. Ante ello considerando que es prioritario para una zona urbana contar con calles pavimentadas y obras de drenaje, surge una medida de innovación en la gestión de las aguas lluvias y pavimentación de calles, denominándose pavimentos permeables o drenantes, el cual tiene como finalidad mitigar el impacto de las escorrentías superficiales en las vías.

Se debe tener en cuenta que, si no brindamos una solución eficaz a este problema, las zonas urbanas se verán afectadas por inundaciones, encharcamientos y por consecuencia, desgaste en los pavimentos, afectando el tránsito peatonal y vehicular (Esquerre Garcia & Silva Silva, 2019, pág. 1). Por lo tanto, se justifica la necesidad de realizar una evaluación de los pavimentos permeables como sistema alternativo de drenaje urbano para el control de escorrentías, y así identificar la viabilidad de implementación de esta técnica de pavimentación.

La investigación obtenida, servirá tanto a las entidades nacionales como a la comunidad científica para informarse acerca de los sistemas de pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano para el control de escorrentías.

## **5. Estado del Arte**

### **5.1. Antecedentes**

#### **5.1.1. Internacionales**

Los pavimentos permeables son un subconjunto importante y ampliamente estudiado dentro de los SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible) o BMPs (Best Management Practices o Buenas Prácticas Ambientales). En particular, los pavimentos permeables entran dentro de la categoría de sistemas de infiltración o de control en origen de la escorrentía superficial, siendo un tipo específico de superficies permeables. Además, los pavimentos permeables pueden considerarse como una cadena de drenaje sostenible completa por sí mismos, ya que proporcionan infiltración, captación, transporte y almacenamiento, al permitir controlar en origen la escorrentía superficial, laminando los flujos de aguas pluviales y ofreciendo además un servicio a la sociedad como pavimentos estéticos, cómodos y seguros (Rodríguez Hernández, 2008).

La primera aplicación de concreto permeable, tiene registro en el año 1852 en la construcción de dos casas en el Reino Unido. En 1930, el uso del material para la construcción de viviendas fue adoptado por la Asociación de Vivienda Especial de Escocia. Una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial, con gran parte importante del continente europeo devastado, una necesidad imperante de viviendas, escasez de materiales y mano de obra calificada, el concreto permeable se da como una solución innovadora para la construcción de viviendas nuevas en Reino Unido, Alemania, Francia, Holanda, Bélgica, Escocia y Hungría. En Inglaterra se empleó el concreto permeable en la construcción de viviendas de dos pisos, una técnica constructiva llamada “Wimpey Houses” (P.E., 2008, pág. 47), las cuales se caracterizaron por tener una gran eficiencia constructiva y buenas condiciones de aislamiento (Arango, 2010).

En 1972 en Estados Unidos se llevó a cabo una investigación acerca de los pavimentos permeables (porous, pervious or permeable pavements). La utilización de pavimentos permeables tenía la intención de aliviar la contaminación debida a los vertidos de los sistemas de saneamiento unitarios en tiempos de lluvia, reduciendo además los parámetros de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano. Este primer análisis de laboratorio mostró como la mezcla bituminosa porosa era un material muy adecuado para la construcción de este tipo de pavimentos. Además, estudios económicos complementarios demostraron que las carreteras diseñadas con

aglomerado poroso resultaban generalmente más económicas que las carreteras convencionales. Actualmente, la monografía de (Ferguson, 2005), constituye una de las publicaciones más completas sobre pavimentos permeables. Redactada a partir de 800 referencias, 170 entrevistas con expertos y 280 análisis de aplicaciones reales, recoge la experiencia acumulada en Estados Unidos en lo que al uso de pavimentos permeables se refiere. Esta publicación analiza en capítulos separados la durabilidad y funcionalidad de cada uno de los tipos de pavimentos permeables. Posteriormente, (Ferguson, 2005) ha llegado a afirmar que los pavimentos permeables son la técnica de restauración urbana con mayor desarrollo, mayor controversia y mayor radicalidad de las aplicadas actualmente (Rodríguez Hernández, 2008).

En Irlanda, McBride y Knapton (2006) defienden el uso de pavimentos permeables para cumplir con los requerimientos de las autoridades locales de que cualquier nuevo desarrollo no añada caudales adicionales al sistema de drenaje urbano, manteniendo los niveles de permeabilidad previos al desarrollo.

En España 2008, en la Universidad de Cantabria se realiza una investigación por el Doctor Jorge Rodríguez Hernández, esta tesis doctoral denominada “*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 tráfico ligero*”, donde sus objetivos generales eran estudiar la técnica constructiva de los pavimentos permeables y proponer nuevas secciones contemplando el uso de materiales reciclados, además de analizar experimentalmente, en laboratorio y a escala real, el comportamiento de diferentes secciones de pavimentos permeables y recoger las principales recomendaciones para el diseño y construcción de estos mismos asegurando una adecuada calidad. En esta investigación se supuso que este tipo de pavimentos ofrecen la funcionalidad y la durabilidad suficientes para su correcta aplicación en vías urbanas con tráfico ligero, como aparcamientos de superficie para vehículos ligeros o calles de acceso a zonas residenciales (Rodríguez Hernández, 2008).

En el 2009 en la Universidad Nacional Autónoma de México se realizó una investigación por el Ingeniero Cibrián Fernández, quien se centra en el concreto permeable ya que este presenta propiedades de infiltración de aguas pluviales que permiten la reducción de escurrimientos superficiales, disminuyendo de esta manera problemas de inundaciones, acumulación de contaminantes, erosión por altas velocidades entre otras características. Este concluye en su investigación que el uso de pavimentos permeables en áreas urbanas es una opción que permitirá a futuro una adecuada disposición de aguas lluvia, además si se tiene una adecuada integración

de estos pavimentos a los sistemas de drenaje pluvial, la contaminación de aguas residuales sería reducida (Fernández, 2009).

Por otra parte, en 2009 un estudio realizado en España pone de manifiesto que, todavía en climas mediterráneos, con propiedades propias como la torrencialidad y terrenos prácticamente impermeables, esta clase de soluciones dan resultados favorables, logrando obtener el control superior al 90% de los eventos y de los volúmenes de escorrentía provocados (Eduardo García Haba, 2009).

En la Universidad del Salvador año 2012, se realiza una tesis por el ingeniero Marlon Ebiezer Vigil Sánchez denominada “*Diseño, proceso constructivo y evaluación post construcción de un pavimento rígido de concreto permeable*”, quien describe algunos antecedentes del uso del concreto permeable como capa de rodadura para pavimentos en otros países. El principal objetivo de esta tesis es elaborar una propuesta de diseño para un Pavimento Rígido de Concreto Permeable, que permita evaluar el proceso constructivo en general; desde la elaboración del concreto, transporte, colocación y control de calidad del mismo. Una de las conclusiones de esta investigación es que el sistema de pavimento de concreto permeable en comparación con el de concreto convencional, hace una excepción en aislar la subrasante ante la presencia del agua. El pavimento de concreto permeable está diseñado para captar el agua lluvia precipitada y conducirlo al suelo de subrasante para luego ser filtrada y recargar así los mantos acuíferos; o para ser conducida a sistemas de captación para su uso posterior (Vigil Sánchez, 2012).

Además, en el año 2016 en México se realizó una investigación por Eusebio Cárdenas quien, analiza el uso de los concretos permeables en la infraestructura para la movilidad urbana. Durante la investigación se revisa el diseño convencional de pavimentos y se logra observar que este atiende a la resistencia, pero no a preservar el agua. Este diseño introduce los aspectos básicos en la aplicación de los concretos permeables. Dando conclusión que para una movilidad urbana sustentable la utilización de concretos permeables debe ser una alternativa, ya que atiende requerimientos de infraestructura, manejo y preservación del recurso agua. Esta investigación plantea acciones para mejorar y ampliar las posibilidades de la utilización de pavimentos permeables (Cárdenas Gutiérrez, Albiter Rodríguez, & Jaimes Jaramillo, 2016).

Por otro lado, Hernández, (2017), afirma que, en un estudio realizado en España, se concluyó que el empleo de pavimentos permeables reduce la formación de escorrentía superficial retrasando la llegada del agua lluvia al sistema de saneamiento evitando así las puntas de caudal que causan las inundaciones.

### **5.1.2. Nacionales**

Así, mientras en otros países existen monografías y guías específicas de recomendaciones sobre el diseño y construcción de pavimentos permeables, en Colombia no existen actualmente manuales sobre la aplicación de este tipo de técnicas de construcción sostenible al drenaje urbano, pues en Colombia no es común el uso de concreto permeable, sin embargo, se han realizado algunos estudios independientes en diferentes universidades sobre esta técnica de pavimentación, a continuación, se menciona algunas de ellas:

*“Pavimentos Porosos Utilizados Como Sistemas Alternativos Al Drenaje Urbano”* es una investigación realizada en la Pontificia Universidad Javeriana en el 2013, donde el principal objetivo es realizar una revisión a la literatura de los estudios y aplicaciones sobre los pavimentos porosos para así, describir y analizar los diferentes métodos que existen para el diseño, construcción y mantenimiento de los pavimentos porosos utilizados como métodos alternativos al drenaje urbano. Por otro lado, concluyen que es factible poner en práctica los métodos constructivos puesto que son heredados o derivados de guías y manuales de construcción de pavimentos tradicionales (impermeables) (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013).

