

S.U.D.S En Bicicarriles Como Solución Para Drenaje Vial.



JORGE HUMBERTO BENAVIDES SANTAMARÍA

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Infraestructura Vial



Bogotá D.C., Colombia

2024

S.U.D.S En Bicicarriles Como Solución Para Drenaje Vial.



JORGE HUMBERTO BENAVIDES SANTAMARÍA

Ingeniero **Guillermo Jesús Acuña Robles**

Director Proyecto

Ingeniera **Mónica Yasmín Rueda Pinto**

Co-Directora Proyecto

Trabajo de Grado realizado para obtener el Título de Magister en Infraestructura Vial.

Universidad Santo Tomás

Bogotá D.C., Colombia

2024

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

A mi hijo, motor de mis luchas y logros, a mi esposa
compañera de vida, amor y apoyo incondicional, a mi
mamá quien me ha brindado todo su amor y mi madrina,
quien su recuerdo y enseñanzas siempre me acompañan.

AGRADECIMIENTOS

A mis respetados directores Guillermo y Mónica quienes, con su invaluable dedicación, tiempo y conocimiento, guiaron y enriquecieron este proyecto de investigación. Su apoyo desinteresado y sus valiosos aportes fueron fundamentales para alcanzar este logro.

CUADRO DE CONTENIDO

CUADRO DE CONTENIDO	VI
LISTA DE CUADROS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
1 RESUMEN	1
2 INTRODUCCIÓN.....	3
3 JUSTIFICACIÓN.....	7
4 OBJETIVOS	10
4.1 Objetivo General.....	10
4.2 Objetivos específicos	10
5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
6 ESTADO DEL ARTE	14
7 METODOLOGÍA	21
7.1 Selección del área de estudio.	23
7.2 Selección del modelo.....	23
7.3 Selección de los materiales.	24
7.4 Diseño de la estructura de SUDS	25
7.5 Modelo hidráulico.	25
7.6 Resultado del modelo.	26
7.7 Proceso constructivo.....	26
8 DESARROLLO DEL MODELO.	27
8.1 Zonas de estudio.	27
8.2 Análisis de localización de SUDS	32
8.2.1 Tasa de infiltración.....	32
8.2.2 Pendiente del terreno.....	34
8.2.3 Nivel freático.....	35

8.2.4	Distancia a los cimientos	37
8.2.5	Capacidad de almacenamiento de agua del suelo superficial	40
8.2.6	Restricción para la implementación del tipo de SUDS	43
8.3	Metodología de evaluación y selección de SUDS	45
8.3.1	Mejoramiento de la calidad del agua.....	45
8.3.2	Control de volúmenes de agua lluvia.	47
8.3.3	Amenidad y conflictos de uso.....	47
8.3.4	Mantenimiento.	48
8.3.5	Costos.	49
8.4	DISEÑO DEL PAVIMENTO	51
8.4.1	DISEÑO HIDROLÓGICO.....	53
8.4.1.1	Diseño hidrológico del SUDS en pavimento poroso.....	55
8.4.1.2	DESARROLLO DEL DISEÑO DE ESTRUCTURA DEL SUDS.....	68
8.4.1.2.1	Determinación del CBR	70
8.4.1.2.2	Determinación de tráfico.	70
8.4.1.2.3	<i>Diseño de la estructura con pavimento de asfalto poroso</i>	<i>72</i>
8.4.1.2.4	<i>Diseño de pavimento en concreto poroso (permeable)</i>	<i>81</i>
8.4.1.3	MODELACIÓN DEL SUDS	84
9	PROCESO CONSTRUCTIVO	108
9.1	PRECONSTRUCCIÓN.....	109
9.2	CONSTRUCCIÓN	110
9.3	DETALLES CONSTRUCTIVOS	121
10	CONCLUSIONES.....	123
11	RECOMENDACIONES.....	126
12	BIBLIOGRAFÍA.....	127

LISTA DE CUADROS

Tabla 8.1.	Restricciones para implementación de Pavimentos Permeables.	43
Tabla 8.2.	Eficiencia de remoción de contaminantes	46
Tabla 8.3	Procesos de filtración y sorción.....	46
Tabla 8.4	Evaluación según eficiencia de reducción de escorrentía.....	47
Tabla 8.5.	Calificación tipologías según contribución a la amenidad	48
Tabla 8.6.	Calificación tipologías según conflictos de uso.....	48
Tabla 8.7.	Calificación tipologías según frecuencia de mantenimiento	49
Tabla 8.8.	Costos cualitativos para pavimentos permeables	50
Tabla 8.9.	Áreas de drenaje	63
Tabla 8.10.	Resistencia del suelo en función del CBR.....	67
Tabla 8.11.	Mínimo espesor de pavimento poroso para varias condiciones de carga	67
Tabla 8.12.	Clasificación del tráfico (Eason & Shook, 2002).....	71
Tabla 8.13.	Espesores mínimos típicos para capas de asfalto poroso	75
Tabla 8.14.	Tabla de resumen de resultados de características hidráulicas del colector. Modelo SWMM.....	94
Tabla 8.15.	Resumen resultados de caudales colector.....	98
Tabla 8.16.	Resumen resultados de caudales colector.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1. Implementación de SUDS en etapa de Estudios y diseños y etapa de construcción.	12
Figura 7.1. Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo.	22
Figura 7.2. Esquema tipo de estructura de pavimento permeable.	24
Figura 8.1. Distribución espacial de la precipitación para el área urbana con base en 47 estaciones ubicadas en Bogotá.	28
Figura 8.2. Bicicarril AC 57 entre carrera 16 y diagonal 61B – Zona de Chapinero.	29
Figura 8.3. Fotografía bicicarril AC 57.	30
Figura 8.4. Bicicarril AK 7 entre calle 94 a calle 106.	30
Figura 8.5. Fotografía bicicarril AC 7.	31
Figura 8.6. Tasas de infiltración en Bogotá.	33
Figura 8.7. Clasificación de pendientes de la zona urbana de Bogotá.	34
Figura 8.8. Clasificación del nivel freático para la ciudad de Bogotá.	36
Figura 8.9. Distancias cimentaciones para la ciudad de Bogotá.	38
Figura 8.10. Sección vial tipo A2. Secretaría Distrital de Planeación.	40
Figura 8.11. Sección vial tipo A1. Secretaría Distrital de Planeación.	40
Figura 8.12. Capacidad relativa de almacenamiento de agua en el suelo superficial con duración de 6 horas y periodo de retorno de 10 años.	41
Figura 8.13. Áreas potenciales para pavimentos porosos.	44
Figura 8.14. Costos cualitativos para pavimentos permeables.	50
Figura 8.15. Diagrama de flujo para el diseño de pavimentos permeables.	52
Figura 8.16. Representación de las precipitaciones en condiciones “actuales” y con el modelo.	58
Figura 8.17. Mapa de distribución espacial de h_p propuesto para la ciudad de Bogotá.	60
Figura 8.18 Áreas de drenaje corredores carrera 7	62
Figura 8.19 Configuración de la estructura en función de la operación.	64
Figura 8.20. Materiales para rodadura propuestos para bicicarriles.	65
Figura 8.21. Clasificación de USCS subrasante – Avenida Carrera 7 entre CL 34 y CL 182 – Calzada oriental.	69

Figura 8.22. CBR Subrasante en condición sumergida subrasante – Avenida Carrera 7 entre CL 34 y CL 182 – Calzada oriental.....	69
Figura 8.23 Gráfica de Burmister. Deflexión superficial de dos capas.....	79
Figura 8.24 Capas de la estructura final del SUDS con rodadura en asfalto	81
Figura 8.25. Diseño de estructura con pavimento permeable.	83
Figura 8.26 Capas de la estructura final del SUDS con rodadura en concreto	84
Figura 8.27 Parámetros curva IDF para el estudio.....	86
Figura 8.28 Curvas IDF sector de la calle 100 con carrera 7.....	87
Figura 8.29 Hietograma sector calle 100 a diagonal 108.....	88
Figura 8.30 Modelo SWMM corredor carrera 7 entre calle 100 y diagonal 108.	89
Figura 8.31 Perfil colector existente para el pico del evento.	90
Figura 8.32 Modelo SWMM corredor carrera 7 entre calle 100 y diagonal 108, con áreas de drenaje de sumideros. Condición 2.	92
Figura 8.33 Perfil colector con áreas de drenaje de sumideros.....	93
Figura 8.34	95
Figura 8.35 Modelo SWMM corredor carrera 7 entre calle 100 y diagonal 108, con áreas de drenaje de los sumideros del corredor. Condición 3.	96
Figura 8.36 Perfil colector con áreas de drenaje de sumideros.....	97
Figura 8.37 Comparación de los perfiles de la lámina de agua en los colectores para la condición 2 y 3.....	99
Figura 8.38 Curva caudal Vs tiempo sin SUDS - pozos PMCI 126709 – PMCI 126698....	101
Figura 8.39 Curva caudal Vs tiempo con SUDS - pozos PMCI 126709 – PMCI 126698 ..	102
Figura 8.40 Curva caudal Vs tiempo sin SUDS - pozos PMCI 127029 – PMCI 131356....	103
Figura 8.41 Curva caudal Vs tiempo con SUDS - pozos PMCI 127029 – PMCI 131356 ..	104
Figura 8.42 Hidrogramas realizados en Auckland para ensayos de pavimentos permeables. Fassman y Blackburn.	106
Figura 9.1 Etapas de proceso constructivo.	111
Figura 9.2. Drenajes, pozos y de inspección y sistemas de fusibles para bicirreles. SUDS Av. San Francisco Javier. Distrito Santa Justa – San Pablo. Sevilla.	116
Figura 9.3. Colocación y compactación de agregados.....	117
Figura 9.4. Sección transversal modelo tipo bicirrele.....	121

Figura 9.5. Planta diseño tipo bicicarril.	122
--	-----

1 RESUMEN

Esta tesis de grado presenta una alternativa para la problemática de la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en proyectos de infraestructura vial, la cual se genera principalmente por las interferencias con las redes de servicios públicos que son una limitante para la localización de las diferentes estructuras de SUDS y sus respectivas descargas. Por lo anterior, se desarrolla un modelo conceptual con base en una de las tipologías de SUDS desarrolladas en el país, tomando como elemento de implantación los bicirreiles y empleando como rodadura pavimentos porosos flexibles y de concreto.

Para el desarrollo del modelo se procedió a realizar el análisis de diferentes normativas a nivel mundial que contemplan el uso de estructuras de SUDS, que utilizan pavimentos porosos como elemento filtrante, con el fin de determinar los procesos de diseños y materiales a emplear en la estructura y asimismo establecer las capas que conforman el SUDS

Una vez se estableció la metodología de diseño, se procedió con el diseño de las capas que conforman la estructura, pasando por la capa filtrante y la rodadura. Esta última se diseñó bajo los criterios técnicos de la normativa nacional para que el modelo propuesto se amolde a las exigencias técnicas del país.

Para finalizar, y teniendo en cuenta que este tipo de estructura de SUDS no han sido homologados en el país, se presenta un proceso constructivo en el cual se tienen en cuenta las diferentes etapas que se deben surtir para la ejecución de una obra civil de este tipo y los aspectos que se deben considerar de mantenimiento y operación.

ABSTRACT

This Master's thesis presents an alternative to the challenges of implementing Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in road infrastructure projects. The main challenge arises from the interference with public utility networks, which limits the placement of various SUDS structures and their respective discharges. Therefore, a conceptual model is developed based on one of the SUDS typologies developed in the country. Bicycle lanes are chosen as the implementation element, and porous flexible and concrete pavements are employed as the rolling surface.

To develop the model, an analysis of various global regulations that address the use of SUDS structures utilizing porous pavements as a filtering element was conducted. The aim was to determine the design processes and materials to be used in the structure and establish the layers that make up the SUDS structure.

Once the design methodology was established, the layers comprising the structure were designed, including the filtering layer and the rolling surface. The latter was designed according to the technical criteria of national regulations to ensure that the proposed model complies with the country's technical requirements.

In conclusion, considering that this type of SUDS structure has not been standardized in the country, a construction process is presented. This process considers the different stages required for the execution of such civil works, along with aspects related to maintenance and operation.

2 INTRODUCCIÓN

El cambio climático a nivel mundial cada día ha impulsado a las metrópolis urbanas alrededor del mundo a buscar reorientar su desarrollo a entornos urbanos sostenibles(Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2021). Prueba de ello, es la afectación que se presenta por efecto de alta pluviosidad en los cada vez menos regulares regímenes de lluvias, los cuales pueden ser por influencia externa como cambios en la geometría de la órbita de la tierra, incidencia de los rayos solares a la superficie terrestre, etc., o por influencia interna como la deriva continental, cambios en la composición atmosférica, procesos antrópicos y otras causas de origen propio del comportamiento del planeta (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] – Universidad Nacional de Colombia [UNAL] .2018). Sin embargo, para nadie es un secreto que este cambio que se está generando es causado en gran parte por una larga y acelerada intervención antrópica(Useros, 2013).

Colombia por encontrarse en una zona tropical, hace que su clima sea influenciado por los efectos climáticos de los océanos Pacífico y Atlántico, aunado a los fenómenos de la Niña y el Niño que generan unos comportamientos atípicos en las variables pluviométricas en las regiones Andina, Pacífica y Atlántica del país. Bajo este panorama se prevé que, de acuerdo con algunos estudios desarrollados a nivel internacional, hacia finales del siglo XXI habrá unas reducciones de caudales medios en febrero y un aumento en julio en las cuencas del Magdalena y Cauca (Nakaegawa & Vergara,2010). A nivel regional la cuenca de la zona Andina, Pacífico y Caribe, son quienes serían más afectadas por los efectos en el aumento en las precipitaciones, mientras que, en la región oriental se mantendría un comportamiento cercano a lo normal (Montealegre,

2014). Para la ciudad de Bogotá, se prevé un aumento de las lluvias entre el 6.57% al 8.27% en los años 2040 a 2100 (Secretaría Distrital de Planeación [SDP], 2022) .

Las ciudades capitales del país no han sido ajenas a las consecuencias del cambio climático. El 19 de abril de 2017, Manizales sufrió afectada por varios deslizamientos por las lluvias que se presentaron. El 31 de marzo de 2017 se desbordaron los ríos que Mocoa, Sangoya y Mulatos, los cuales generaron una inundación importante en la ciudad de Mocoa. El 8 de octubre de 2018, se provocaron inundaciones en 10 barrios de la ciudad de Ibagué, y así se pueden ir citando los efectos de las fuertes precipitaciones que ocasionan graves inundaciones en las ciudades de Colombia, los eventos naturales de mayor frecuencia para el periodo 1998 – 2021 fueron las inundaciones, que sumados a los deslizamientos y vendavales representan el 94% de los eventos naturales ocurridos en el país (Ayala & Ospino, 2023) . En consecuencia con lo anterior, en los periodos de lluvias, es cada vez más recurrente ver como los corredores viales se ven afectados por causa de los altos picos de los aguaceros, generando constantes inundaciones por la baja eficiencia de la infraestructura pluvial existente, la cual se ve insuficiente ante los caudales generados, permitiendo que los excesos sean almacenados en las vías mientras el aguacero transita y permite que en tiempos muy largos los niveles de agua vayan descendiendo para ser conducidos por la infraestructura tradicional de alcantarillado existente, evidenciando su ineficiencia ante estos fenómenos climáticos.

En la ciudad de Bogotá, se han ido introduciendo tecnologías con enfoque sostenible en las obras de infraestructura vial, específicamente los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS), cuya finalidad se puede resumir en dos objetivos fundamentalmente, el primero es el “reducir los volúmenes de escorrentía superficial que son descargados directamente a los cuerpos receptores y el segundo, en mejorar la calidad de agua pluvial durante su captación, detención, conducción,

filtración y/o retención” (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, [EAAB]). La implementación de estos sistemas de drenaje puede llevarse a cabo dado que la ciudad cuenta con una infraestructura de alcantarillado con un nivel de desarrollo adecuado y organizado que permite que se tengan puntos de conexión y descarga.