*“Principales variables para el diseño y la construcción de pavimentos permeables para su control en origen de la escorrentía urbana”* Monografía realizada en la Universidad de Cartagena (Cartagena – Colombia), la cual trata sobre la utilización de pavimentos permeables como una alternativa para el drenaje de las escorrentías superficiales, la investigación se centra en el desarrollo estructural e hidrológico de estos pavimentos, además de su implementación. Dentro de la literatura que ellos estudian, analizan que este tipo de pavimentos se están utilizando en lugares de poco tráfico, ya sea parqueaderos de vehículos pequeños, senderos y tramos de vías de poca carga (Redondo Polanco & Zúñiga Paez, 2016)

### **5.2. Definición y aplicación**

Las ciudades están creciendo y evolucionando permanentemente, por lo general más rápido que sus sistemas de drenaje pluvial. Combinado con las amenazas del cambio climático, el aumento de la urbanización y el envejecimiento de las redes pluviales (Henonin, Russo, Mark, & Gourbesville, 2013), además el suelo de las ciudades es poco permeable (vías, tejados, cubiertas, etc.), haciendo que el agua corra rápidamente por canales y pavimentos, concentrándose en un corto periodo de tiempo en los sistemas de alcantarillado subterráneos ;esto hace que se genere

un crecimiento en la frecuencia y en la magnitud de las inundaciones debido al aumento de la escorrentía, razón por la cual se disminuye la disponibilidad de superficies permeables, y por consiguiente el descenso en la capacidad de almacenamiento. Es por esto que, cuando se presentan tormentas de menor magnitud y con más frecuencia se pueden generar problemas de inundación (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013).

Actualmente, las ciudades de los países emergentes (como por ejemplo en América Latina) están experimentando una etapa de crecimiento acelerado. Aun así, y debido a diversos factores tanto culturales como económicos, dicho crecimiento no es siempre homogéneo. Los sistemas de alcantarillado y drenaje son una muestra clara de lo anterior, pues a pesar del desarrollo urbano, gran parte de estas ciudades no cuentan con este recurso que le permita drenar adecuadamente las aguas tanto lluvias como residuales (Cediel, 2013, pág. 1).

“Los diseños de los sistemas de drenaje urbano antiguos se realizaron atendiendo a las precipitaciones de la ciudad en ese momento. Con los cambios climáticos que se han venido presentando en las últimas décadas, la intensidad de lluvias ha aumentado. Se estima que cae mayor volumen de agua en menos tiempo, lo que implica que el sistema de drenaje urbano no tiene la misma capacidad de antes y genera mayor frecuencia de inundaciones” asegura Juan Saldarriaga (Saldarriaga, 2014).

Los pavimentos permeables son un tipo de pavimento, que permiten el paso del agua de escorrentía a través de la superficie de rodadura y el almacenamiento temporal de esta en la subbase; para su posterior infiltración en el suelo. Este tipo de pavimento es utilizado principalmente en estacionamientos y calles donde la intensidad del tránsito es bajo, con el propósito de disminuir el escurrimiento superficial procedente del agua de lluvia (Quintana, 2014, pág. 1), y de remover la cantidad de contaminantes que se depositan en los cuerpos de agua naturales por consecuencia de la misma escorrentía que trae consigo sedimentos, hidrocarburos y diversos agentes que se encuentran en las vías (Gómez, 2017, pág. 17).

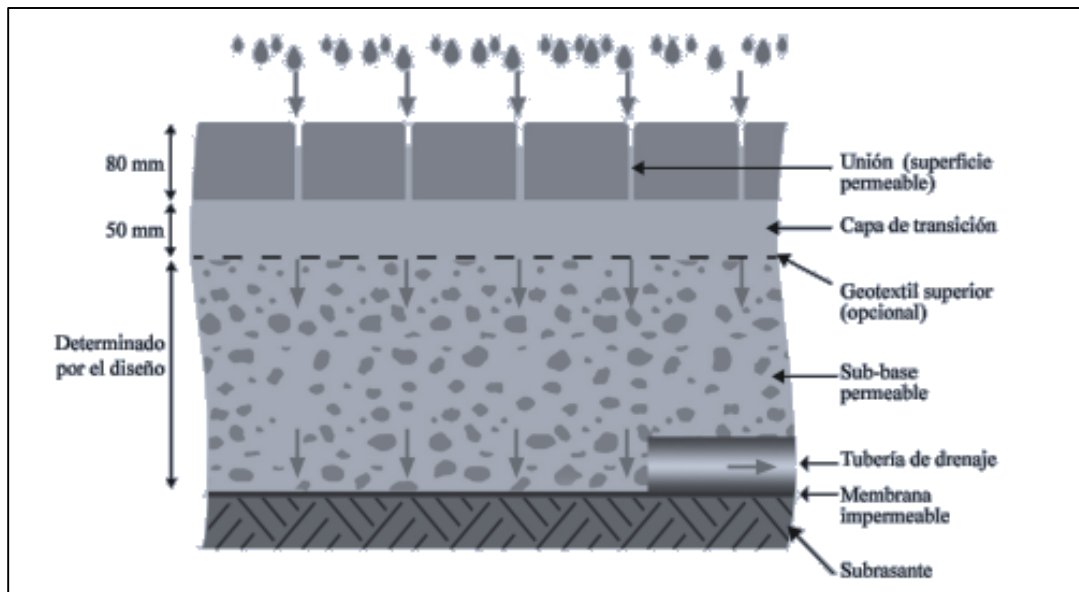
Este tipo de pavimento a pesar de parecer básico es innovador ya que, es un sistema de drenaje alternativo el cual es básicamente una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, con muy bajo contenido de arena y cemento, logrando así un porcentaje de vacíos entre 15% y 20% (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013, pág. 16).

Actualmente existen varios tipos de pavimentos permeables los cuales pueden ser distribuidos en tres categorías: pavimentos de concreto permeable (PCP), pavimentos de asfalto permeable (PAP) y pavimentos articulados permeables (PICP) (Jato, Rodríguez, Castro, & Andrés, 2019, pág. 34). La principal diferencia entre estas categorías es el material con el que se realiza el

diseño y construcción de la capa de rodadura, esto genera que el diseño estructural cambie dependiendo el tipo de pavimento que se escoja. Esta investigación se enfoca en analizar la viabilidad económica y ambiental de los pavimentos de concreto permeable (PCP) y los pavimentos de asfalto permeable (PAP). Para tener claro el concepto general de estos tipos de pavimentos, es primordial describir su estructura interna.

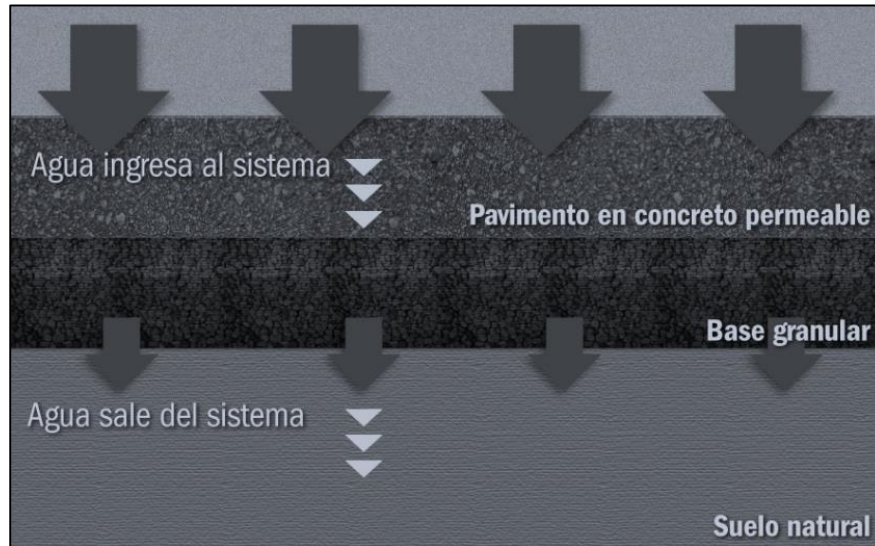
“ La estructura de los pavimentos permeables consiste por lo general en tres capas: a) una superficie de rodamiento que permite la entrada del agua, esta puede ser de diferentes materiales como asfalto, concreto, arcilla, grava, pasto, b) una capa de base de material granular fino, la cual permite una instalación adecuada de la superficie de rodamiento y c) una capa compuesta por una matriz de material granular de gran tamaño o por módulos o geo-células plásticas donde el agua se almacena (subbase)” (Cárdenas Gutiérrez, Albitter Rodríguez, & Jaimes Jaramillo, 2016, pág. 6).

Figura 1 Estructura del pavimento permeable



Nota: La ilustración representa la estructura del pavimento permeable con infiltración total. Adaptado de: *Interpave 2008* por (Castro, E. M. L, 2011).