Ahora bien, de acuerdo con lo establecido en la norma técnica NS-166 de la EAAB, se tienen normatizados 7 tipos de estructuras tipo SUDS para su implementación en las obras de infraestructura de Bogotá. De estas 7 tipologías se implementan 3 en los diseños, pero solo dos de estos son los que se han podido construir en las obras que ha adelantado el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), en la ciudad (Cámara Colombiana de la Construcción, CAMACOL, 2020).

Por todo lo anterior, para el desarrollo de este trabajo se presenta una tipología adicional de SUDS para el drenaje de la infraestructura vial, empleando como corredor para su implantación los bicicarriles y/o ciclorrutas de la ciudad de Bogotá, empleando pavimentos permeables como estructura de rodadura. Con este modelo proyectado se evaluará su diseño, capas que conformen su estructura y el presupuesto, con el fin de poder ser implementados en futuros proyectos de infraestructura en los corredores viales de la ciudad y que pueda implementado en otras ciudades del país.

La metodología de análisis del modelo de SUDS propuesto se realiza mediante lo establecido en la Norma Técnica NS-166 de la EAAB, con el fin de enmarcar los requisitos de presentación y

aval por parte del IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) que es la entidad encargada en el Distrito de la aprobación de esta infraestructura en los proyectos viales que se desarrollan en la ciudad.

3 JUSTIFICACIÓN

La Ciudad de Bogotá se encuentra en un proceso de transformación de los medios tradicionales de transporte hacia sistemas alternativos, con lo cual se busca principalmente mejorar dos aspectos, los tiempos de viajes de los ciudadanos y mejorar la calidad del aire. Para lograr las dos metas descritas anteriormente se pretende buscar que un mayor número de ciudadanos se desplacen en bicicleta, con lo cual, los tiempos de recorrido pueden disminuir y adicionalmente se evita el uso del vehículo particular, por lo tanto, para que esto suceda se requiere ampliar la red de ciclorrutas y bicicarriles con la que cuenta la ciudad en la actualidad (Mayorca, 2021).

Por otro lado, uno de los aspectos que hacen parte del plan de desarrollo de la ciudad es tema de cambio climático. Es por esto por lo que dentro de las políticas públicas de desarrollo de la ciudad se contempla los conceptos de adaptación y mitigación al cambio climático, establecido en el propósito 2 del documento (Nuevo Contrato Social y Ambiental Para El Siglo XXI, Plan de Desarrollo Distrital 2020 - 2024, 2020).

“Entre los mayores impactos del cambio climático que se presentan en las ciudades es la modificación que se presenta en los patrones de temperatura y/o lluvias, que pueden alterar la cantidad, intensidad y frecuencia de los eventos extremos hidrometeorológicos como lluvias, descargas eléctricas, granizo, entre otros” (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, 2020).

Ahora bien, una de las alternativas que se han venido adaptando a este último aspecto, es la implementación de sistemas sostenibles de drenaje que permitan mitigar el efecto climático sobre la ciudad y principalmente sobre la infraestructura vial y de espacio público. Es aquí donde toma relevancia el tema de los SUDS, que son estructuras con diferentes características que permiten un grado de flexibilidad en lo relacionado con su localización, permitiendo implementarlos en diferentes espacios de la ciudad y para el caso particular de los proyectos de infraestructura vial y espacio público, son una solución que permite mitigar el impacto de las lluvias en los sistemas de drenaje tradicional y en muchos casos contribuyen con el paisajismo de los proyectos (Abellán , 2020).

En este sentido, para los proyectos de infraestructura vial y espacio público que se desarrollan en la ciudad de Bogotá, se tiene como uno de los requisitos técnicos dentro de los términos de referencia de los contratos la implementación de SUDS, sin embargo, a la hora de ejecutar las obras las interferencias con las redes de servicio público no permiten la construcción de estas estructuras que operan como un sistema de drenaje alternativo.

Como consecuencia de lo anterior, es necesario presentar una alternativa adicional de un modelo de SUDS que permita su implementación en los diferentes proyectos de infraestructura vial, y el cual ofrezca mayor facilidad para su incorporación mediante la localización con relación a las obras proyectadas y existentes, así como la accesibilidad para los puntos de descarga y/o infiltración.

Es así como surge el proyecto de la implementación de un SUDS en zona de Bicicarriles y/o ciclorrutas, toda vez que esta infraestructura cuenta con corredores exclusivos y en muchos casos son corredores libres de redes de servicios públicos, por lo cual presentaría una ventaja inicial para evitar los posibles cruces con tuberías de servicios públicos y banco ductos de operadores de telecomunicaciones. Por otra parte, cuentan con una sección transversal y longitudinal que permite grandes longitudes para el desarrollo de SUDS, amentando así las posibilidades de captación, retención, infiltración, almacenaje y control de las aguas superficiales.

A partir de esto, uno de los materiales que se requiere para la operación de SUDS en estos tipos de corredores de acuerdo con el modelo a implementar, son los pavimentos porosos, los cuales permiten la filtración de la escorrentía superficial hacia las demás capas filtrantes. Este material, se puede encontrar principalmente dos tipos para el uso proyectado que son en asfalto poroso y concreto poroso, los cuales no son de uso masivo en el medio colombiano toda vez que su precio en el mercado es alto con relación a los mismos materiales no permeables. Actualmente los concretos permeables solo se producen bajo pedido y está disponible principalmente en dos de las concreteras más importantes del país, el valor estimado de metro cúbico de concreto a valor

presente aproximadamente es de \$514.400¹ pesos, (Gómez, 2018). Asimismo, el precio estimado del asfalto poroso a valor presente aproximadamente es de \$1'240.100², (González, 2017).

Con el uso del pavimento poroso como rodadura para bicirreiles y/o ciclerrutas, podría generarse un uso mayor del material lo cual generaría una baja en los costos de producción y por ende de la tecnología.

Por lo tanto, el diseño de un modelo de SUDS para zonas de bicirreiles y/o ciclerrutas se puede considerar como una alternativa para una mayor aplicabilidad a los sistemas de drenaje alternativo en proyectos de infraestructura vial y de espacio público, adicionalmente puede generar una mayor demanda de pavimentos porosos lo cual podría conllevar a una producción más económica del material.

Finalmente, como parte del análisis del modelo propuesto se establece el manejo del agua captada por la estructura, la cual puede ser para infiltración hacia el suelo, retención o una combinación de las dos, pero siempre buscando la eficiencia del sistema y de los sistemas tradicionales sin generar afectaciones a las infraestructuras adyacentes.

¹ Valor traído a valor presente del año 2018.

² Valor traído a valor presente del año 2017.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer el diseño conceptual de un SUDS para el drenaje de infraestructura vial y espacio público empleando los bicicarriles y/o ciclorrutas.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la configuración de la estructura para la tipología de SUDS propuesta.
- Evaluar la viabilidad de implementar SUDS en la estructura de calzadas vehiculares con bicicarriles.
- Evaluar el impacto del tipo de SUDS propuesto en el drenaje de las vías.

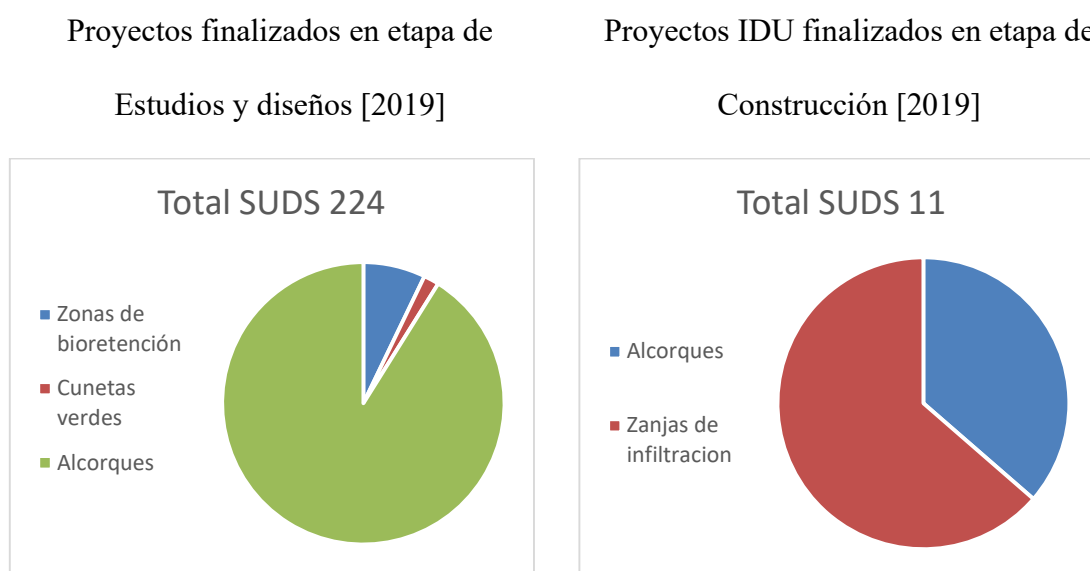
5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las ciudades colombianas y particularmente en Bogotá, la disponibilidad de espacios para la implementación de Sistemas de Drenajes Sostenibles (SUDS) como un sistema de apoyo a la infraestructura tradicional para el drenaje vial y de espacio público, se ve limitado por las interferencias con las redes de servicios públicos existentes y proyectadas. En el pasado, con la expansión y desarrollo de las ciudades en el país, se generó un crecimiento de la demanda de servicios públicos, sin embargo, no se tuvo la visión de establecer una adecuada planeación en la construcción e instalación de redes de la infraestructura de servicios públicos por parte de las diferentes empresas prestadoras del servicio, lo cual generó que se instalaran sin un control técnico y en muchos casos sin un adecuado récord de obra o as built como se denomina actualmente (Hernández - Gordo, 2018). Mediante la Ley 388 de 1997, la cual ordena a los municipios adoptar los Planes de Ordenamiento Territorial, estos reglamentan la localización de la infraestructura de redes de servicios públicos, con lo cual se empezó a contar con un inventario georreferenciado de la infraestructura de redes instaladas por las diferentes empresas en las ciudades colombianas.

En Bogotá para las diferentes obras de infraestructura vial y de espacio público que se ejecutan, uno de los factores que priman en los presupuestos de los proyectos es el costo del traslado de redes de servicio público (Hernández - Gordo, 2018). Estos antecedentes hacen que en muchos casos los traslados de las redes existentes impidan que se puedan llevar a cabo las conexiones nuevas (alivios, by-pass y descoles) para los sistemas de drenaje tipo SUDS normatizados por la EAAB, lo cual ocasiona que sea inviable su implementación en los proyectos de infraestructura vial que se desarrollan en la ciudad.

La incorporación de estructuras tipo SUDS en los proyectos nuevos de infraestructura vial que se ejecutan anualmente en el Distrito es muy baja con relación a los que se diseñan en las etapas de Estudios y Diseño. Para el año 2019, en los proyectos IDU se tenían definidos en etapa de diseño 224 SUDS a implementar, sin embargo, se construyeron 11 (Martínez - Molina, 2019).

Figura 5.1. Implementación de SUDS en etapa de Estudios y diseños y etapa de construcción.



Fuente: Secretaría de Ambiente de Bogotá (2020)

A nivel nacional, el rezago en la implementación de sistemas de drenaje sostenible es aún más preocupante, toda vez que no hace parte de una política pública ambiental de las ciudades capitales. Sin embargo, mediante la Resolución 0799 del 9 de diciembre de 2021, del MVCT, se establecen los lineamientos para la implementación de SUDS en los proyectos de drenaje pluvial que se desarrollen en el país. Luego de un proceso de investigación sobre normativa local en empresas de servicios públicos, secretarías distritales, corporaciones autónomas regionales y/o casos de implementación de SUDS en las principales ciudades colombianas, no se encontró

información que permita determinar una política pública para la implementación de esta tecnología en otras ciudades colombianas.

Bajo esta óptica, si bien los estudios desarrollados por la Universidad de Los Andes para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá cuentan con una variedad de tipologías de SUDS para su posible implementación en la ciudad y particularmente para los proyectos de infraestructura vial, las interferencias con las redes de servicios públicos y la falta de disponibilidad de espacio en las zonas de espacio público de la ciudad dificultan su construcción. En la ciudad de Bogotá la principal alternativa para la localización de las estructuras de SUDS se centra en la utilización de las zonas de espacio público y zonas verdes, sin embargo, no se suele analizar la viabilidad de la utilización de las calzadas vehiculares como una alternativa para la localización de SUDS, más aun con el aumento en la demanda de bicicarriles y ciclorrutas que se viene presentando en la ciudad y que se proyecta que para el 2024 la ciudad cuente con 830 kilómetros construidos.(Consejo de Bogotá - Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020).

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de presentar una alternativa que permita generar nuevos espacios para la implementación de SUDS en las ciudades que carecen de zonas para implantarlos y alivianar la problemática generada por las redes de servicios públicos. Es así como se busca la implementación en zonas de calzadas vehiculares de espacios para la localización de SUDS permita que estos puedan tener una menor posibilidad de interferencias para su implantación y conexiones en los diferentes proyectos de infraestructura vial.

6 ESTADO DEL ARTE

El efecto del cambio climático día a día está incrementando las alteraciones en la intensidad, frecuencia y tipos de precipitación de las lluvias a nivel mundial (Thakali - Sajjad, 2016). Es por esto lo que en un futuro cercano se deberán reevaluar los conceptos de diseño de sistemas de drenaje teniendo en cuenta que se podrán presentar variaciones en conceptos como los periodos de retorno, los cuales impactan directamente los periodos de diseño de las obras hidráulicas (Mailhot - Duchesne, 2010).

Por otra parte, estos cambios en los comportamientos de las lluvias a nivel global generan que la infraestructura para drenaje pluvial existente comience a ser insuficiente y presente una operación deficiente. Un ejemplo de esto es el estudio que se realizó en la ciudad de Valencia, España, con relación a la eficiencia de los tanques tormenta que existen en la ciudad bajo condiciones de variabilidad climática, (Doménech et al., 2012). Como conclusión del estudio se demostró la necesidad de rediseñar los tanques tormenta como consecuencia de los efectos del cambio climático por la falta de capacidad de las estructuras para amortiguar el pico de los eventos de lluvia.

De acuerdo con el IDEAM, el estimado del crecimiento de las lluvias en la ciudad de Bogotá para los años 2040, 2070 y 2100, será de 6.57%, 9.53% y 8.27(Montealegre, 2014), el cual puede variar en función de la localidad de la ciudad. Estas variaciones son asociadas también al desarrollo urbanístico, principalmente por el endurecimiento de las superficies, generado por la necesidad de nuevos espacios de vivienda y sus respectivos equipamientos urbanos. Esta pérdida de superficies verdes genera una caída en la infiltración del agua y un incremento en las láminas

de agua superficiales, las cuales ocasionan las inundaciones en zonas urbanas.(Salas Pérez et al., 2019).

El desarrollo e investigación de sistemas alternativos de drenaje, a nivel local y nacional es significativamente más bajo que en países europeos o asiáticos, particularmente en china, en donde se pueden encontrar sin número de artículos relacionados con esta temática debido principalmente a los impactos que ha sufrido el país a causa del cambio climático.

Por otra parte, a nivel de estudio del cambio climático con enfoque al sistema de drenaje urbano, han surgido conceptos tales como Mejores Prácticas de Gestión (BPG) o su sigla en inglés (BMP), Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) e infraestructura Verde (IV) o su correspondiente en inglés (GI). Asimismo, han surgido también prácticas con un enfoque sostenible como las de Diseño Urbano Sensible al agua (DUSA) o su equivalente en inglés (WSUD) o la de Desarrollo de Bajo Impacto (DBI) o su sigla en inglés (LID). Todos estos conceptos han dado pie para para los diferentes estudios enfocados en el diseño de infraestructura que permita mitigar el impacto del clima sobre la infraestructura y poblaciones. A mediados de la segunda década del siglo XXI, se comienza con el estudio de los SUDS a nivel local, en la ciudad de Bogotá, con la introducción de la investigación de tipologías y/o tecnologías de SUDS que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá (Díazgranados et al., 2015). Con base en esta investigación la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá implementó la norma técnica NS-166 (EAAB, 2018), mediante la cual se definen los tipos de SUDS que pueden ser implementados en para los proyectos de infraestructura vial que se desarrollen en la ciudad.

Con el desarrollo de estos documentos, inicia una serie de proyectos de grado enfocados principalmente en la implementación de SUDS en diferentes zonas de la Ciudad. Un ejemplo de esto es el trabajo desarrollado para el diseño de la esorrentía en la carrera 9 entre calle 108 y 112, en el sector de Usaquén (Cano Salazar, 2022), en el cual se desarrolla la determinación de la solución del drenaje en el sector mediante la implementación de SUDS, realizando un análisis general de todas las tipologías homologadas por la EAAB. Otro similar es el trabajo realizado para el planteamiento de un sistema de drenaje en el sector de la Autopista Norte con calle 127, en la ciudad de Bogotá (Camargo - Lozada, 2018), mediante el empleo de un tren de SUDS (combinación de diferentes tipos de SUDS en un solo proyecto) de acuerdo con las normas vigentes de la Empresa de Acueducto de Bogotá.

Asimismo, se ha generado procesos investigativos enfocados al tema de los materiales con los cuales se pueden construir los SUDS, con el fin de buscar no solo su función de retención de caudales, sino como elementos con carácter filtrante para la retención de sustancias presentes en el agua pluvial que potencialmente pueden llegar a generar contaminación de las aguas subterráneas (Sanchez, 2020).

Con relación a la normativa vigente con la cual se reglamenta la implementación de los sistemas de SUDS en la ciudad de Bogotá, la norma técnica NS-166 de la EAAB define los criterios de diseño a emplear para la inclusión de sistemas alternativos de captación de agua lluvia en nuevos proyectos de desarrollo urbano como los de infraestructura vial. A nivel nacional, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio expidió la Resolución 0799 de 2021, en la cual en el artículo 44

expone las disposiciones para la implementación de SUDS en nuevos desarrollos urbanos (Resolución 0799 de 2021, 2021). Las anteriores normativas, son las dos reglamentaciones que se tienen a nivel local en la ciudad de Bogotá y nacional respectivamente, mediante las cuales se establecen la implementación de sistemas de drenaje tipo SUDS para nuevos proyectos de infraestructura, sin embargo, la implementación de estos sistemas de drenaje están sujetos una serie de variables técnicas, financieras y administrativas que determinan la viabilidad para cada proyecto en particular, lo cual hace que la incorporación como una solución de drenaje alternativo en los proyectos de infraestructura no sea de carácter definitivo, obligatorio ni perentorio en el país, y en la ciudad de Bogotá se llega a etapa de diseño, pero no en todas a ejecución.

A nivel nacional los procesos de investigación no presentan un panorama muy alentador, toda vez que los sistemas alternativos de drenaje están siendo aun objeto de los primeros análisis tanto a nivel académico como a nivel físico. En el año 2020, se desarrolló un trabajo de grado para la implementación de un tren de SUDS para la reducción y eficiencia del manejo de las aguas lluvias en el campus de la sede de Floridablanca de la Universidad Santo Tomás, (Cañas & Gutiérrez, 2020). Con este trabajo se plantea una alternativa para la implementación de estos sistemas de drenaje alternativo en predios y/o áreas urbanizables para vivienda, comercio o institucionales.

En la ciudad de Barranquilla, sin embargo, se hizo un enfoque diferente en el estudio de SUDS buscando un ángulo diferente a los que se han desarrollado en ciudades como Bogotá, Bucaramanga y Villavicencio. La ciudad durante años ha sido golpeada por el efecto de crecientes súbitas, conocidas comúnmente como arroyos en algunos sectores de la ciudad, los cuales generan una problemática social y de bienestar en los habitantes, sin mencionar el impacto

económico que representan las pérdidas de bienes y enseres de los habitantes ubicados en los corredores adyacentes a estos arroyos y que se ven afectadas por estos fenómenos invernales. Estos eventos generaron la realización de una investigación relacionada con la disposición de pago de la ciudadanía para la implementación de SUDS en la ciudad como infraestructura alternativa para la mitigación de arroyos en la ciudad de Barranquilla (Castro, 2015). El documento desarrolla la disponibilidad que muestra la comunidad a pagar por un sistema de drenaje alternativo que ayude a la disminución de los caudales superficiales que se presentan por las lluvias, y que estos no retornen a las vías una vez sean captados. La disposición de pago va en función de variables como el estrato, posibles incentivos que dé la Administración Distrital den para su construcción, etc. Así las cosas, el estudio permite desarrollar un estudio para un modelo más robusto y que pueda ser extrapolado a otras ciudades del país.

El caso latinoamericano no es más alentador que el colombiano. Son muy pocas las incursiones prácticas y académicas que se pueden registrar en el continente. La implementación de sistemas de drenaje alternativos con el fin de tener una mejor gestión del agua y manejo del recurso hídrico no ha sido puesta en práctica en los diferentes países del continente. El Banco mundial a través de la iniciativa Blue Water Green Cities (Agua azul para ciudades verdes) incluyó a las ciudades latinoamericanas de Buenos Aires (Argentina), Bogotá (Colombia), Sao Paulo (Brasil), Tegucigalpa (Honduras), Aracajú (Brasil) y Asunción (Paraguay), para brindar apoyos económicos y técnicos con el fin de promover la Gestión Integral del Agua Urbana (IUWM en inglés).

Así las cosas, en Argentina diferentes entidades a nivel nacional estimulan el uso de alternativas de SUDS para ser implementados en diferentes partes del territorio y se generan documentos de trabajos de grado de diferentes universidades enfocados en la importancia de implementación y los beneficios que traen estas estructuras. (SRUR, 2020).

En el Brasil, ciudades como Curitiba hacen desarrollos en implementación de estructuras de bioretención, por lo cual esta ciudad lidera en el país el concepto de desarrollo sostenible. Así las cosas, se comienza en diferentes ciudades el estudio de la viabilidad de implementación de sistemas de drenaje SUDS en diferentes zonas, las cuales son objeto de estudios mediante trabajos de grado. En estos casos, las investigaciones no se limitan al estudio de las posibles zonas de implementación de estructuras tipo SUDS, sino de forma paralela se realizan análisis mediante modelos matemáticos y de comportamiento de los SUDS en diferentes condiciones. En la Ciudad de San Carlos se tomó un análisis a partir de una serie de hipótesis para determinar el comportamiento e impacto de los SUDS en diferentes condiciones, analizado mediante los softwares BERENICE y HEC – HMS, demostrando los beneficios que se generan con esta infraestructura en zonas con condiciones urbanizadas y su impacto en el comportamiento en el pico de lluvias de los aguaceros de diseño (Rosa, 2016).

Otra línea de estudio realizado a nivel Latinoamérica es relacionada con el análisis de la implementación de SUDS a nivel factibilidad en condiciones de zonas áridas y semiáridas con el fin de permitir la resiliencia de las ciudades ante inundaciones en eventos de lluvia extrema. Estos estudios se enfocan en los análisis de costo Beneficio mediante la modelación de sistemas de SUDS evaluando materiales, tipos de filtrado y retención, lo cual repercute en la eficiencia de

la infraestructura. Esto es un insumo del análisis para los tomadores de decisión, entidades de planeación urbana y gubernamentales en la implementación de esta tecnología en la infraestructura Urbana. Este caso particular fue desarrollado en la ciudad de Mexicali, en la zona de Baja California en México. (Sagatume, 2021)

A nivel global, en los denominados países desarrollados como los europeos, Estados Unidos y China, se encuentran innumerables publicaciones, estudios y desarrollos técnicos en la implementación de sistemas alternativos de drenaje. Los efectos climáticos que afectan a estos países han conducido a que se desarrollen estos productos buscando mayor eficiencia en el uso de materiales, nuevas alternativas e introduciendo normativas enfocadas en la reglamentación y uso de SUDS en ciudades, buscando que estas cambien sus enfoques y se alineen con los objetivos de la agenda 2030 de la UN (PNUD, 2021).

La implementación de SUDS con pavimentos permeables en el país no es atractiva desde el punto de vista económico por el costo del pavimento, sin embargo, encontrando los corredores viales para la implementación en bicicarriles se puede llegar a generar una mayor demanda del material lo cual repercutiría en una posible baja en los costos de producción. El diseño presentado en este trabajo da una guía metodológica para su diseño y construcción en aras de dar un primer paso para la implementación de estas estructuras en la infraestructura vial como se ha hecho en otros países y así analizar los beneficios de las estructuras como una alternativa sostenible del drenaje vial.

7 METODOLOGÍA

Para la planeación del presente trabajo de grado, se establece una metodología que permita desarrollar los objetivos propuestos en este estudio, delimitando una serie de pasos o ítems que permitan llegar al resultado del modelo y la viabilidad para el estudio de su implementación en proyectos de infraestructura vial. Teniendo en cuenta los aspectos descritos anteriormente y con base en las características de la investigación, se puede establecer que la metodología para el desarrollo de la investigación se encuentra enmarcada desde lo cuantitativo, puesto que reúne las características de un proyecto medible (Cerdeña, 2015). Esta metodología puede ser descriptiva, dado que se hace una descripción de los procesos que se desarrollan a través de la investigación mediante la explicación de estos (Perico-Granados et al., 2020).

Por otra parte, de acuerdo con la definición dada por Hurtado, se puede enmarcar como una investigación proyectiva, la cual “tiene como objeto diseñar o crear propuestas dirigidas a resolver determinadas situaciones.” (Hurtado, 2010).

La metodología establecida para el desarrollo del proyecto se presenta en la **Figura 7.1**.

Figura 7.1. Metodología propuesta para el desarrollo del trabajo.



7.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Con el fin de identificar una zona que cumpla con las características adecuadas para el análisis hidrológico, hidráulico, técnico y constructivo del tipo de SUDS a proponer, se seleccionaron dos zonas de la ciudad de Bogotá que en la actualidad cuentan con corredores disponibles de bicicarril y que adicionalmente, tienen infraestructura de alcantarillado pluvial que permitan una posible conexión de la red proyectada con la existente. De acuerdo con las características anteriormente descritas, se analizarán dos corredores viales que actualmente cuentan con un sistema de bicicarriles, el primero es el corredor de la Avenida Gilberto Alzate Avendaño (AC 57) entre la Avenida Caracas (AK 14) y Diagonal 61B, la cual cuenta con un bicicarril en las calzadas norte y sur de la Avenida. El segundo corredor es el de la Avenida Alberto Lleras Camargo (AK 7) entre la Avenida Carlos Lleras Restrepo (AC100) hasta el Canal Molinos, localizado en la calle diagonal 108 A. En este último corredor el bicicarril existente se encuentra en la calzada oriental de la AK 7 entre la calle 106 y AC 100. La selección del corredor se realizará con base en la metodología establecida en la norma técnica NS-166 de la Empresa de Acueducto de Bogotá.

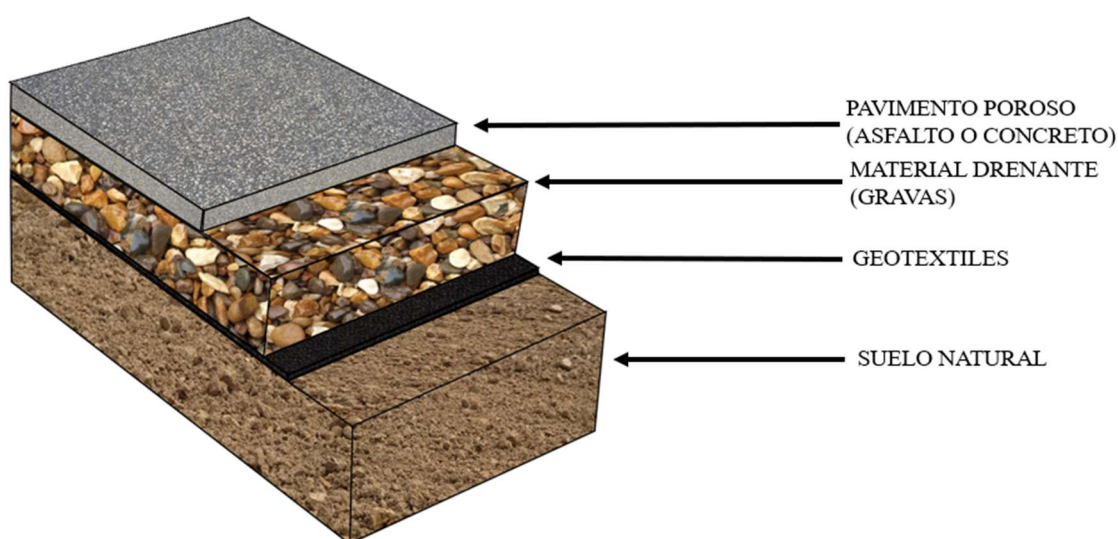
7.2 SELECCIÓN DEL MODELO.

De acuerdo con los estándares de modelos establecidos en la norma técnica NS-166 de la Empresa de Acueducto de Bogotá y otras normas empleadas a nivel internacional, se encontró un modelo tipo que permite su implementación a nivel local y nacional. Para ello se tendrán en cuenta criterios técnicos como tipo de suelo, localización con respecto a la vía, infraestructura de alcantarillado que permita su conexión y los materiales para la configuración del SUDS. Asimismo, se consideraron aparte los criterios de diseño hidráulico y los criterios de diseños de pavimentos, toda vez que el modelo analizado se hizo con dos materiales diferentes de la capa de

rodadura que cuentan con características mecánicas particulares para la resistencia de la carga vehicular que transitará por los corredores de los bicirreiles.

En la **Figura 7.2** se presenta un esquema tipo del cual se parte para determinar la configuración del SUDS.

Figura 7.2. Esquema tipo de estructura de pavimento permeable.



Fuente: Adaptación del autor de “Structural and hydrological design of permeable concrete pavements, Alalea Kia, 2021”

7.3 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.

Una vez seleccionado el modelo a ser implementado, se analizarán los materiales que lo conformarían. Teniendo en cuenta la operación del SUDS es importante la selección de los materiales que conformaran cada una de las capas, así como los materiales que garantizaran la confinación de la estructura. Así las cosas, se deben tener en cuenta como materiales las capas de confinamiento permeables o impermeables, según opere el SUDS, el material granular que

permitirá el almacenamiento y hace parte de la estructura. Y, por último, el pavimento permeable que como se ha mencionado puede ser en asfalto poroso o concretos poroso. En este último material se centró principalmente el diseño de la estructura teniendo en cuenta que será la que permitirá la captación de la escorrentía superficial y estará sometida a las cargas de los vehículos que transitaran sobre la estructura.

7.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SUDS.

Como ya se cuenta con el prototipo de la estructura del modelo de SUDS al igual que los materiales que lo conforman, se avanzó con el diseño estructural toda vez que este a parte de la función de captación, conducción, almacenamiento y vertido y/o infiltración del agua captada, deberá cumplir con su función como vía para el tránsito de vehículos, (bicicletas, motos, vehículos, pequeños camiones). Por lo anterior, es necesario diseñar la estructura con base al tránsito que va a recibir por el periodo de diseño y este estará sujeto a la conformación de las capas que conformaran la estructura del SUDS. Para este diseño se deberá tener en cuenta la normativa nacional de diseño de pavimentos (INVIAS, 2007).