Figura 2 Pavimento en concreto permeable

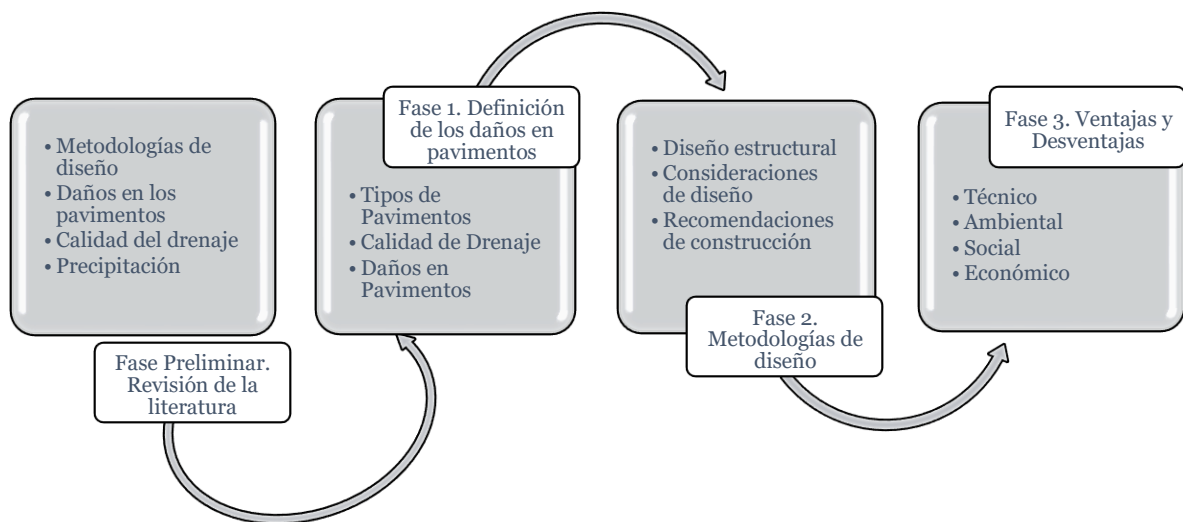


Nota: La ilustración representa la estructura interna del pavimento en concreto permeable. Adaptado de: Revista ARGOS Concreto permeable: Desarrollo urbano de bajo impacto, por (Arango, 2010).

## 6. Metodología

La presente investigación está desarrollada de carácter cualitativo, la cual consiste en analizar, sintetizar y divulgar cierta información. Para dar cumplimiento a los objetivos anteriormente nombrados en este documento, se realizarán de la siguiente manera:

Figura 3 Metodología



Nota: Metodología planteada para el desarrollo de la monografía. Por (Sharon Rebolledo, 2021).

**Fase Preliminar: Revisión de la literatura:** Para el desarrollo de esta fase, se hace una revisión exhaustiva de las diferentes metodologías de diseño utilizadas para pavimentos permeables, definiendo variables y criterios para su definición, así mismo, se determina a través de normas vigentes y proyectos de investigación, cuáles son los principales causantes de los daños en los pavimentos teniendo en cuenta la calidad del drenaje en la ciudad de Villavicencio.

**Fase 1: Definición de los daños del pavimento:** Para el desarrollo de esta fase, se realiza una investigación de los tipos de pavimentos permeables que existen, además se hace una revisión a la calidad de drenaje y los deterioros de las estructuras de pavimentos en la ciudad de Villavicencio.

*Fase 2. Metodologías de diseño:* En el desarrollo de esta fase se lleva a cabo un análisis de las diferentes metodologías y normas para el diseño de los pavimentos permeables, teniendo en cuenta criterios hidrológicos y estructurales.

*Fase 3. Ventajas y desventajas:* En esta última fase se procede a realizar una descripción de las ventajas y desventajas de los pavimentos permeables, teniendo en cuenta aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos.

## 7. Fase 1: Definición de los daños del pavimento

### 7.1. Tipos de pavimentos permeables

El doctor Jorge Rodríguez Hernández en su tesis doctoral clasifica a los pavimentos permeables en dos categorías:

Tabla 1 Clasificación propuesta de pavimentos permeables

	Según el pavimento permeable	Según el destino final del agua
<b>Pavimento permeable discontinuo</b>	Césped o grava con refuerzos	Infiltración
	Adoquines con ranura	Almacenamiento
<b>Pavimento permeable continuo</b>	Mezcla asfáltica porosa	Drenaje diferido
	Losa de concreto hidráulico poroso	

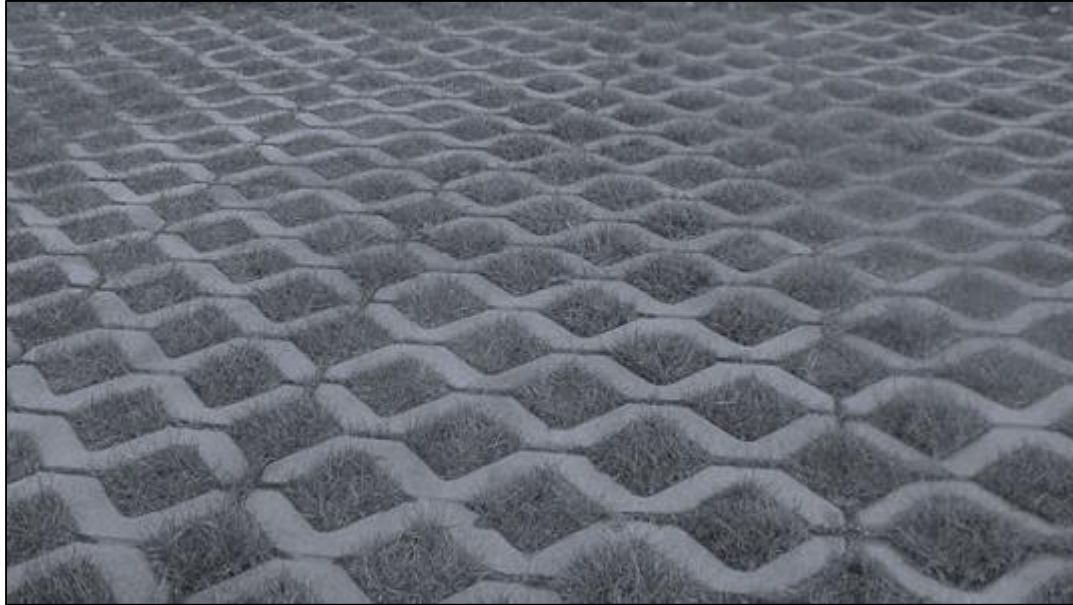
Nota. Clasificación de los pavimentos permeables. Adaptado de (Rodríguez Hernández, 2008).

#### 7.1.1. Pavimentos permeables discontinuos

##### 7.1.1.1. Césped o grava con refuerzos.

Rodríguez Hernández, considera que este es uno de los pavimentos permeables más utilizados actualmente debido a su estética verde con implicaciones ecológicas. No obstante, en España se considera que el césped o grava con refuerzos no hace parte de un pavimento permeable pues, en la mayoría de ellas, el césped está mal conservado y la tierra vegetal en la que se asienta es prácticamente impermeable (2008, pág. 45).

Figura 4 Césped con refuerzos de hormigón



*Nota: La ilustración representa el Césped con refuerzos de hormigón. Adaptado de: Pavimentos Análisis de la influencia de sus selección en hacer ciudad, Por (Cuervo Cuervo, 2018, pág. 21).*

Según Rodríguez Hernández, los refuerzos empleados para permitir el tráfico ligero sobre el césped o la grava pueden ser de: hormigón o plástico. El primero, ofrece mayor resistencia a los esfuerzos tangenciales originados por el tráfico acelerando, frenando y maniobrando, el de plástico permite que las raíces del césped tengan un mejor desarrollo permitiendo así la protección de este.

Figura 5 Césped con refuerzos de plástico



*Nota: La ilustración representa el Césped con refuerzos de plástico. Adaptado de: Pavimentos Análisis de la influencia de sus selección en hacer ciudad, Por (Cuervo Cuervo, 2018, pág. 21).*

#### **7.1.1.2. Adoquines con ranuras.**

Los adoquines con ranuras son bloques prefabricados de hormigón diseñados o dispuestos de forma que la superficie final disponga de canales para la infiltración vertical del agua. Estos canales pueden rellenarse con material drenante o dejarse libres.

En este tipo de pavimentos permeables pueden incluirse también los bloques prefabricados de hormigón poroso. Estos adoquines porosos se encuentran actualmente en desuso debido a su alto coste de producción, siendo sustituidos actualmente por soluciones más baratas como los pavimentos continuos de hormigón poroso impreso, los cuales ofrecen acabados de estética semejante (Rodríguez Hernández, 2008).

*Figura 6 Adoquines de Bloques Montserrat con ranuras libres, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander.*



*Nota: La ilustración representa los adoquines de Bloques Montserrat con ranuras libres, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander. Adaptado de: 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 tráfico ligero, Por (Rodríguez Hernández, 2008).*

### **7.1.2. Pavimentos permeables continuos**

#### **7.1.2.1. Mezclas asfálticas porosas**

Este tipo de pavimento consta de una capa de rodadura, conformada por una mezcla bituminosa de asfalto en pequeñas cantidades y agregados de tamaño grueso uniformemente gradados, reforzado con fibras de polímeros para contrarrestar la pérdida de resistencia por el aumento del porcentaje de vacíos (entre 15% y 20%) (Espinoza, 2011, pág. 36).

El aumento del porcentaje de vacíos permite tener una superficie más permeable por donde el agua se puede infiltrar a la zona de almacenamiento o amortiguamiento, lo que mejora la tracción, la visibilidad, y disminuye la escorrentía superficial cuando ocurren los eventos lluviosos en la zona o vía en donde se es implementado (Espinoza, 2011).

Figura 7 Mezcla asfáltica porosa



*Nota: La ilustración representa el asfalto poroso o drenante. Adaptado de la Revista PUBLIMOTOS, “El interesante Asfalto Poroso o Drenante que trae la nueva generación de carreteras”, Por (Publimotos, 2016).*

Dependiendo del tipo de betún empleado para la fabricación del aglomerado se pueden distinguir dos tipos de mezclas porosas:

- Con betún asfáltico convencional.
- Con betún asfáltico modificado.

En carreteras con baja intensidad de tráfico se emplean mezclas bituminosas porosas fabricadas con betunes convencionales. Estos betunes suelen ser el B 60/70 ó B 80/100, pero no más duros para no perder resistencia al desgaste superficial. Mientras, en vías de alta intensidad de tráfico se emplean ligantes modificados como los betunes BM-3a y BM-3b. Estos betunes con polímeros mejoran la resistencia a la disgregación del aglomerado y mantienen el volumen de huecos a lo largo del tiempo, paliando la densificación debida al tráfico y a las altas temperaturas. El contenido habitual de ligante es del 4,5% sobre árido y la relación filler-betún de 1 a 1,2 (Rodríguez Hernández, 2008).

#### **7.1.2.2. Losa de concreto hidráulico poroso**

La capa de rodadura de este pavimento consiste en una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, y cemento y agua. La mezcla se desarrolla con una relación agua cemento baja para aumentar la resistencia, que al igual que en el primer caso la pérdida de

resistencia es ocasionada por el aumento del porcentaje de vacíos. Esta mezcla ocasiona una estructura porosa de célula abierta por donde el agua puede fluir (Espinoza, 2011).

*Figura 8 Hormigón poroso hidráulico, aparcamiento experimental del Parque de las Llamas, Santander*



*Nota: Adaptado de (Rodríguez Hernández, 2008).*

“Destacan como características fundamentales de un pavimento de mezcla de concreto poroso” (Rodríguez Hernández, 2008) :

- La estructura porosa dependiente de la granulometría y de la dosificación.
- El conglomerante y el aditivo empleado. ○ El espesor de la capa.

## **7.2. Calidad de drenaje en la ciudad de Villavicencio**

Varios estudios realizados, afirman que la ciudad de Villavicencio carece en su mayoría de accesos vehiculares eficientes, óptimos y adecuados para las necesidades propias a satisfacer, es por eso que sus habitantes y constructores, proyectan la construcción de estructuras de pavimentos que den solución a la problemática actual que viven con el deterioro de los accesos vehiculares que tienen, ya que los factores que más afectan a los pavimento son las lluvias y los

cambios de temperatura como se puede observar en la Figura 9. Pues en épocas de invierno principalmente se ha venido produciendo hundimientos del terreno, reducciones en la calzada existente, y sobre saturaciones que han impedido la movilidad normal de vehículos, y que en algunos casos han hecho que se produzcan accidentes, cuando caen a cunetas. Todo esto lleva a pensar que los riesgos de accidentalidad continuarán siempre y cuando no se realicen la construcción de vías y obras de drenaje (Diaz Mora, Coral Jojoa, & Ruiz Quiroga, 2019).

*Figura 9 Glorieta de Postobón- Villavicencio Meta*



*Nota: La ilustración representa las inundaciones en época de lluvias en la ciudad de Villavicencio por falta de obras de drenaje. Adaptado de (Viveelmeta.com).*

Los datos de las precipitaciones en el municipio de Villavicencio en un periodo de 10 años, se obtuvieron de las estaciones SENA y UNILLANOS del IDEAM, sumando las precipitaciones en todos los meses de cada año, y calculando la precipitación media anual (PMA), obteniendo una precipitación de 4013.81 milímetros (mm), los cuales se pueden observar en la Tabla 2 (Romero Segura, 2021).

Tabla 2 Precipitación media anual

<b>Año</b>	<b>PMA (mm)</b>
2010	4125.50
2011	3582.90
2012	4011.30
2013	4304.49
2014	3869.59
2015	3909.00
2016	3804.40
2017	4215.09
2018	4196.85
2019	4118.98
total	4013.81
<b>PMA</b>	<b>4013.81</b>

Nota: Adaptado de (Romero Segura, 2021).

Tabla 3 Temperatura media anual ponderada TMAP

<b>AÑO</b>	<b>TMAP °C</b>
2010	24.2
2011	23.2
2012	24.1
2014	23.8
2015	25.2
2016	22.8
<b>TOTAL</b>	<b>143.3</b>
<b>TMPA (°C)</b>	<b>23.88</b>

Nota: Adaptado de (Romero Segura, 2021).

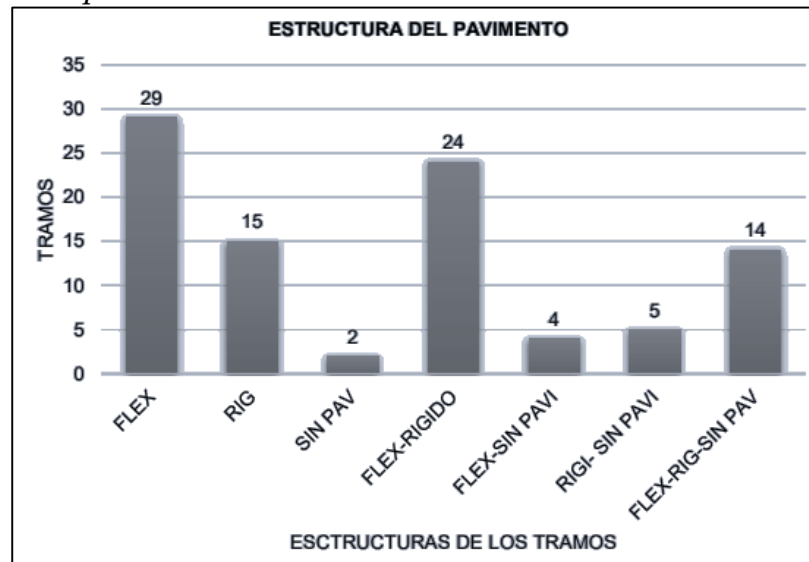
Con base en la temperatura media anual ponderada calculada 23.88 °C y la precipitación media anual 4013.81mm, se determina que Villavicencio es una región climática cálida muy húmeda. Estos datos permiten estimar la abundancia de precipitaciones puesto que, Villavicencio al no contar con suficientes sistemas de drenaje, el nivel de escorrentía superficial se eleva afectando la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos de los suelos de subrasante especialmente como se puede observar en la Figura 9.

### 7.3. Deterioros en las estructuras de pavimento en la ciudad de Villavicencio

Algunas de las vías ya existentes en la ciudad de Villavicencio presentan múltiples problemas, daños y deterioros tanto en su carpeta asfáltica las cuales se pueden evidenciar superficialmente, como en las capas que conforman la estructura. Estos tipos de daños varían de acuerdo a varios factores como es la estructura o resistencia del pavimento, el volumen del tráfico, el tipo de cargas y el clima (Castiblanco Camacho & Torres Daza, 2017).

Según la alcaldía se determina que Villavicencio cuenta con 685.42 Km de malla vial, donde en su mayoría son tramos con estructura de pavimento flexible seguido de tramos con estructura de pavimento flexible/rígido como se muestra en la Figura 9 (Beltrán González & Ramírez Carrero, 2020).

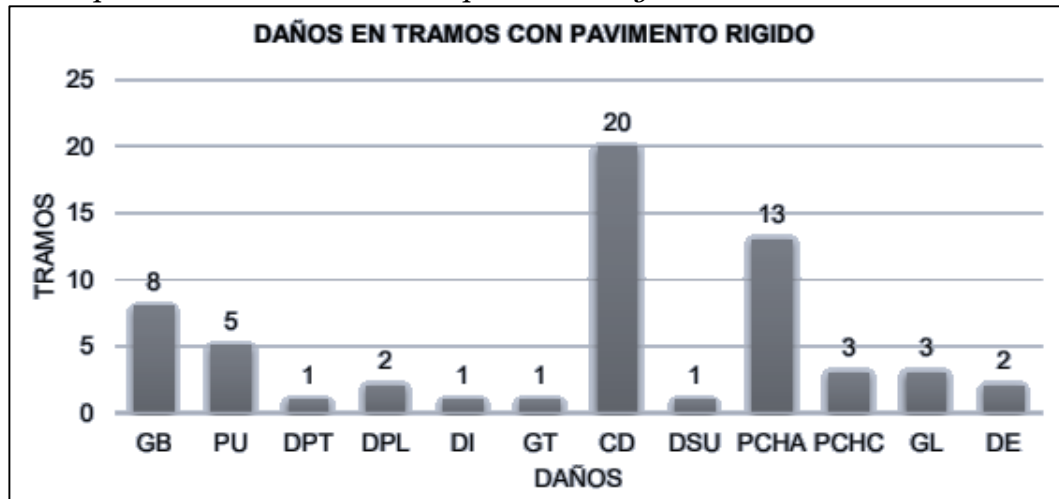
Figura 10 Estructura del pavimento de los tramos estudiados



Nota. Adaptado de: Creación de un sistema de información geográfico a partir de la recopilación de datos del estado del pavimento en la cabecera municipal de Villavicencio – Meta. Por (Beltrán González & Ramírez Carrero, 2020).