7.5 MODELO HIDRÁULICO.

Analizados y diseñado el modelo con base en los anteriores ítems, se procede con el modelo hidráulico de la red de alcantarillado pluvial teniendo en cuenta las condiciones iniciales y posteriormente con la incorporación de los SUDS, de forma tal que se pueda establecer un comparativo del funcionamiento y la eficiencia de la infraestructura de alcantarillado en el evento pico de diseño con la incorporación de los elementos de drenaje alternativo. Con base en los resultados, se estableció la utilidad del modelo para poder ser implementado en los proyectos de infraestructura vial.

7.6 RESULTADO DEL MODELO.

Obtenidos los resultados del modelo, se procedió con el análisis de los datos obtenidos con el fin de establecer la eficiencia del modelo propuesto de SUDS y si se puede ser susceptible de optimizar para generar una mayor eficiencia para la mitigación del caudal pico en el evento de diseño y que la infraestructura existente presente un alivio en la capacidad hidráulica, generando así, una mejora en el manejo de la escorrentía superficial y por ende una mitigación en las inundaciones en los corredores viales.

7.7 PROCESO CONSTRUCTIVO.

De acuerdo con el modelo y materiales ya seleccionados y evaluados, se presenta una metodología para el proceso constructivo de la estructura, teniendo en cuenta los pasos previos a la construcción de la estructura y los procesos constructivos de instalación de materiales. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones para su operación y mantenimiento teniendo en cuenta experiencias de proyectos ejecutados en otras latitudes y en las normativas que se tiene a nivel internación al respecto.

8 DESARROLLO DEL MODELO.

Para el desarrollo del modelo como se presentó en el capítulo anterior, se partirá de los criterios técnicos establecidos en las normas técnicas de la Empresa de Acueducto de Bogotá en cuanto al proceso de análisis que permita seleccionar el corredor en el cual se desarrollará el diseño del SUDS. Asimismo, se evaluarán los principios hidráulicos e hidrológicos del modelo.

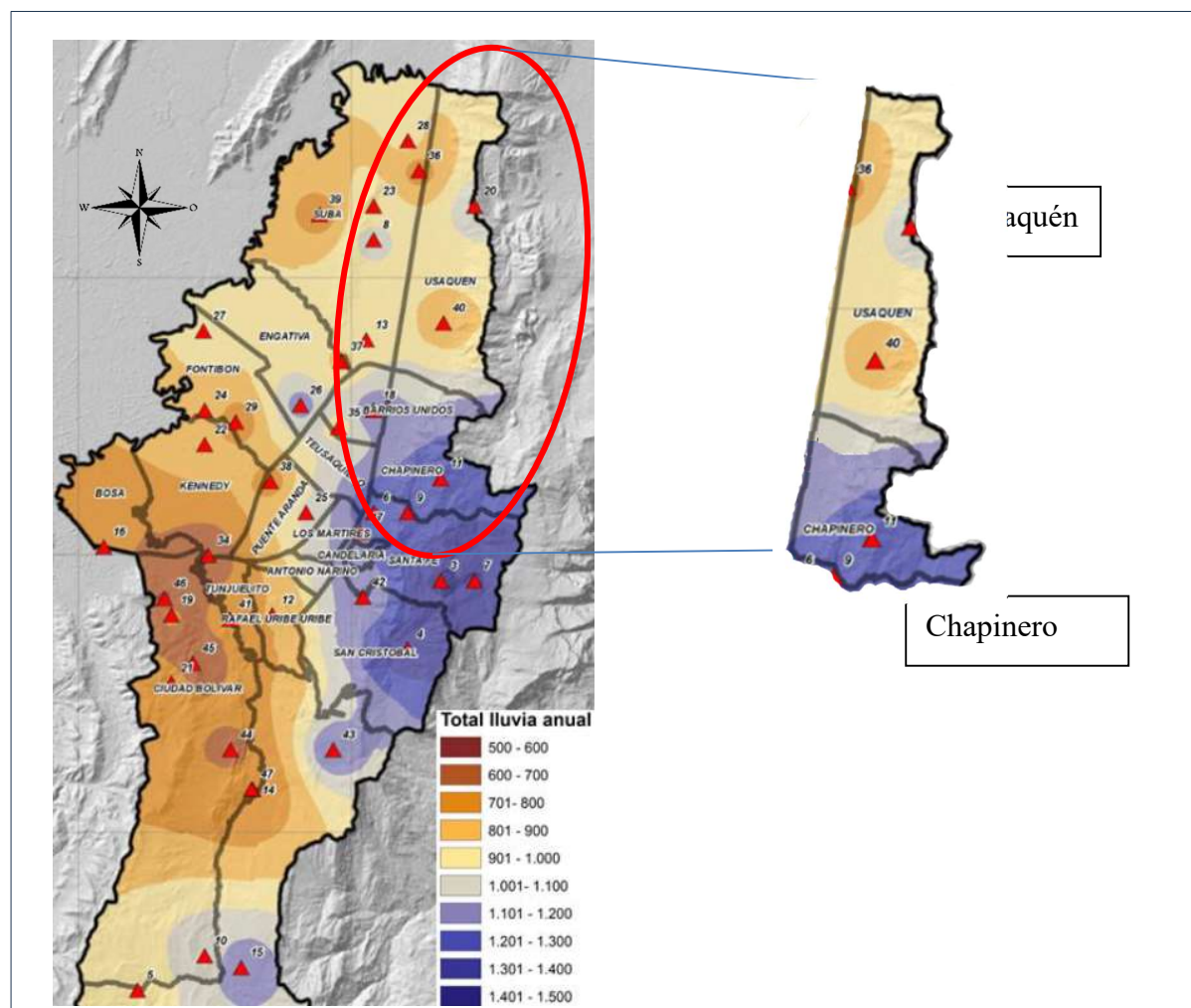
Expuesto lo anterior, se procederá con la selección de las zonas de implementación de SUDS para su estudio.

8.1 ZONAS DE ESTUDIO.

Con el fin de establecer la eficiencia que presentaría el modelo en las diferentes zonas de la ciudad, se analiza como operaría el SUDS en zonas con diferentes precipitaciones anuales. La ciudad de Bogotá cuenta con diferentes comportamientos climatológicos en la zona urbana de forma tal que tiene precipitaciones que varían entre 600 a 1430 mm/año, siendo la zona de Bosa la de menores precipitaciones y Chapinero y Santa Fe las de mayores precipitaciones (IDIGER, 2019).

En la **Figura 8.1** se presenta la distribución de precipitaciones en la Ciudad de Bogotá para las series entre los años 2000 – 2015.

Figura 8.1. Distribución espacial de la precipitación para el área urbana con base en 47 estaciones ubicadas en Bogotá.



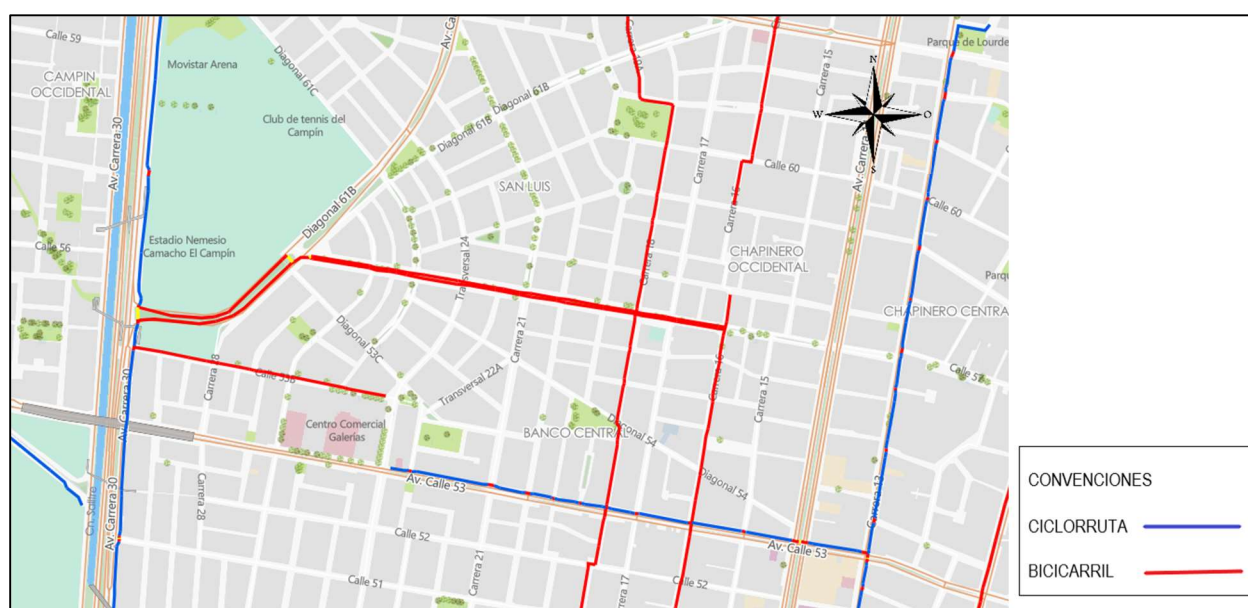
Fuente: IDEAM, SDA e IDIGER.

Con base en la anterior Figura se pueden identificar los sectores que puedan cumplir con las condiciones buscadas de precipitaciones altas y medias. De acuerdo con esta característica se tomará la localidad de Chapinero, la cual cuenta con precipitaciones del orden de 1201 a 1300 mm/año y la localidad de Usaquén con precipitaciones del orden de 800 a 900 mm/año.

El siguiente factor para tener en cuenta para el análisis del modelo es localizar un corredor vial que en la actualidad cuente con un bicicarril, esto con el fin de tener como punto de partida un bicicarril aprobado por la Secretaría de Movilidad de Bogotá. De acuerdo con lo anterior, se seleccionaron los siguientes bicicarriles en las localidades definidas.

Bicicarril AC 57 entre carrera 16 y diagonal 61B

Figura 8.2. Bicicarril AC 57 entre carrera 16 y diagonal 61B – Zona de Chapinero



Fuente: Mapas Bogotá. www.mapasbogota.gov.co

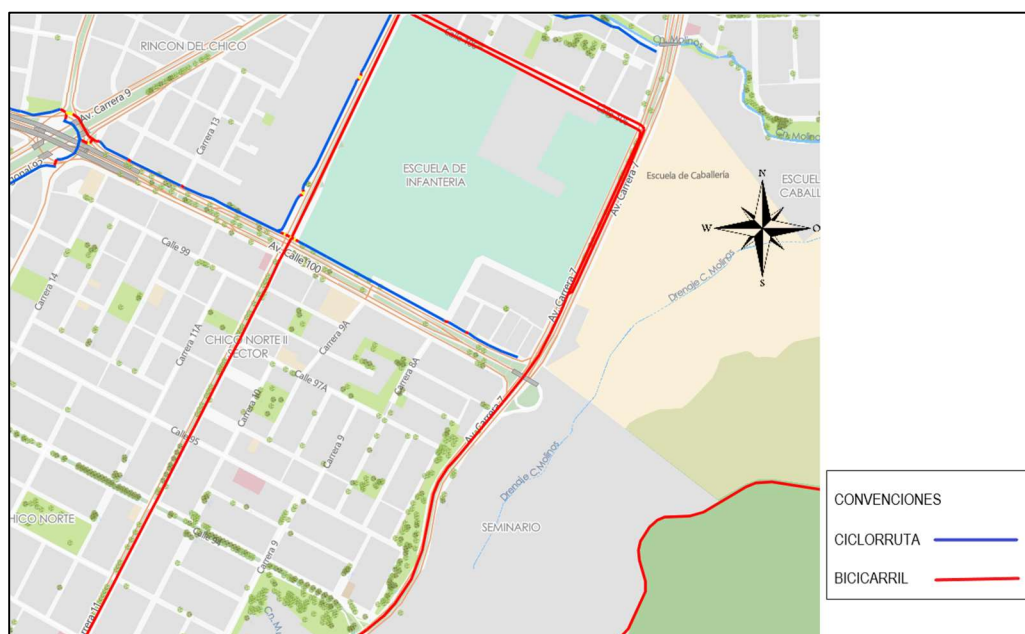
Figura 8.3. Fotografía bicicarril AC 57.



Fuente: Google Maps.

Bicicarril AK 7 entre calle 94 a calle 106.

Figura 8.4. Bicicarril AK 7 entre calle 94 a calle 106.



Fuente: Mapas Bogotá. www.mapasbogota.gov.co

Figura 8.5. Fotografía bicicarril AC 7.



Fuente: Google Maps.

Como se puede apreciar en tanto en planos como en las fotografías, en la actualidad los corredores viales seleccionados cuentan con bicicarriles implementados (demarcados) por la Secretaría de Movilidad y se encuentran en operación actualmente.

Una vez seleccionados los tramos objeto de estudio, se procede con el análisis de las zonas de acuerdo con lo establecido en la norma NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).

8.2 ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN DE SUDS

Para el inicio del proceso de análisis, se procederá a realizar una evaluación con base en los sectores elegidos para implantación del modelo de SUDS. La información para analizar es la siguiente:

1. Tasa de infiltración.
2. Pendiente promedio del suelo.
3. Niveles freáticos.
4. Distancia a cimientos

A continuación, se presenta el análisis de cada uno de los anteriores aspectos a lo largo de los tramos seleccionados.

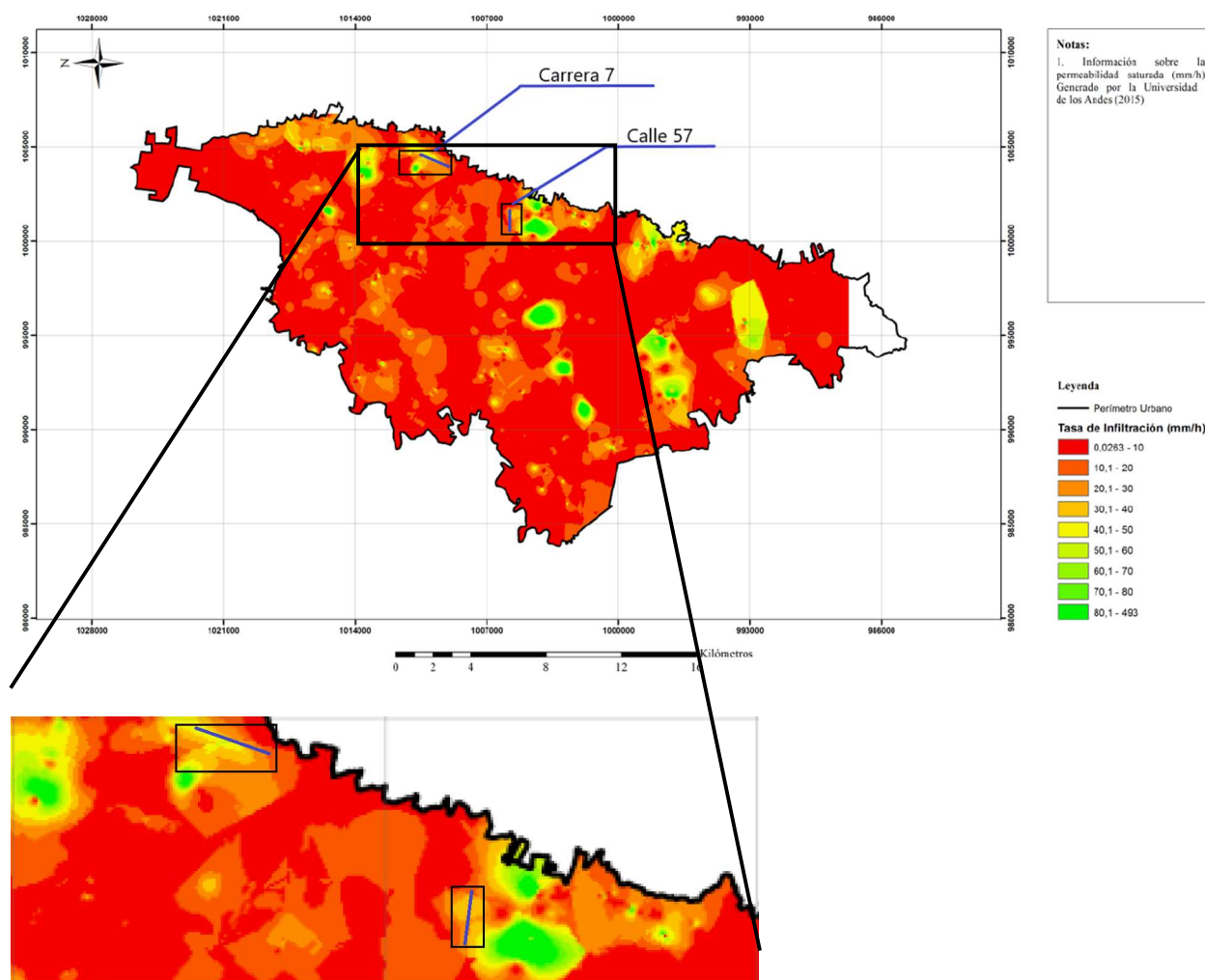
8.2.1 Tasa de infiltración.

Mediante el análisis de este parámetro, se establece si el agua tendrá la capacidad de infiltrarse a través del SUDS hacia el suelo. En el caso en cual este parámetro determine que el suelo tiene características impermeables, se deberá recurrir a otro tipo de obra para el drenaje del SUDS.

La infiltración puede definirse como el proceso mediante el cual el agua que se encuentra en la superficie del suelo penetra al subsuelo. La tasa de infiltración es un índice de como el suelo es capaz de absorber la precipitación que cae en la superficie (Úbeda - Delgado, 2018).

Para el presente estudio, se realizó el análisis de la tasa de infiltración con base en el anexo AA de la norma técnica NS-166 de la EAAB. A continuación, en la **Figura 8.6** se presenta el plano con el mapa con la tasa de infiltración de la ciudad de Bogotá.

Figura 8.6. Tasas de infiltración en Bogotá



Fuente: Anexo AA, norma NS-166 V0.1, EAAB.

De acuerdo con **Figura 8.6**, las tasas de infiltración para la zona de estudio son:

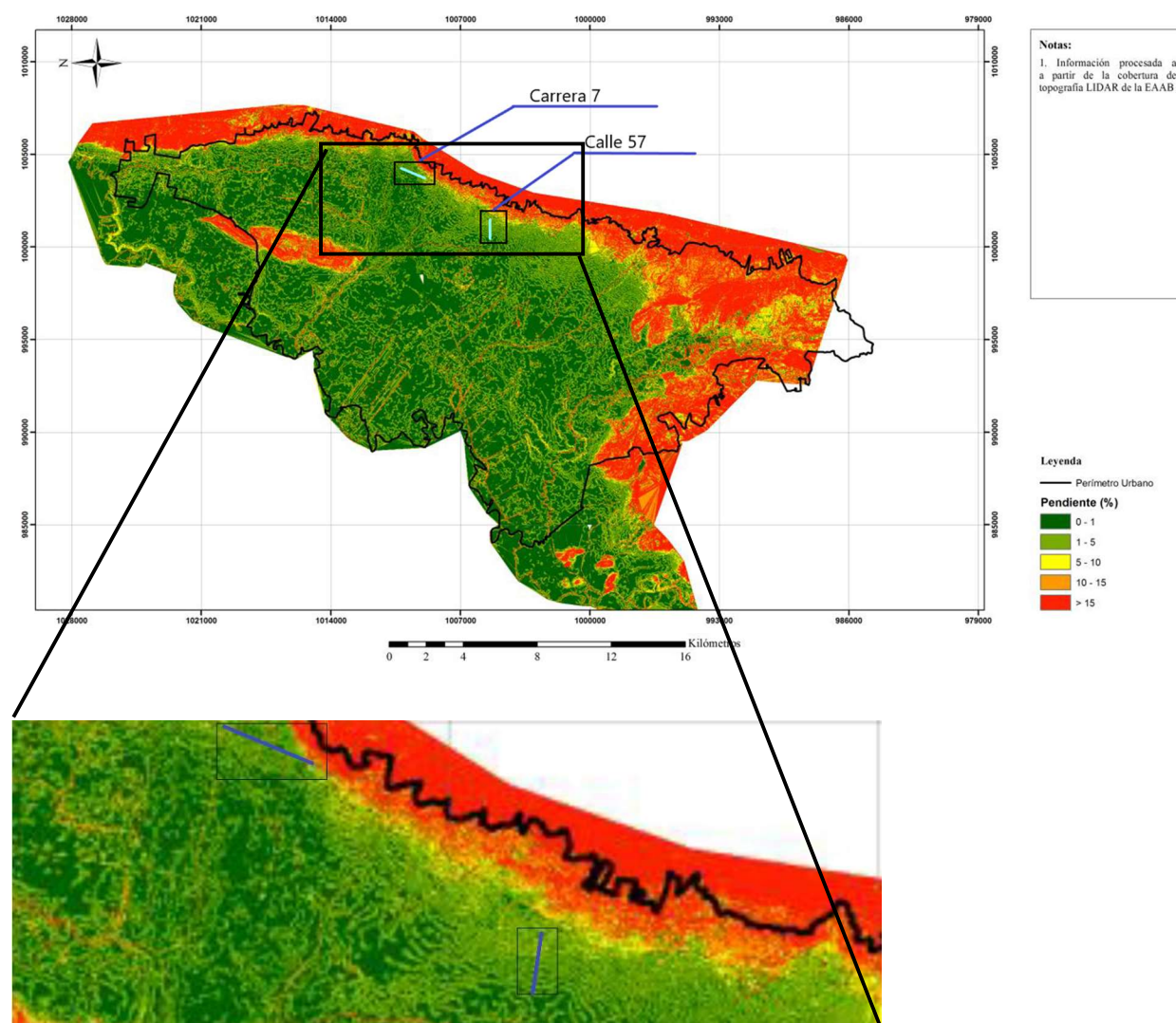
Calle 57: 10.1 – 20 mm/h

Carrera 7: 40.1 – 50 mm/h

8.2.2 Pendiente del terreno

De acuerdo con el estudio de la EAAB del año 2011 realizado mediante la metodología LIDAR, realizó un trazado de curvas de nivel omitiendo la infraestructura urbana como cubiertas, arboles, vías, que no estuvieran asociados al terreno. En la **Figura 8.7** se presentan las zonas de estudio sobre el levantamiento de curvas de nivel realizado por la EAAB.

Figura 8.7. Clasificación de pendientes de la zona urbana de Bogotá.



Fuente: Anexo AA, norma NS-166 V0.1, EAAB.

De acuerdo con **Figura 8.7**, las tasas de infiltración para la zona de estudio son:

Calle 57: 0 – 5 %

Carrera 7: 0 – 5 %

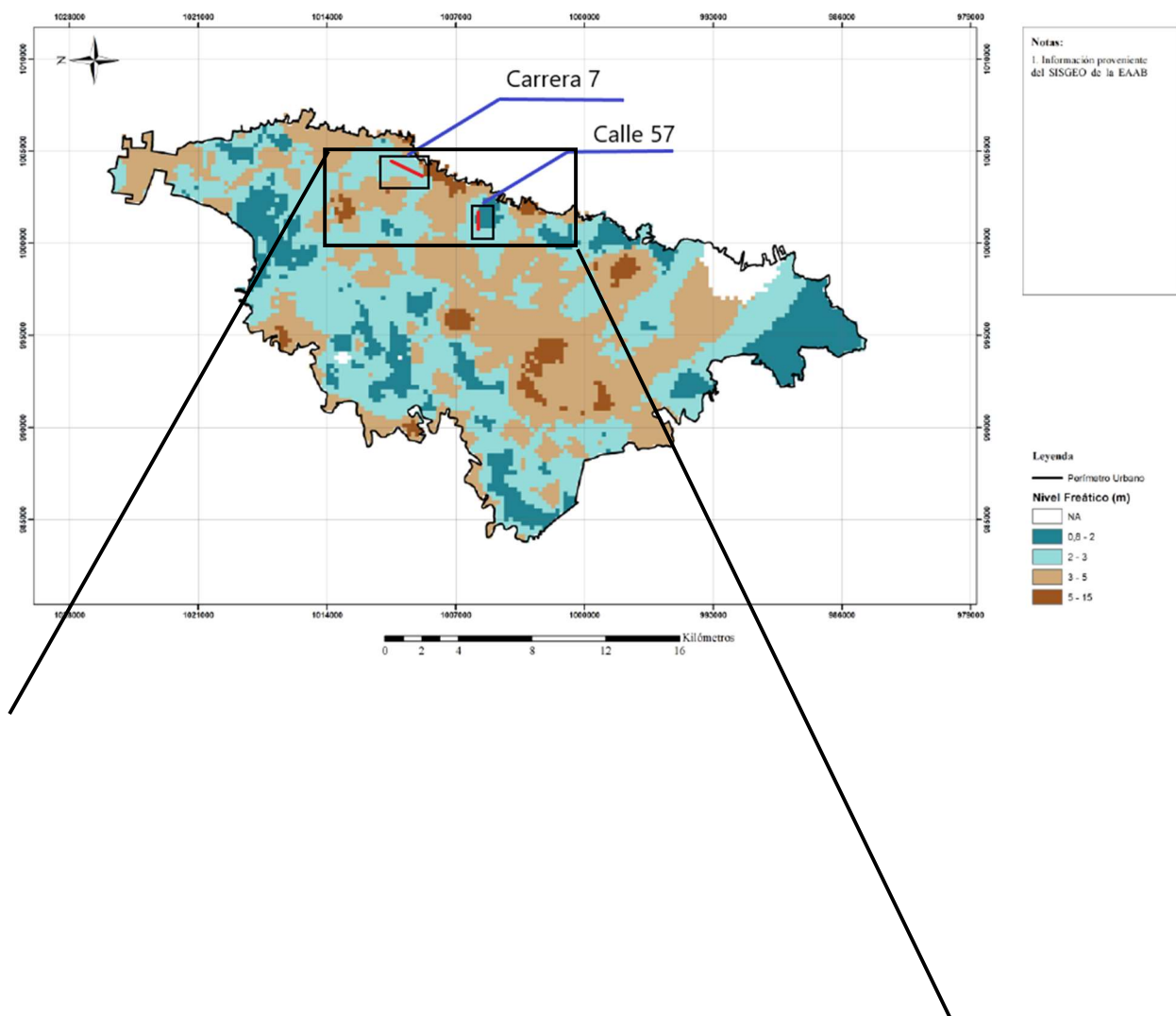
8.2.3 Nivel freático.

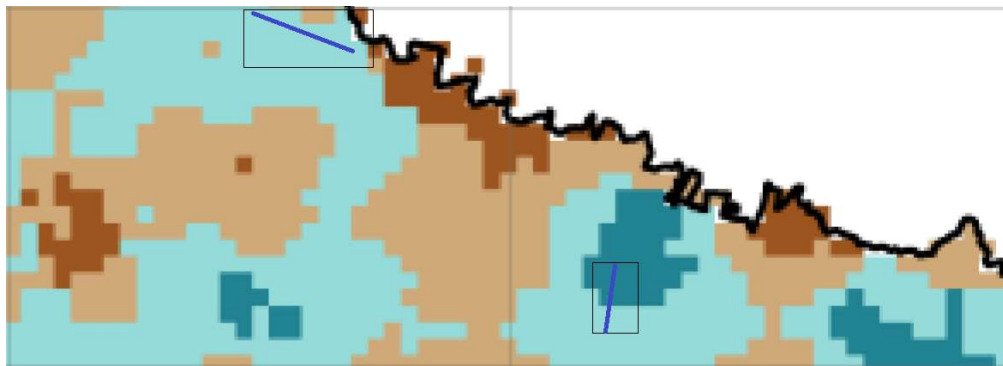
La Empresa de Acueducto de Bogotá mediante el aplicativo del SISGEO (Sistema de Información Geotécnica) cuenta con una base de datos de aproximadamente 9454 exploraciones del suelo en la ciudad de Bogotá. Esta información de la estratigrafía de la ciudad sirvió como insumo para la determinación del nivel freático en la zona urbana de la ciudad.

Con esta información recopilada se extrapolaron los datos mediante el método Kriging, el cual es un método empleado para la interpolación espacial de variables geofísicas e hidrológicas (Gutiérrez López et al., 2011), con lo cual se obtuvo un plano aproximado del valor del nivel freático multianual, el cual se presenta en la

Figura 8.8.

Figura 8.8. Clasificación del nivel freático para la ciudad de Bogotá.





Fuente: Anexo AA, norma NS-166 V0.1, EAAB.

De acuerdo con la anterior gráfica, se pudo determinar que las profundidades a las cuales se encuentra el nivel freático son:

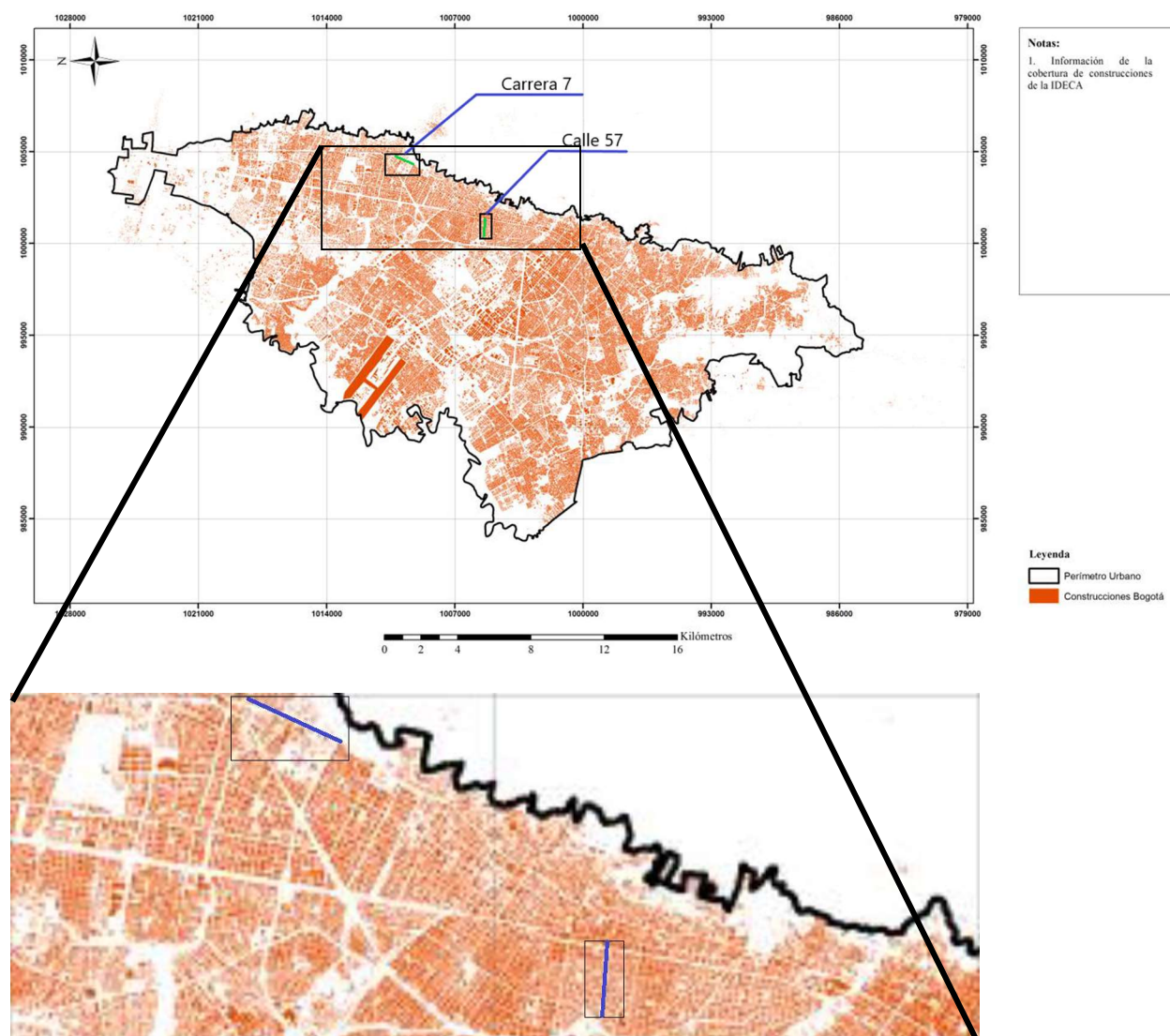
Calle 57: 0.80 – 2 metros

Carrera 7: 2 – 3 metros

8.2.4 Distancia a los cimientos

La Empresa de Acueducto mediante información compilada mediante el IDECA (Infraestructura de Datos Especiales de Bogotá), estructuró un plano de construcciones en la ciudad de Bogotá, en el cual, mediante un buffer elaborado en software para análisis de sistemas de información geográfica, identificó la disponibilidad de zonas susceptibles de implantación de sistemas SUDS. En algunas metodologías se han establecido que las distancias a cimientos de estructuras existentes y proyectadas se establecen entre 1.5 a 10 metros, sin embargo, para el caso de Bogotá se estableció una distancia mínima de 6 metros.