Se identifica que dentro de los tramos estudiados con pavimento rígido el daño superficial más frecuente es el de cabezas duras (CD) con 20 tramos, los parches en asfalto (PCHA) con 13 tramos y grietas en bloque (GB) con 8 tramos evidenciado en la Figura 10. Estos daños están asociados usualmente a agregados gruesos inadecuados en la mezcla de pavimento y a deficientes procesos constructivos respectivamente (Beltrán González & Ramírez Carrero, 2020).

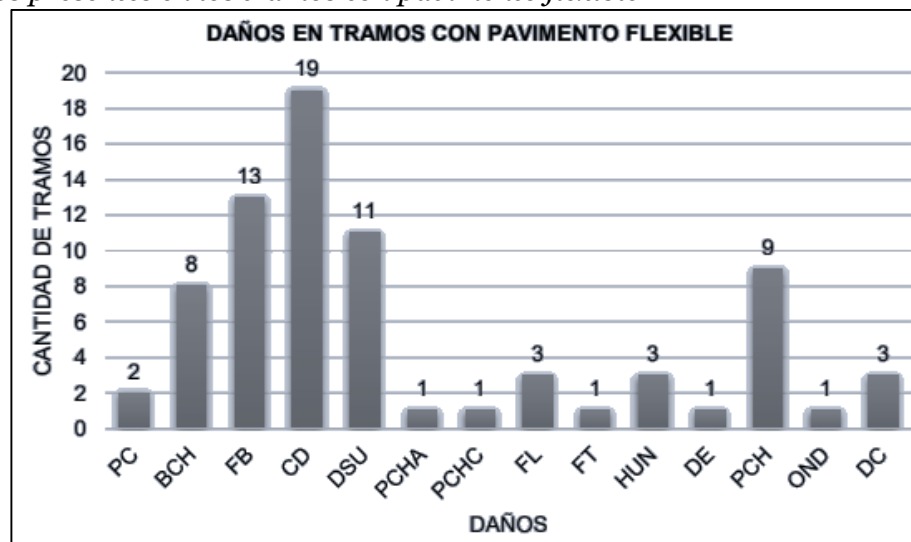
Figura 11 Daños presentes en los tramos con pavimento rígido



Nota. Adaptado de: Creación de un sistema de información geográfico a partir de la recopilación de datos del estado del pavimento en la cabecera municipal de Villavicencio – Meta. Por (Beltrán González & Ramírez Carrero, 2020).

En el pavimento flexible los daños más presentados son: cabeza dura (CD) con 19 tramos y fisuras de borde (FB) con 13 tramos como se evidencia en la Figura 11. Este tipo de daños están asociados a agregados gruesos inadecuados en la mezcla asfáltica y errores en la construcción de apoyos en las bermas respectivamente (Beltrán González & Ramírez Carrero, 2020).

Figura 12 Daños presentes en los tramos con pavimento flexible



Nota. Adaptado de: Creación de un sistema de información geográfico a partir de la recopilación de datos del estado del pavimento en la cabecera municipal de Villavicencio – Meta. Por (Beltrán González & Ramírez Carrero, 2020).

## 8. Fase 2: Metodología de diseño de los pavimentos permeables

En Colombia se ve la necesidad de implementar manuales y recomendaciones sobre el diseño de los pavimentos permeables. En países como Estados Unidos y Reino Unido donde se han empleado los pavimentos permeables, existen normas y manuales sobre el diseño de estos sistemas lo suficientemente consolidados (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013, pág. 32).

A diferencia de los pavimentos convencionales en donde el diseño depende únicamente de la resistencia a la carga aplicada o propiedades mecánicas, a los pavimentos permeables se les agregan factores como permeabilidad y relación de vacíos (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013).

Según el Maryland Stormwater Design Manual - MDE, 2000, para el diseño de los pavimentos permeables se encuentran las siguientes condiciones:

- *Transporte del agua:*

La escorrentía deberá fluir a través de los pavimentos permeables y salir de ellos de una manera segura y no erosiva. La escorrentía de las zonas adyacentes debe ser desviada a un sistema de conducción. Las superficies del pavimento deben tener una permeabilidad de 203.2 mm/h (8 pg/h) o más para conducir el agua a la subbase rápidamente. La pendiente del pavimento permeable deberá ser de al menos 1% pero no mayor a 5%. La parte inferior de la subbase será el nivel para mejorar la distribución y reducir la formación de estancamientos. Una red de tuberías perforadas puede ser utilizada para distribuir uniformemente la escorrentía en la parte inferior de la cama. Tubos perforados también se pueden utilizar para conectar las estructuras situadas dentro de la sección de pavimento permeable (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013, pág. 32).

- *Paisajismo:*

Los árboles y arbustos no deben estar situados junto al asfalto y concreto, ya que puede haber daños causados por la penetración de raíces y la obstrucción de las hojas en el pavimento poroso.

Por otro lado, es necesario llegar a un balance entre el diseño estructural y el hidráulico para de esta manera obtener un sistema óptimo que presente buen comportamiento en ambos aspectos: los dos diseños arrojarán diferentes espesores y el que sea mayor será escogido como el espesor de diseño (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013, pág. 32).

## **8.1. Diseño estructural del pavimento permeable**

El diseño de cualquier pavimento permeable se basa principalmente en ser capaz de gestionar un determinado evento de precipitación, y al mismo tiempo aportar una función estructural. En base a esto, el diseño de un pavimento permeable debe realizarse atendiendo dos criterios: hidrológicos y estructurales (Trujillo López & Quiroz Lasprilla, 2013, pág. 33).

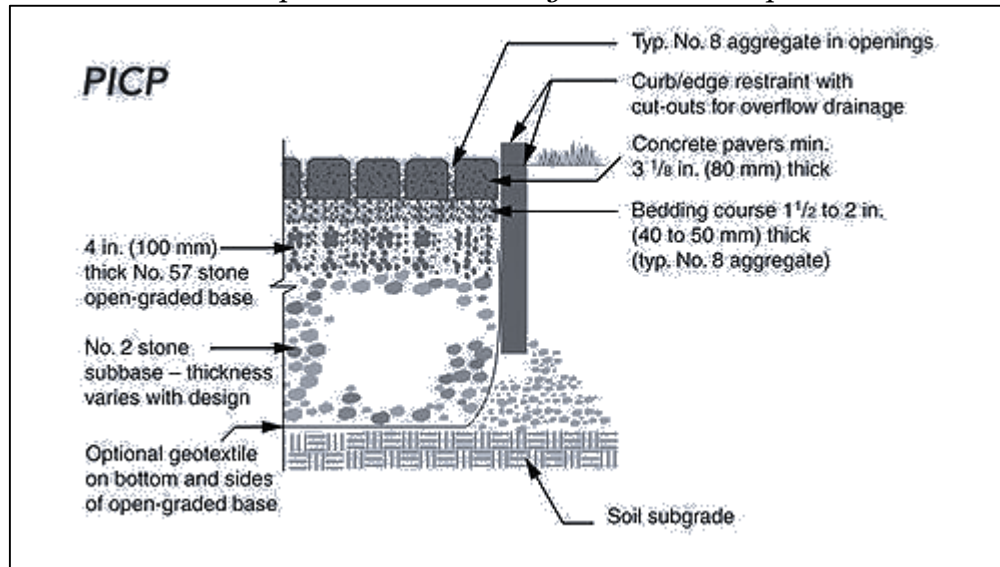
- *Criterios estructurales:* Se encargan de que el sistema ofrezca una resistencia estructural suficiente para soportar ciertas cargas de tráfico de vehículos.
- *Criterios hidrológicos e hidráulicos:* Definen la capacidad de gestionar las aguas de escorrentía urbana de manera eficiente, reteniendo un evento de lluvia deseado, y evacuarlo controladamente hacia el terreno subyacente o al sistema de drenaje en un tiempo entre 24 y 48 horas.

### **8.1.1. Consideraciones de diseño estructural**

El proceso de diseño estructural para los vehículos de soporte varía según el tipo de pavimento seleccionado. La industria del hormigón permeable está en proceso de desarrollar métodos de prueba ASTM para caracterizar las resistencias a la compresión o flexión del hormigón permeable. Estas pruebas son necesarias para modelar la fatiga bajo cargas. Como paso intermedio, las ecuaciones de fatiga publicadas por la Asociación Estadounidense de Pavimentos de Concreto (ACPA 2010) asumen que dichos insumos son comparables en naturaleza (pero no en magnitud) a los utilizados para pavimentos de concreto convencionales (Minnesota Pollution Control Agency, 2021).

El asfalto poroso y los pavimentos entrelazados permeables utilizan métodos de diseño de pavimentos flexibles adoptados de la Guía AASHTO de 1993 para el diseño de estructuras de pavimentos (AASHTO 1993) (Minnesota Pollution Control Agency, 2021).