Figura 8.9. Distancias cimentaciones para la ciudad de Bogotá

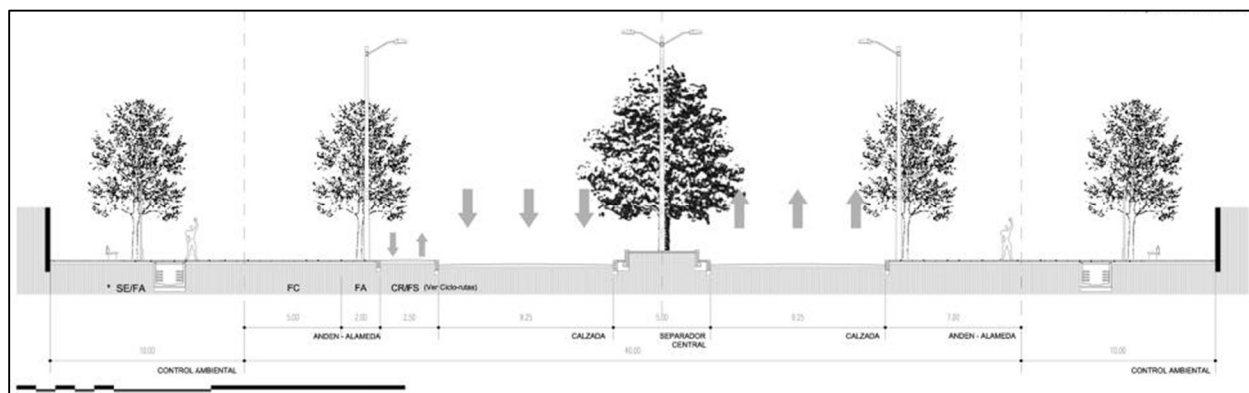


Fuente: Anexo AA, norma NS-166 V0.1, EAAB.

De acuerdo con lo presentado en la anterior figura, se puede apreciar la localización de los corredores objeto de estudio. Allí se puede apreciar la disponibilidad de espacio a lo largo del corredor que para este caso la zona del corredor de la calle 57 es una vía tipo A2 (36 a 44 metros)³.

³ Ancho establecido de acuerdo con Decreto 555 de 2021, artículo 155. P.O.T de Bogotá

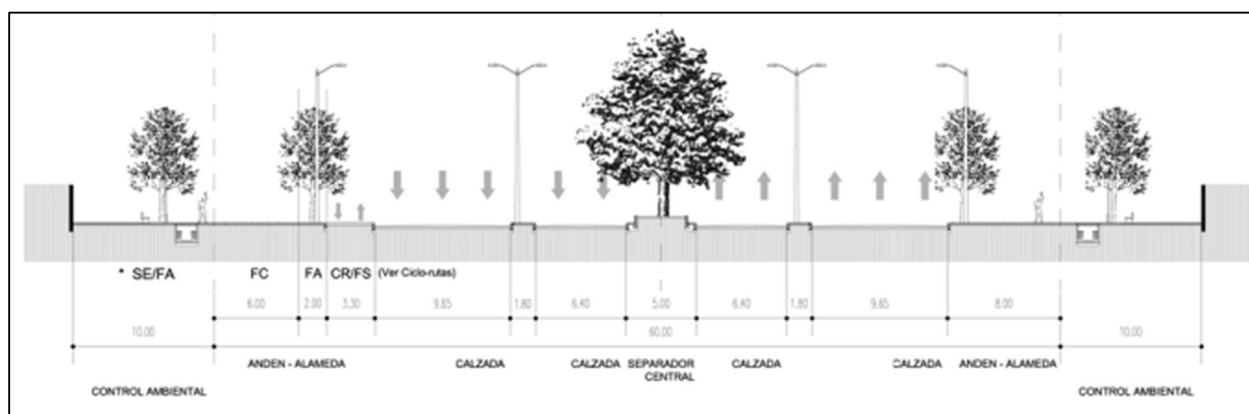
Figura 8.10. Sección vial tipo A2. Secretaría Distrital de Planeación.



Fuente: Secretaría Distrital de Planeación.

La carrera 7 es un corredor de tipo A1 (55 a 66 metros)⁴, (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021)

Figura 8.11. Sección vial tipo A1. Secretaría Distrital de Planeación.



Fuente: Secretaría Distrital de Planeación.

8.2.5 Capacidad de almacenamiento de agua del suelo superficial

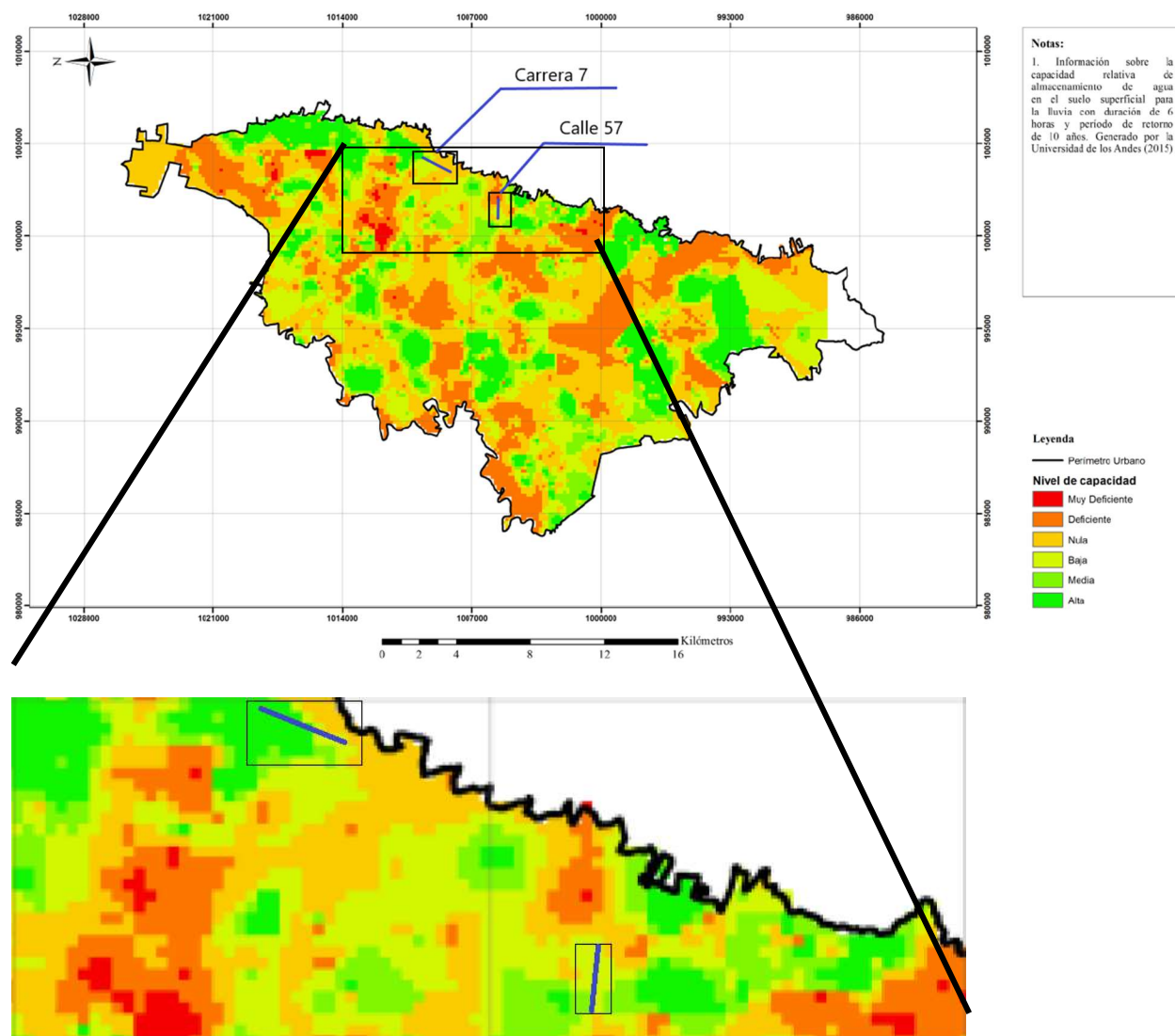
La Empresa de acueducto de Bogotá mediante el estudio de curvas IDF, determinó las zonas en las cuales se presentan las mayores profundidades de lluvias para un aguacero de 6 horas y un periodo de retorno de 10 años. Asimismo, determinaron las condiciones del suelo en las cuales se

⁴ Ancho establecido de acuerdo con Decreto 555 de 2021, artículo 155. P.O.T de Bogotá

contaba con el mayor potencial de infiltración en segundos y terceros estratos del suelo. Así las cosas, se consolidaron estas dos informaciones en plano que permitió establecer la habilidad del suelo superficial para almacenar agua en eventos de fuertes precipitaciones.

En la **Figura 8.12** presenta el resultado de la consolidación de la información descrita anteriormente.

Figura 8.12. Capacidad relativa de almacenamiento de agua en el suelo superficial con duración de 6 horas y periodo de retorno de 10 años.



Fuente: Anexo AA, norma NS-166 V0.1, EAAB.

En la zona del corredor de la calle 57 se puede apreciar por los colores que se asignan al nivel de capacidad en el plano, la capacidad es entre nula y baja. Para el caso de la carrera 7 se encuentra entre alta y media. Esto indica que este corredor cuenta con una buena capacidad de almacenamiento de agua en un evento de precipitación fuerte.

8.2.6 Restricción para la implementación del tipo de SUDS.

Una vez se definen las anteriores características para el estudio de la localización de las estructuras de SUDS, se procede con realizar un análisis de las restricciones que se deben tener en cuenta para la implementación de este. Para esto, la norma NS-166 de la EAAB, en el anexo AA presentan una serie de criterios a ser tenidos en cuenta. En la **Tabla 8.1** presenta las restricciones.

Tabla 8.1. Restricciones para implementación de Pavimentos Permeables.

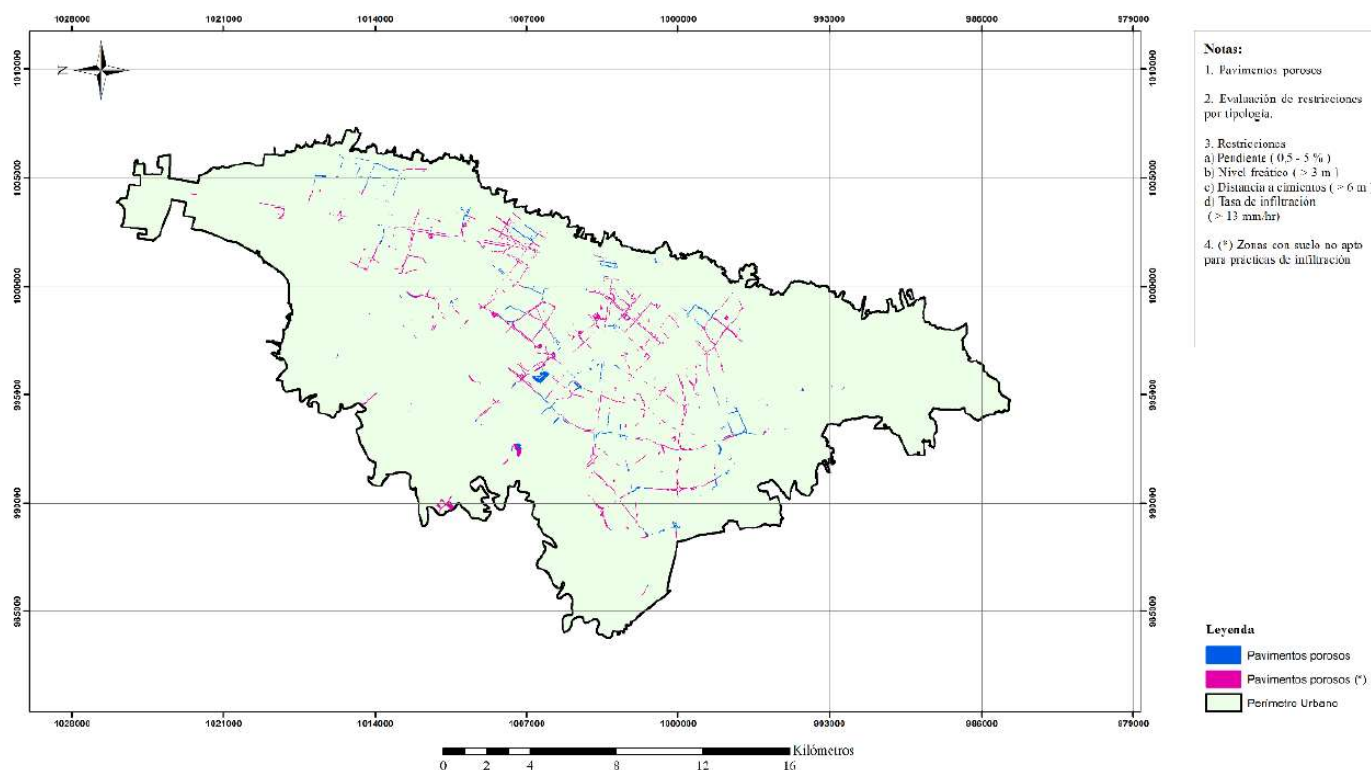
Restricción	Pendiente	Nivel Freático	Distancia a cimientos	Tasa de infiltración	Área	Largo	Ancho
Valor	0.50 – 5%	>3m	>6m	>13 mm/h	N/A	N/A	N/A

Fuente: Tabla 34 Anexo AA Norma NS-166 EAAB

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis presentados anteriormente de los dos corredores, se establece que el corredor de la calle 57 se descarta debido a que no cumple con la restricción del nivel freático, toda vez que, según la información secundaria obtenida de la norma, el corredor cuenta con una profundidad del nivel freático inferior a los 3 metros. Asimismo, como se determinó en el numeral 8.2.5 el corredor de la calle 57 cuenta con una capacidad de almacenamiento entre nulo y bajo, lo cual no favorece a la capacidad de infiltración del SUDS.

Por otra parte, de acuerdo con el anexo NS-AA de la norma NS- de la EAAB, la posibilidad de implementación de zonas con pavimentos permeables es aún más limitada. En la **Figura 8.13** se presenta las zonas identificadas por la EAAB.

Figura 8.13. Áreas potenciales para pavimentos porosos.



Fuente: Anexo AA, norma NS-166 V0.1, EAAB.