Figura 13 Sección transversal de pavimento de hormigón entrelazado permeable.



Nota: La ilustración representa la sección transversal típica de un pavimento de hormigón entrelazado permeable y los componentes básicos de un sistema de hormigón permeable. Adaptado de (Minnesota Pollution Control Agency, 2021).

El Manual de aguas pluviales de Minnesota, aclara que independientemente del tipo de pavimento permeable, los métodos de diseño estructural consideran lo siguiente al determinar los espesores de superficie y base para soportar el tráfico vehicular:

- La vida útil del pavimento y las cargas de tráfico totales anticipadas expresadas como cargas equivalentes de un solo eje o ESAL de 8.2 Toneladas (este método de evaluación de cargas tiene en cuenta el desgaste adicional del pavimento causado por los camiones).
- Resistencia del suelo expresada como la relación de carga de California empapada (CBR), valor R o módulo resiliente (Mr).
- Resistencia de los materiales de superficie, base y subbase.
- Factores ambientales que incluyen climas helados y saturación prolongada de la subrasante del suelo (Minnesota Pollution Control Agency, 2021).

### **8.1.2. Consideraciones de diseño hidrológico**

Para realizar el diseño hidrológico e hidráulico es necesario tener el cálculo de la lluvia y el volumen de agua afluente que reúne el pavimento. Para este diseño se debe tener en consideración la topografía y condiciones climatológicas. En las condiciones climatológicas

obtenemos los datos de precipitaciones y así obtenemos la lluvia de cálculo. La topografía nos permite analizar las cuencas drenantes hacia el pavimento que caracteriza principalmente el área y grado de impermeabilidad el cual nos permite determinar el volumen de agua afluyente a recoger por el pavimento (Cruz Balabarca & Rodríguez Salazar, 2020)

El pavimento permeable está sujeto a las siguientes consideraciones de diseño:

*Espacio disponible:* una ventaja significativa del pavimento permeable es su capacidad para combinar la detención / infiltración y el pavimento, lo que reduce o elimina el terreno necesario para las instalaciones de detención. Esto es especialmente importante en áreas urbanas con altos precios de la tierra y sitios altamente desarrollados con poco o ningún espacio para la retención de aguas pluviales (Minnesota Pollution Control Agency, 2021)

*Suelos:* las condiciones del suelo y las tasas de infiltración determinan el uso de un drenaje subterráneo. (Los suelos C o D del Grupo Hidrológico de Suelos (HSG) de NRCS generalmente requieren un drenaje subterráneo, mientras que los suelos HSG A y B a menudo no lo hacen). Los diseñadores deben evaluar las propiedades del suelo existente durante el diseño inicial del sitio con el objetivo de configurar un pavimento permeable que conserve y proteja los suelos. con las tasas de infiltración más altas. En particular, las áreas de suelos HSG A o B que se muestran en los estudios de suelos deben considerarse como ubicaciones principales para todo tipo de prácticas de infiltración (Minnesota Pollution Control Agency, 2021).

García menciona además que, la lluvia de cálculo puede obtenerse mediante la sintetización de una tormenta de diseño (a partir de precipitaciones máximas y curvas IDF), o bien, puede emplearse la serie histórica de eventos. La elección de la tormenta de diseño depende de la función del pavimento permeable, y se caracteriza por su duración (igual al tiempo de concentración de la cuenca, o en su caso, 5 minutos), volumen de precipitación, intensidad y periodo de retorno (habitualmente entre 2 y 10 años) (Cruz Balabarca & Rodríguez Salazar, 2020, pág. 26). Para diseñar hidrológica e hidráulicamente los pavimentos permeables, se debe tomar como referencia los siguientes aspectos:

- Estimar las características de permeabilidad de la capa de pavimento.
- Determinar la capacidad de almacenamiento (proporcionada por la porosidad de la subbase)
- Estimar la necesidad, y en su caso cuantificar la capacidad del drenaje longitudinal adicional.
- Prever la respuesta del pavimento permeables a eventos de lluvia extrema (Cruz Balabarca & Rodríguez Salazar, 2020, pág. 26).

## **8.2. Recomendaciones para la construcción de pavimentos permeables**

El espesor mínimo para soportar el tránsito vehicular ligero en una losa de concreto poroso debe ser de seis pulgadas; a medida que las cargas del tráfico son más pesadas, se requieren losas de mayor espesor (Ferguson, 2005).

El espesor de la subbase se puede aumentar para compensar la carga de tráfico alta, cuando se presenta una subbase blanda, o cuando se requiere proporcionar mayor almacenamiento de aguas lluvias (Ferguson, 2005).

El pavimento permeable debe tener un perfil relativamente plano, es decir pendientes menores o iguales a 5%. Si se aplica sobre una pendiente pronunciada, las aguas lluvias absorbidas por la capa de concreto poroso comenzarán a escurrir en la subbase, generando sub-presiones que pueden dañar las losas. Si las pendientes requeridas son mayores al 1%, se deben construir barreras impermeables perpendiculares al escurrimiento de las aguas (Redondo Polanco & Zúñiga Paez, 2016).

El sistema de vibrado empleado es del tipo “strike off”, o de impacto superficial. Se recomienda en la mayoría de los casos usar un vibrado mecánico en el modo más lento posible. Si se implementan frecuencias de vibrado altas lo más probable es que el concreto se sobre compacte, alterando así las estructuras de los poros y por ende la permeabilidad. Inmediatamente después del vibrado, se debe utilizar un rodillo pesado de acero, del ancho total de la losa, para compactar la mezcla a la altura de las guías. Dependiendo de la consistencia de la mezcla y de la temperatura ambiente, puede necesitarse más de una pasada del rodillo, que debe producir una presión de 4 a 7 ton/m<sup>2</sup>, y debe ser limpiado y aceitado antes de cada pasada (Ferguson, 2005).

La subbase se compacta comúnmente por lo menos entre 90 y 98% de la densidad Proctor. La tasa de infiltración cuantitativa de la subrasante es consecuencia de la gestión de las aguas pluviales del proyecto, antes de la compactación; después de la compactación, la tasa de infiltración del subsuelo se prueba para confirmar los cálculos hidrológicos y el espesor previsto de subbase o losa se ajusta para proporcionar el almacenamiento hidráulico necesario (Ferguson, 2005).

Usualmente no es necesario realizar operaciones de terminación después de la compactación, no siendo recomendables operaciones como pulimento, pues puede obstruir o sellar los poros de la superficie disminuyendo su permeabilidad. No obstante, debe corregirse cualquier defecto superficial inmediatamente de forma manual (Paine, 1992).

Las juntas requeridas en los pavimentos porosos difieren de las convencionales, debido a que el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de un concreto común. El

espaciamiento de los acoplamientos transversales es de aproximadamente 15 a 20 metros. En este caso, los equipos convencionales no son aplicables, debiendo utilizarse un rodillo especial con una hoja filosa. La experiencia ha mostrado que las juntas de dilatación térmica no son necesarias en estos pavimentos (Paine, 1992).

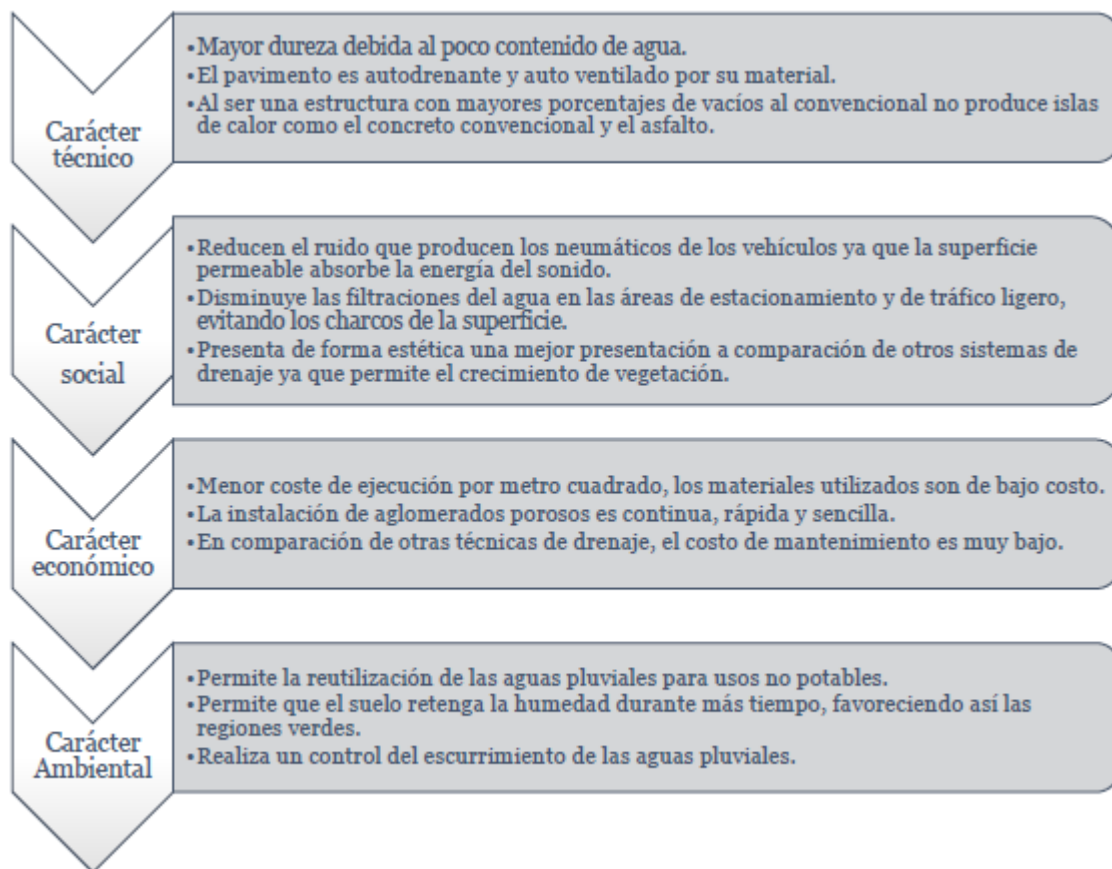
El curado es uno de los elementos fundamentales para obtener un pavimento con las condiciones deseadas. Este proceso requiere una mayor atención y cuidado que el que se tiene en los pavimentos de concreto convencionales, debido a la gran superficie de contacto del concreto con el ambiente. Un incorrecto proceso de curado en los primeros 7 días puede reducir la durabilidad de la superficie en un 60%. El proceso de curado debe comenzar inmediatamente después de compactar y producir las juntas transversales, el método más utilizado para realizar el procedimiento es cubrir la superficie de pavimento y los costados con una membrana de polietileno (Paine, 1992).

## 9. Fase 3: Ventajas y desventajas

### 9.1. Ventajas

Como se ha mencionado anteriormente, los pavimentos permeables pertenecen a los sistemas de drenaje urbano sostenible, ofreciendo muchas ventajas como tales. De este modo se presentará la organización de las ventajas que se obtienen en la implementación de pavimentos permeables, clasificándolas en criterios de carácter técnico, social, ambiental y económico (Cruz Balabarca & Rodríguez Salazar, 2020).

Figura 14 Ventajas

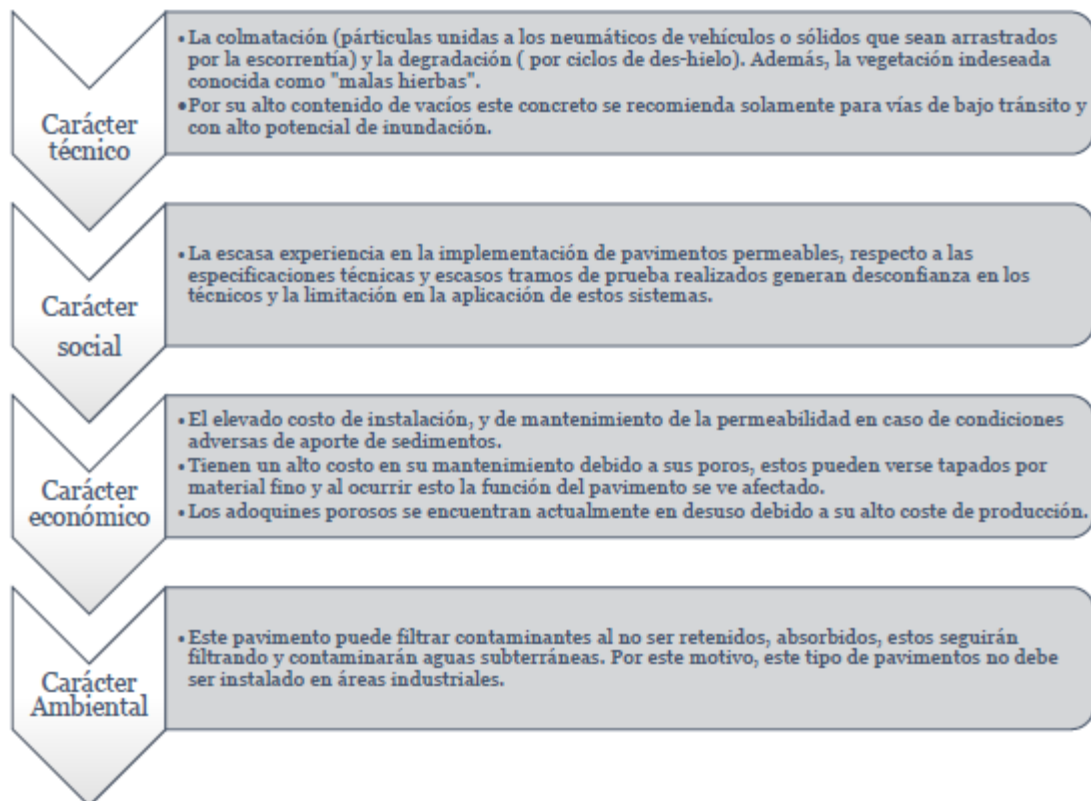


Nota: Ventajas de los pavimentos permeables, adaptado de (Cruz Balabarca & Rodríguez Salazar, 2020).

## 9.2. Desventajas

Del mismo modo en que se han presentado las ventajas de los pavimentos permeables, se presentan a continuación sus desventajas según los aspectos técnicos, sociales, ambientales y económicos.

Figura 14 Desventajas



Nota: Desventajas de los pavimentos permeables, adaptado de (Cruz Balabarca & Rodríguez Salazar, 2020).

## 10. Resultados e impacto

### 10.1. Resultados

Tabla 4 Tabla de resultados

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Viabilidad de implementación de esta técnica y desventajas, conclusiones	Resultados e impacto, ventajas	Responde al objetivo general de
Revisión de literatura	Documento en general	Responde al objetivo específico 1.
Clasificación de los pavimentos deterioros de las estructuras de pavimento según la calidad de drenaje en Villavicencio	Tipos de pavimentos permeables Calidad de drenaje y deterioros en las estructuras de pavimentos en Villavicencio	Responde al objetivo específico la 2.
Metodologías de diseño	Diseño estructural, consideraciones hidrológicas y estructurales	Responde al objetivo específico 3.
Ventajas y desventajas según la literatura 4.	Ventajas y desventajas	Responde al objetivo específico

*Nota: Resultados obtenidos de la revisión teórica. Por (Sharon Rebolledo, 2021)*

### 10.2. Impactos

#### Impacto académico

Este documento servirá como información y guía para proyectos futuros relacionados con la temática.

#### Impacto ambiental

El pavimento permeable tiene diferentes beneficios ambientales en comparación con el pavimento convencional utilizado en las vías, el cual es impermeable. Dentro de los beneficios se puede resaltar que este es permeable, permitiendo así el paso del agua a través de la estructura

contribuyendo a la recarga de acuíferos y reduciendo la cantidad de agua en los sistemas de drenaje, de manera que esta pueda ser almacenada y reutilizada.

Este pavimento aporta sostenibilidad en cuanto al manejo de aguas lluvias, las cuales pueden ser tratadas como un recurso, esto ha hecho que este tipo de pavimento sea considerado como un sistema de drenaje urbano sostenible ya que su desarrollo es de bajo impacto.

### **Impacto económico**

El uso del pavimento permeable permite la posibilidad de eliminar parcial o totalmente las obras de drenaje convencionales (cunetas, sistemas de alcantarillado, etc.), además el sistema de drenaje pluvial disminuye en vías de tráfico ligero y estacionamientos, evitando la escorrentía en la superficie. El pavimento permeable presenta un mayor tiempo de vida útil y un menor costo de mantenimiento comparado con el pavimento convencional.

## **11. Conclusiones**

- En Colombia se ve la necesidad de implementar manuales y recomendaciones sobre el diseño de los pavimentos permeables, ya que en otros países que han implementado esta técnica de pavimentación, existen normas y manuales sobre el diseño de estos sistemas lo suficientemente consolidados.
- Con base en la temperatura media anual ponderada calculada 23.88 °C y la precipitación media anual 4013.81mm, se determina que Villavicencio es una región climática cálida muy húmeda. Estos datos permiten estimar la abundancia de precipitaciones puesto que, Villavicencio al no contar con suficientes sistemas de drenaje, el nivel de escorrentía superficial se eleva afectando la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos de los suelos de subrasante
- El pavimento permeable evidencia un impacto económico y la elaboración de este es más factible y sencillo, ya que su elaboración requiere de pocas cantidades de materiales.
- La implementación de esta tecnología como una alternativa de drenaje urbano en la ciudad de Villavicencio, es ideal para el aprovechamiento del agua pluvial ya que esta cuenta con una precipitación anual bastante elevada, por lo que genera deterioros en las estructuras de pavimento. Además, este al permitir el paso del agua a través de la estructura contribuiría a la recarga de acuíferos, a reducir los costos en mantenimiento e instalación, y reduciría la cantidad de agua en los sistemas de drenaje de manera que esta sea almacenada y reutilizada.