De acuerdo con la gráfica, las zonas identificadas con color azul son aquellas en las cuales existe la posibilidad de permitir la filtración al subsuelo las cuales son muy pocas en la ciudad, lo cual genera una limitante para sistemas de SUDS diseñados para infiltrar el agua al subsuelo como alternativa de operación y reducción del caudal a conducir por el sistema de alcantarillado tradicional. Sin embargo, el análisis del presente trabajo de grado está orientado a un desarrollo como alternativa individual aumentando las potenciales zonas para implementación de pavimentos porosos si se construyen con estructuras que en conjunto con el SUDS complementen su operación y eficiencia.

Ejemplo de esto son los proyectos que se han implementado en la ciudad de Sevilla, España, en la Avenida San Francisco Javier (Ciudad Saludable), Distrito San Pablo – Santa Justa, en donde se construyó el proyecto de renovación de la zona de espacio público incluyendo los carriles bici ejecutado por EMASESA (Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A.)

8.3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE SUDS

Realizado el análisis de potencial de implantación de SUDS en la ciudad de Bogotá con base en las características del suelo, espacio público y construcciones, se procede a realizar el análisis de otros criterios enfocados a las características de operación. Expuesto lo anterior, se evaluarán los siguientes criterios, los cuales hacen parte de la norma técnica NS-085 de la EAAB(Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018):

- Mejoramiento de la calidad de agua.
- Control de volúmenes de agua lluvia.
- Amenidad y conflictos de uso.
- Mantenimiento.
- Costos de implementación.

8.3.1 Mejoramiento de la calidad del agua.

Con el fin de evitar que los diferentes tipos de contaminantes que son arrastrados en los diferentes sistemas eventos de lluvia y que pueden ser vertidos a las diferentes fuentes de agua, la implementación de los SUDS permite mitigar este impacto negativo. Este proceso se puede dar mediante sedimentación, filtración, adsorción, transformación y degradación.

En la **Tabla 8.2** se puede clasificar las tipologías seleccionadas según eficiencia de remoción de contaminantes.

Tabla 8.2. Eficiencia de remoción de contaminantes

Contaminante Tipología	Nutrientes	Metales	Patógenos	Sedimentos	Aceites y grasas	Basura y escombros
Pavimentos permeables	B	M	M	A	A	M

Fuente: Anexo AB, norma NS-166 V0.1, EAAB.

Donde: A: Alta – 3; M: Media – 2; B: Baja – 1

Asimismo, se evalúa la filtración y absorción de los pavimentos. Por lo anterior, en la **Tabla 8.3** se presenta la eficiencia para los procesos de filtración y absorción.

Tabla 8.3 Procesos de filtración y sorción

Criterio de volumen Tipología	Filtrado y absorción
Pavimentos permeables	M

Fuente: Anexo AB, norma NS-166 V0.1, EAAB.

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1

8.3.2 Control de volúmenes de agua lluvia.

El efecto del cambio climático en el plantea el cual se ha incrementado en las últimas décadas, ha generado un aumento en el volumen de la escorrentía superficial y de los caudales picos en los eventos de lluvia, lo que genera más recurrentemente la saturación de la infraestructura convencional de drenaje pluvial en las ciudades.

A continuación, se procede evaluar los aspectos técnicos relacionados con la capacidad del SUDS de infiltración, evaporación, transpiración, etc., que puedan generar la mitigación de los efectos causados en los eventos de lluvia altos que se presentan en la ciudad.

En la **Tabla 8.4** se presenta la eficiencia del SUDS frente a la reducción de volúmenes de aguas de escorrentías superficial.

Tabla 8.4 Evaluación según eficiencia de reducción de escorrentía

Tipología	Criterio de volumen	
	Reducción volumen	Reducción descarga máxima
Pavimentos permeables	A	M

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1

8.3.3 Amenidad y conflictos de uso.

Estos conceptos están enfocados a dos factores que son, la percepción ciudadana de la estructura con el entorno y los posibles conflictos que puede generar la estructura con las actividades diarias desarrolladas en el entorno de implementación. En las siguientes tablas se presentan los valores a cada uno de los factores evaluados.

Tabla 8.5. Calificación tipologías según contribución a la amenidad

Tipología	Pavimentos permeables
Amenidad	N

A: Alta: 3 M: Media: 2 N: Nula: 0

Tabla 8.6. Calificación tipologías según conflictos de uso

Tipología	Pavimentos permeables
Conflicto de uso	
Actividades en el sitio	B
Seguridad (para los usuarios)	B

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Bajo: 0

8.3.4 Mantenimiento.

Este factor es de gran importancia para la implementación del tipo de SUDS en un proyecto. En este análisis se tiene en cuenta aspectos como el de la o las entidades que estarían encargadas del mantenimiento, la periodicidad con la cual este se debe realizar y la complejidad de ejecutarlo.

Los SUDS como cualquier tipo de obra de infraestructura requiere que se contemple los mantenimientos rutinarios para los periodos mensuales, semestrales y anuales. Para establecer los periodos o ciclos de mantenimiento del SUDS, es primordial establecer la vulnerabilidad de la estructura con respecto al fenómeno de colmatación que pueda presentar el medio filtrante.

En la **Tabla 8.7** se presenta la calificación según la frecuencia de mantenimiento del SUDS acorde con lo evaluado en el anexo AB de la norma NS-166 de la EAAB.

Tabla 8.7. Calificación tipologías según frecuencia de mantenimiento

Tipología	Pavimentos permeables		
Frecuencia Tipo	M	S	A
Regular	1	2	3
Ocasional	1	2	3
Correctivo	2	3	1
Riesgo de colmatación	ALTO		
Total (Requerimientos)	ALTO		

M: Mensual S: Semestral A: Anual

Fuente: Anexo AB - Norma NS-166 EAAB

Con base en la tabla anterior, se evalúa el factor de mantenimiento del SUDS. La calificación se presenta numéricamente respecto a los requerimientos de mantenimiento, donde tres (3) equivale a bajo, dos (2) a medio y uno (1) a alto.

8.3.5 Costos.

En una etapa de prefactibilidad y factibilidad de un proyecto que incluya la implementación de SUDS de tipo pavimento permeable, se debe tener en cuenta los costos y estos deben ser valorados en conjunto con los diferentes beneficios que pueden proveer los SUDS durante su funcionamiento.

De acuerdo con lo indicado en el anexo AB de la norma NS-166, “*los costos deben ser considerados como información secundaria y no como valores establecidos para la implementación de SUDS en Bogotá*”, esto significa que si bien los costos directos e indirectos de la construcción pueden llegar a ser elevados dependiendo características propias del proyecto como facilidad de obtención de los materiales, mano de obra, topografía, etc., que dependen de la

zona de implantación de los SUDS, el costo no será un determinante dentro de la toma de decisión para su construcción.

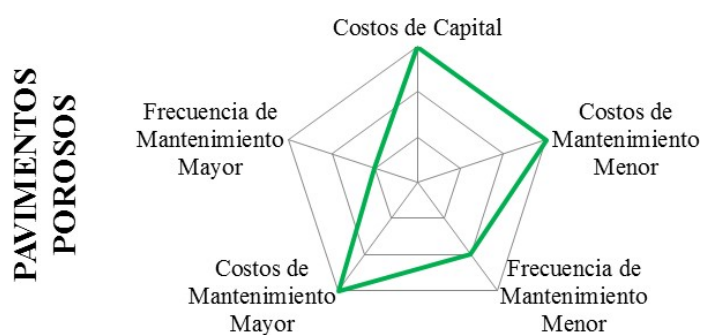
A continuación, se presenta el análisis cualitativo para un pavimento poroso.

Tabla 8.8. Costos cualitativos para pavimentos permeables

Pavimentos Permeables	
Costos de capital	ALTA
Costos de mantenimiento menor	ALTA
Frecuencia de mantenimiento menor	MEDIO
Costos de mantenimiento mayor	ALTO
Frecuencia de mantenimiento mayor	BAJO

Fuente: adaptado de (Luisiana, 2010)

Figura 8.14. Costos cualitativos para pavimentos permeables



Fuente: Anexo AB - Norma NS-166 EAAB

De acuerdo con lo indicado en la norma NS-166 de la EAAB las siguientes son las actividades de mantenimiento consideradas para los pavimentos porosos.

“Las actividades de mantenimiento menor comprenden:

- Inspeccionar zonas con estancamiento de agua después de eventos de tormenta.
- Aspirar la superficie.
- Inspeccionar crecimiento de vegetación y removerla si es necesario.
- Remover basuras y escombros presentes en la superficie.
- Realizar mantenimiento de áreas que drenen a la estructura.

Las actividades de mantenimiento mayor abarcan:

- Reparar surcos o depresiones en el pavimento mediante repavimentación o parches.
- Sustituir los adoquines dañados.
- Rehabilitar la capa de suelo subsuperficial cuando ha perdido capacidad de infiltración.”(Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018)

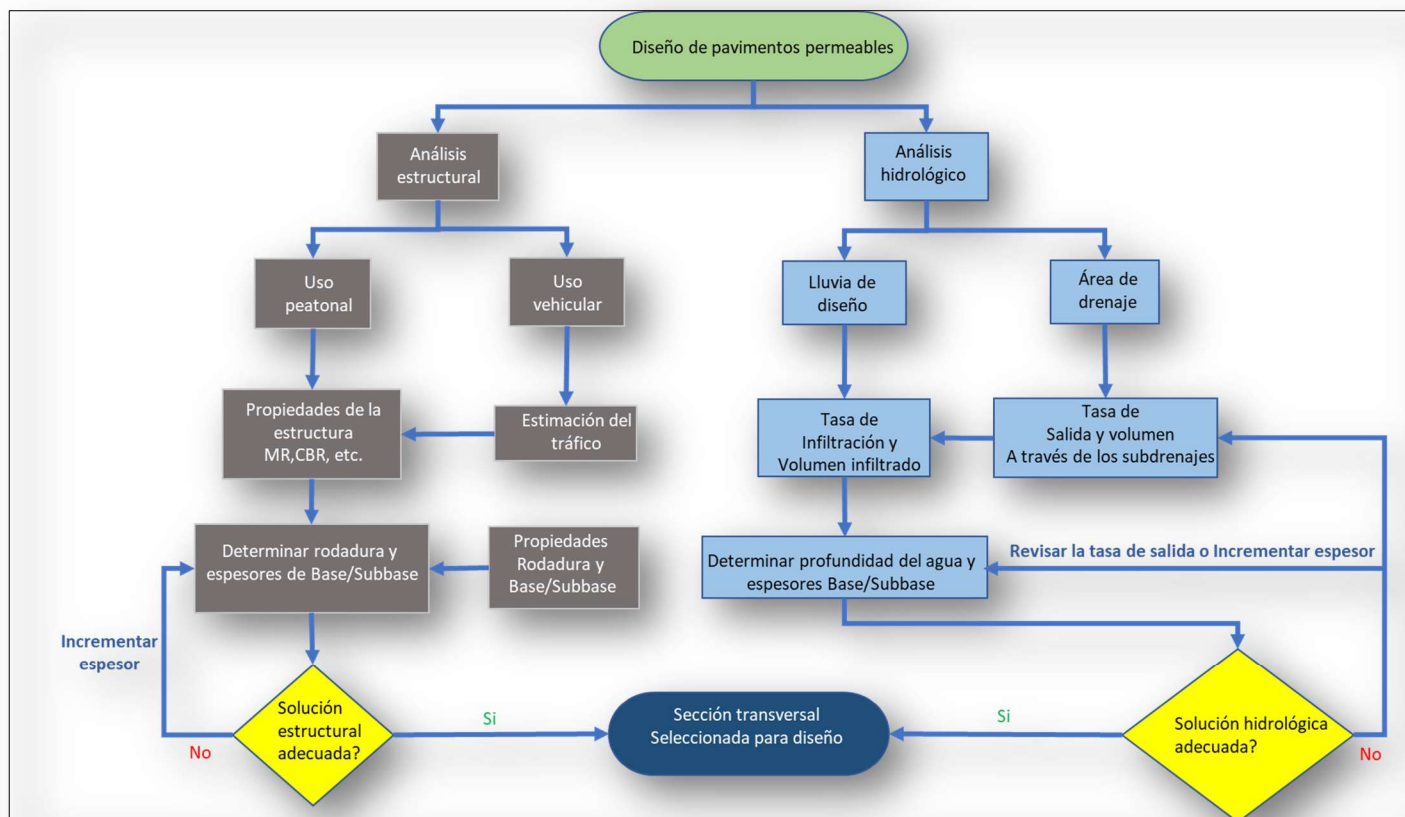
Es importante tener en cuenta que la metodología aplicada para la evaluación de las características de localización, uso, mantenimiento, costos, etc., corresponde a los parámetros mínimos exigidos en la norma de Bogotá para la evaluación de selección de tipo de SUDS a emplear en un proyecto, sin embargo, a modo de ejemplo se realizó como guía procedimental para ser aplicada en otras regiones y/o ciudades del país.

8.4 DISEÑO DEL PAVIMENTO

Con relación a la etapa del diseño de un pavimento poroso, que para este caso particular el uso se enfocará en una rodadura para bicirreiles con dos especificaciones asfalto y concreto, se debe tener en cuenta que el diseño se debe analizar desde dos aspectos técnicos a diferencia de las

otras tipologías, el diseño del pavimento y su estructura y el diseño hidrológico. En el siguiente diagrama de flujo se presenta la secuencia de la metodología de diseño.

Figura 8.15. Diagrama de flujo para el diseño de pavimentos permeables



Fuente: Elaboración propia.

Con base en la anterior figura, se deduce que tanto la parte estructural, como la parte hidrológica tienen la misma relevancia para el desarrollo del diseño. Para el caso particular del presente estudio, se iniciará con el estudio hidrológico para determinar los parámetros de lluvia que permita establecer las alturas de la lámina de agua sobre el pavimento y los volúmenes de agua que se infiltran. Definidos estos parámetros, se procedió con el diseño del modelo que incluye, rodadura estructura y sistema de alivio.

8.4.1 DISEÑO HIDROLÓGICO.

Es importante tener presente que los SUDS como parte de la infraestructura de drenaje cumple con la función de interactuar con los sistemas tradicionales para mitigar los efectos de las lluvias sobre estos y adicionalmente realizan un tratamiento en términos de calidad y cantidad en el agua antes de retorne a los sistemas tradicionales o se descarguen a algún cuerpo de agua. En el caso de los pavimentos permeables si bien se puede retornar las aguas captadas a los sistemas de alcantarillado, estos usualmente no descargan a los cuerpos de agua dado que permiten la filtración a las capas del subsuelo. Por lo anterior, entre los procesos que pueden cumplir los SUDS de pavimentos porosos están los de detención/retención y la infiltración del agua.

Al respecto, la norma NS-166 de la EAAB define los tipos de tratamiento de la siguiente forma:

Infiltración: “El agua penetra en el suelo natural y/o capa artificial filtrante, contribuyendo a la remoción de contaminantes” (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).

Detención o almacenamiento temporal: “Una fracción del agua puede infiltrarse y remover contaminantes y el volumen remanente sale de una manera controlada hacia los sistemas de colectores, reduciendo los picos y volumen de escorrentía que debería llegar a estos” (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).

Retención o almacenamiento permanente de agua: “Mediante la sedimentación de partículas se genera el tratamiento de remoción de contaminantes y a la vez contribuye a reducción de picos y volumen de escorrentía que llegarían a los colectores.” (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).

En este orden de ideas, los diseños de SUDS se basan en dos principios, el de caudal de tratamiento y el de volumen de tratamiento. En el primer caso, el principio es la reducción de caudales pico mediante un almacenamiento temporal mientras que, para el segundo caso se busca la reducción de los volúmenes de escorrentía y cargas contaminantes. (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018)

Para el diseño particular de los pavimentos permeables, el criterio de diseño se basa en el volumen de calidad de agua [V_c]. Este principio está basado en tres criterios particulares que son:

i) área tributaria [A_d]

ii) coeficiente de escorrentía [C]

iii) profundidad de la lluvia [h_p].