## 12. Referencias

- Arango, I. C. (2010). *Concreto permeable: Desarrollo urbano de bajo impacto*. Obtenido de Grupo Argos: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/concreto-permeabledesarrollo-urbano-de-bajo-impacto>
- Beltrán González, M. P., & Ramírez Carrero, A. (2020). *Creación de un sistema de información geográfico a partir de la recopilación de datos del estado del pavimento en la cabecera municipal de Villavicencio Meta*. Obtenido de Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás- Facultad de Ingeniería Civil: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/31957/2021monicabeltran.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cárdenas Gutiérrez, E., Albitzer Rodríguez, Á., & Jaimes Jaramillo, J. (14 de Diciembre de 2016). *Pavimentos permeables, una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua*. Obtenido de Proyecto académico sin fines de lucro- Universidad Autónoma del Estado de México, México: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/104/10450491009/10450491009.pdf>
- Castiblanco Camacho, T. C., & Torres Daza, S. J. (2017). *Estudio del estado patológico de la malla vial mediante inspección visual en el municipio de Villavicencio, comuna 2*. Obtenido de Practica social y empresarial, Universidad Cooperativa de Colombia: [https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/14345/1/2017\\_estudio\\_estado\\_patol%c3%b3gico\\_.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/14345/1/2017_estudio_estado_patol%c3%b3gico_.pdf)
- Cediel, J. S. (2013). *Retención de aguas lluvias a nivel predial para reducir picos y volúmenes de escorrentía*. Obtenido de Proyecto de grado Facultad de Ingeniería Civil- Universidad de los Andes : <https://pavcowavin.com.co/retencion-de-aguas-lluvia-para-reducirvolumenes-de-escorrentia>
- Cruz Balabarca, R., & Rodríguez Salazar, M. A. (2020). *Análisis del espesor total del paquete estructural de pavimentos permeables expuestos a tráfico medio y a intensidad de precipitación menor a 100m/h, En molinopampa- Amazonas y en temuco región de la Araucanía*. Obtenido de Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería civil- Universidad Ricardo Palma: [http://repository.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/3682/CIV-To30\\_73905140\\_T%20%20%20CRUZ%20BALABARCA%20RENZO.pdf?sequence=1](http://repository.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/3682/CIV-To30_73905140_T%20%20%20CRUZ%20BALABARCA%20RENZO.pdf?sequence=1)
- Cuervo Cuervo, S. (16 de Enero de 2018). *Pavimentos, análisis de la influencia de su selección al hacer Ciudad*. Obtenido de Trabajo de grado- Universidad Politécnica de Madrid: [https://oa.upm.es/50279/1/TFG\\_Cuervo\\_Cuervo\\_Sonia.pdf](https://oa.upm.es/50279/1/TFG_Cuervo_Cuervo_Sonia.pdf)

- Díaz Mora, C. D., Coral Jojoa, D. A., & Ruiz Quiroga, L. H. (2019). *Diseño de obras de drenaje de la estructura vial para el condominio parcelación caracolí ubicada en el KM 3 vía del amor de la ciudad de Villavciencio*. Obtenido de Trabajo de grado Universidad Cooperativa de Colombia- Facultad de Ingeniería Civil: [https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/7732/1/2019\\_dise%C3%B1o\\_obras\\_drenaje.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/7732/1/2019_dise%C3%B1o_obras_drenaje.pdf)
- Eduardo García Haba, S. P.-D. (2009). *Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos*. Obtenido de Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA). Área de Hidráulica e Hidrología. Universidad Politécnica de Valencia: <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/a596.pdf>
- Espinoza, M. L. (6 de Diciembre de 2011). *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. Obtenido de Monografía- Facultad de Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana : <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7483/tesis599.pdf?sequence=1>
- Esquerre García, M. M., & Silva Silva, H. W. (10 de Marzo de 2019). *Propuesta de diseño de pavimento drenante para la captación de aguas lluvia en zonas urbanas del Norte de Perú*. Obtenido de Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas: [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/625617/EsquerreG\\_M.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/625617/EsquerreG_M.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Ferguson, B. K. (2005). *Porous Paviment*. Boca Ratón, Florida : CRC Press,Taylor & Francis Group.
- Fernández, I. C. (2009). *Reducción de escurrimientos pluviales mediante la utilización de pavimentos de concreto permeable*. Obtenido de Tesis doctoral, Universidad Autónoma de México- Programa de maestría y doctorado Ingeniería: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2903/cibrianfernandez.pdf?sequence=1>
- Gómez, J. S. (2017). *Evaluación técnica, ambiental y económica de pavimentos asfálticos drenantes en Colombia*. Obtenido de Trabajo de grado- Facultad de Ingeniería civil Universidad EIA: [https://repository.eia.edu.co/flip/index.jsp?pdf=/bitstream/handle/11190/2096/GonzalezJuan\\_2018\\_EvaluacionTecnicaAmbiental.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eia.edu.co/flip/index.jsp?pdf=/bitstream/handle/11190/2096/GonzalezJuan_2018_EvaluacionTecnicaAmbiental.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Henonin, J., Russo, B., Mark, O., & Gourbesville, P. (Julio de 2013). *Real-time urban flood forecasting and modelling – a state of the art*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/257343281\\_Realtime\\_urban\\_flood\\_forecast\\_ing\\_and\\_modelling\\_-\\_A\\_state\\_of\\_the\\_art](https://www.researchgate.net/publication/257343281_Realtime_urban_flood_forecast_ing_and_modelling_-_A_state_of_the_art)
- Higuera Sandoval, C. H. (Noviembre de 2011). *Mecánica de pavimentos. principios básicos UPTC*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a23591baee8c73fc>
- Jato, E. D., Rodriguez, H. J., Castro, F. D., & Andrés, V. V. (Marzo de 2019). Pavimentos urbanos permeables. *Revista de obras públicas*, 32-36. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/333134479\\_Pavimentos\\_urbanos\\_permeables](https://www.researchgate.net/publication/333134479_Pavimentos_urbanos_permeables)
- Minnesota Pollution Control Agency. (20 de Mayo de 2021). *Design criteria for permeable pavement*. Obtenido de Minnesota Stormwater Manual: [https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Design\\_criteria\\_for\\_permeable\\_pavement](https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Design_criteria_for_permeable_pavement)
- P.E., M. O. (Febrero de 2008). ¿Is pervious Concrete Ready For structural Applications? *Structure Magazine*, 48-49. Obtenido de <https://www.structuremag.org/wpcontent/uploads/2014/08/D-Insights-Pervious-concrete-Offenberg-Febo81.pdf>
- Paine, J. (1992). *Portland cement pervious pavement construction*. USA: Concrete Construction Journal.
- Publimotos. (2016). El interesante Asfalto Poroso o Drenante que trae la nueva generación de carreteras. *PubliMotos*. Obtenido de <https://publimotos.com/index.php/noticia/actualidad/1241-las-grandes-utilidades-delasfalto-poroso-o-drenante-que-trae-la-nueva-generacion-de-calles>
- Quintana, E. d. (2014). Pavimentos Porosos. *Revista Construcción y Tecnología en concreto, México*, 1. Obtenido de <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/septiembre2014/posibilidades.pdf>
- Redondo Polanco, L., & Zúñiga Paez, L. F. (Octubre de 2016). *Principales variables para el diseño y la construcción de pavimentos permeables para su control en origen de la escorrentía urbana*. Obtenido de Tesis de postgrado- Facultad de Ingeniería Universidad de

- Cartagena: [https://es.slideshare.net/luisfernandozuigapae/monografia-principalesvariables-para-el-diseo-de-pavimentos-permeables-udc?from\\_action=save](https://es.slideshare.net/luisfernandozuigapae/monografia-principalesvariables-para-el-diseo-de-pavimentos-permeables-udc?from_action=save)
- Rodríguez Hernández, J. (11 de Julio de 2008). *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*. Obtenido de Tesis doctoral- Universidad de Cantabria. Departamento de Transportes y Tecnología De Proyectos y Procesos: <https://www.tdx.cat/handle/10803/10711#page=68>
- Romero Segura, J. A. (2021). *Proyecto de aplicación en temáticas de ingeniería diseño de la estructura de pavimento rígido para el barrio mi llanura en Villavicencio- Meta*. Obtenido de Proyecto de grado, Universidad Santo Tomás- Facultad de Ingeniería Civil: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/34976/2021jairoromero.pdf?sequence=9>
- Saldarriaga, J. (18 de Noviembre de 2014). *Ciudades permeabilizadas evitarían inundaciones*. Obtenido de Red de desarrollo Sostenible: <https://www.rds.org.co/es/novedades/ciudades-permeabilizadas-evitarianinundaciones>
- Trujillo López, A., & Quiroz Lasprilla, D. P. (Diciembre de 2013). *Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano*. Obtenido de Proyecto de investigación- Pontificia Universidad Javeriana: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11174/TrujilloLopezAlejandra2013.pdf?sequence=1>
- Vela Tafur, E., & Cruz Goñas, L. (2018). *Pavimentos permeables como sistema alternativo para el drenaje urbano en la localidad de Molinopampa, Amazonas, 2018*. Obtenido de Trabajo de grado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza: <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/UNTRM/2071>
- Vigil Sánchez, M. E. (Mayo de 2012). *Diseño, proceso constructivo y evaluación post construcción de un pavimento rígido de concreto permeable*. Obtenido de Trabajo de grado, Universidad del salvador- Facultad de Ingeniería y Arquitectura: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3929/1/Dise%C3%B1o,%20proceso%20constructivo%20y%20evaluaci%C3%B3n%20post%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20pavimento%20r%C3%ADgido%20de%20concreto%20permeable.pdf>