Los dos primeros criterios son intrínsecos a la zona de estudio en la cual se realiza la implementación del SUDS, la profundidad de la lluvia corresponde a un estudio hidrológico de las precipitaciones que las entidades territoriales o nacionales tengan disponibles para su análisis.

Con base en lo anterior se establece que el cálculo del volumen de calidad de agua se establece mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = h_p * A_d * C \quad (1)$$

Donde cada término se encuentra en las siguientes unidades:

$$V_c \rightarrow [m^3]$$

$$h_p \rightarrow [mm]$$

$$A_d \rightarrow [m^2]$$

Una vez definida la forma de operación del SUDS, se procede con el diseño hidrológico e hidráulico de la estructura.

8.4.1.1 Diseño hidrológico del SUDS en pavimento poroso.

El diseño hidrológico para los SUDS de tipo pavimentos porosos, puede realizarse mediante diversas metodologías que existen a nivel mundial. En el medio regional, se tiene como guía las normativas de los Estados Unidos. Muchas de las ciudades que han implementado sistemas de drenajes sostenibles han desarrollado sus propias guías metodológicas para el diseño y construcción de estos, de acuerdo con las condiciones climatológicas, topográficas y urbanas regionales en las cuales se implementaran. En el país, como se mencionó anteriormente, la ciudad de Bogotá es la ciudad en el país que ha desarrollado una normativa para el diseño de los SUDS, sin embargo, la metodología empleada para el caso puntual de los pavimentos permeables es del año 2010 que, si bien no ha pedido vigencia, si es susceptible de una actualización tanto a nivel metodológico como bibliográfico. Para el presente trabajo, se tomó la metodología vigente y aprobada por la Empresa de Acueducto de Bogotá toda vez que se cuenta con la información necesaria para el diseño propuesto y se adapta a los requerimientos normativos para su aprobación en las entidades distritales que hacen parte de la implementación de un proyecto de drenaje sostenible en la ciudad.

Bajo este panorama las demás ciudades del país pueden optar por elegir dos alternativas para la estimación hidrológica de los pavimentos permeables. La primera, desarrollar una metodología propia para el diseño hidrológico y la segunda, adoptar como guía la metodología empleada en Bogotá.

Un ejemplo para la primera alternativa puede ser la norma “Storm Water Management Manual” (Iowa Department of Natural Resources, 2019) del estado de IOWA. La norma técnica NS-166

vigente de la EAAB tomó como base para el diseño hidrológico la versión del año 2010 de este documento.

El documento Storm Water Management Manual, en su capítulo 8 – Sistemas de pavimentos permeables, establece la siguiente metodología para el diseño hidrológico.

Mediante la siguiente ecuación (1) se calcula el volumen de calidad del agua [Vc]

$$WQ_v = (43,560 \text{ SF/acre})[(P)(R_v)(DA)]/12^5 \quad (3)$$

Donde:

P: 1.25 In (profundidad de la lluvia calculada para el estado de IOWA)

Rv: De la ecuación $R_v = 0.05 + 0.009 (I)^6$ – Resultado del estudio hidrológico, capítulo 3 de la norma del SWMM.

DA: Área de drenaje (en acres)

WQv: Volumen de calidad de agua.

Nota: La anterior ecuación se toma a modo de ejemplo toda vez que es la empleada en el estado de Iowa, Estados Unidos y está en unidades del sistema inglés. Para su aplicación al medio local debería realizar la equivalencia de los parámetros evaluados en la norma.

⁵ Ecuación C8-S1-2. Storm Water management Manual. Ch. 8

⁶ Ecuación C8-S1-1. Storm Water management Manual. Ch. 8

Una vez calculado el volumen de calidad de agua se procede con el cálculo del promedio de descarga pico, con los valores de número de curva CN^7 ajustados que se toman de los tipos de suelo de la zona objeto de estudio.

Finalmente, se calcula la esorrentía de las lluvias con base en la información diaria, teniendo en cuenta que se deben tomar eventos con una altura superior a los 50mm (dato particular del estado de IOWA donde se desarrolló el estudio).

Otra forma de establecer los parámetros hidrológicos se puede encontrar en el Hydrologic Methods and Computation, (Virginia Department Environmental Quality, 2013), Norma del estado de Virginia, Estados Unidos, en la cual se establecen los parámetros para la estimación de volumen de calidad de agua $[V_c]$.

Como se puede apreciar, se puede emplear una metodología ya desarrollada e implementada con las correspondientes adaptaciones al medio local, o se puede desarrollar una metodología propia para la región o zona de estudio del pavimento permeable.

Lo anterior pretende establecer que para la estimación de los parámetros hidrológicos para los diseños de SUDS, se puede estimar por diferentes métodos. Como se mencionó anteriormente, para este ejercicio académico, se seguirán los parámetros establecidos en la norma técnica NS-166 toda vez que el análisis se realiza en la ciudad de Bogotá.

Para estimar el volumen de calidad de agua $[V_c]$, inicialmente se debe encontrar el valor de $[h_p]$ que es la profundidad de lluvia. En la ciudad de Bogotá no cuenta con una red robusta de estaciones con datos de información horarias de lluvias, sin embargo, con la red de estaciones de

⁷ Metodología del Soil Conservation Service (SCS)

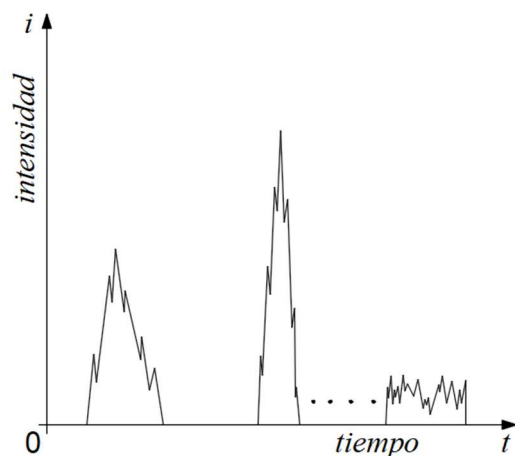
calidad de aire de la ciudad se pueden obtener los datos que permiten hacer un análisis de las series de eventos de tormentas. Es de anotar que, si bien en las estaciones se cuenta con esta información, de las 12 estaciones solo 2 cuentan con datos del periodo 2012 – 2014, las otras solo cuentan con datos entre el periodo 1997 – 2000.

Lo anterior indica que la información con la cual está analizada la hidrología para la norma técnica NS-166 de la EAAB es muy antigua y no contempla los efectos de los fenómenos del niño y la niña que se han presentado en los últimos 15 años como consecuencia del cambio climático.

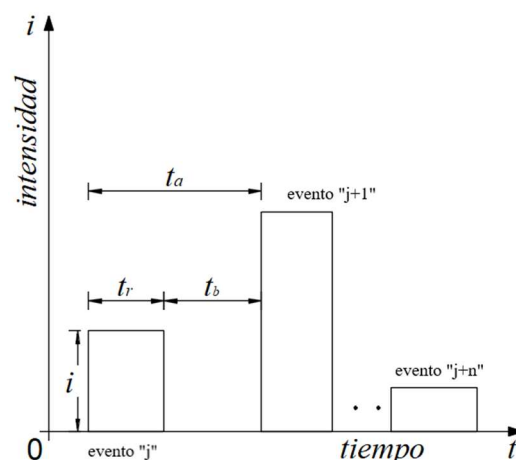
Con la información que se recopiló de los eventos horarios, se analizaron la separación de tormentas entre las 2 a 8 horas. Para ello se empleó el análisis de Poisson (Eagleson, 1978), con la cual se establecieron secuencias de lluvias independientes. Se debe tener presente que los fenómenos atmosféricos que ocasionan los eventos de precipitaciones son de diversas formas y de alta complejidad para su análisis. Por lo anterior las tormentas se analizan como pulsos rectangulares y cada tormenta se transforma en un solo evento con intensidad “ i ”. Con esto básicamente se enfoca en las características o propiedades externas que son, duración “ tr ”, tiempo entre tormentas “ tb ”, el tiempo entre inicio de tormentas “ ta ”, altura de caída de precipitación de cada tormenta “ h ”, que corresponde a la intensidad media “ i ” multiplicada por su duración “ tr ” (Moraga Navarrete, 2015).

La siguiente gráfica permite una interpretación del concepto presentado.

Figura 8.16. Representación de las precipitaciones en condiciones “actuales” y con el modelo.



(a) Precipitación actual

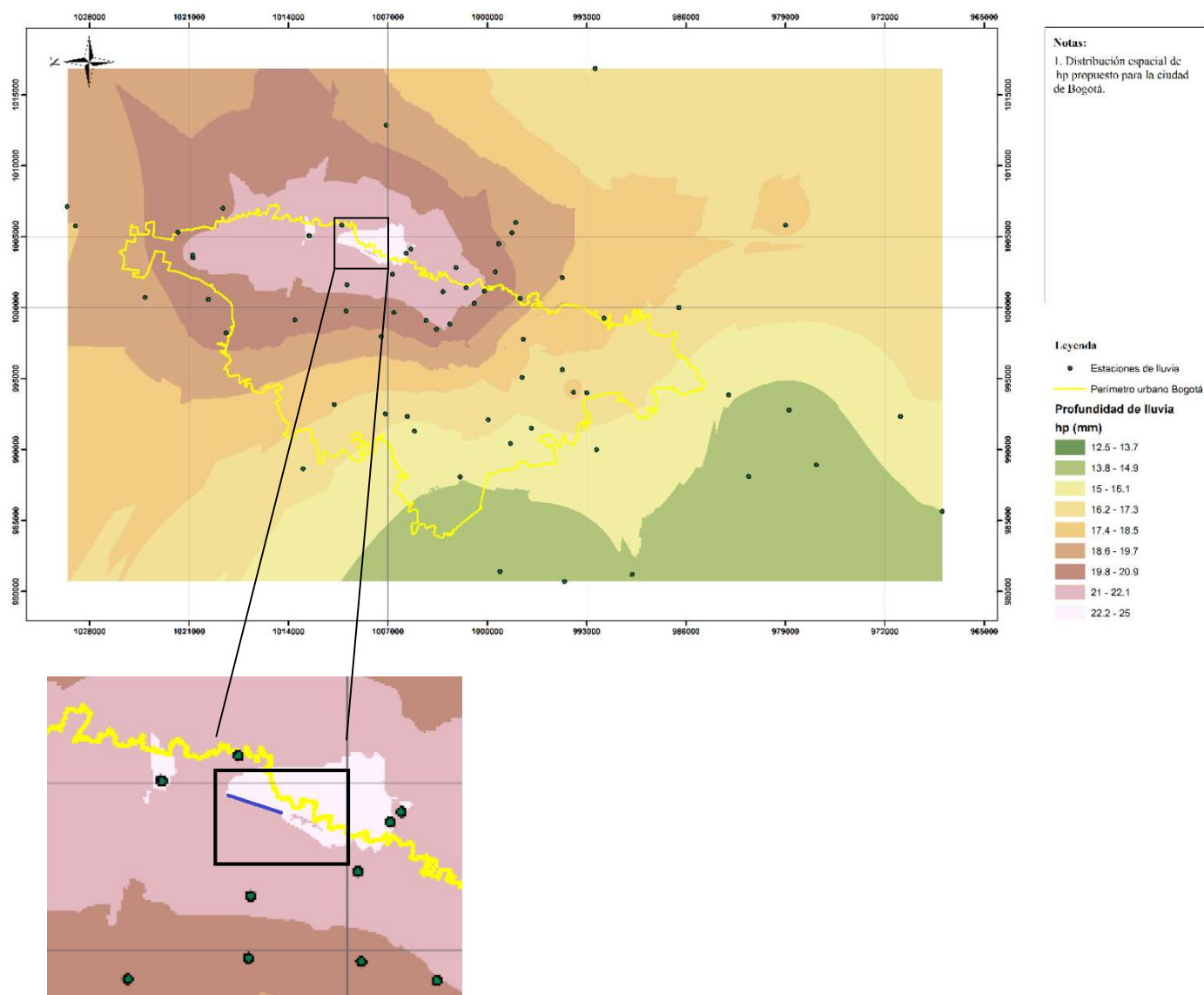


(b) Precipitación con modelo

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente al análisis ya establecido con el modelo, se requiere que se definan criterios de independencia que singularicen los eventos de tormenta diferenciando los periodos secos entre los eventos a los pequeños periodos que se presentan dentro de un evento. Para esto es que se aplica la metodología empleada en el estudio de identificación de eventos de lluvias individuales desde pluviógrafos (Dunkerley, 2008). Con base en las anteriores metodologías, la Empresa de Acueducto de Bogotá realizó la estimación de profundidad de lluvia [h_p] con la información obtenida de las 64 estaciones de la ciudad con registros de lluvia diaria. Como resultado obtuvo el siguiente mapa de distribución de espacial de h_p para la ciudad de Bogotá.

Figura 8.17. Mapa de distribución espacial de h_p propuesto para la ciudad de Bogotá.



Fuente: Anexo AB, norma NS-166 V0.1, EAAB.

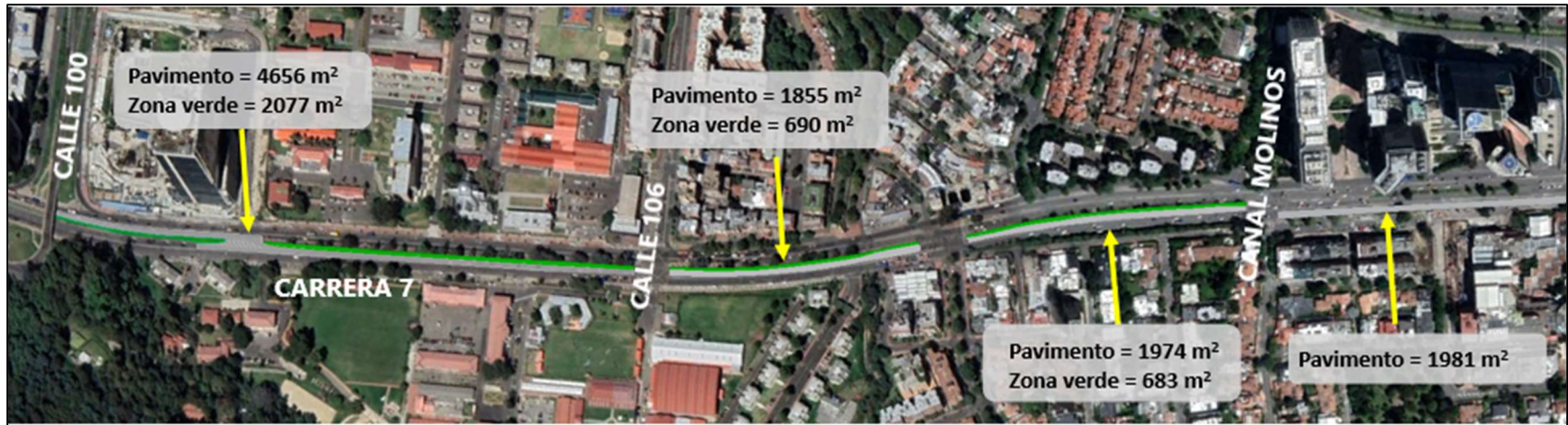
Una vez definida la metodología para el cálculo de la lluvia en la ciudad de Bogotá, se procede con el diseño del SUDS de tipo pavimento poroso para el tramo comprendido en la carrera 7 entre calle 100 a 116.

De acuerdo con la **Figura 8.17** y la localización del punto de implantación, se establece que una profundidad de lámina de 22.20mm, si se realiza el cálculo con los datos de estaciones, el valor

es de 22.168mm⁸, por lo cual se adopta este valor para el desarrollo del modelo. El siguiente paso es establecer los coeficientes de escorrentía para la zona del proyecto. De acuerdo con lo establecido en la norma técnica NS-085. En la **Figura 8.18** se presentan las áreas de drenaje del corredor de la carrera 7 entre calles 100 a calle 116.

⁸ Cálculo realizado mediante las hojas de cálculo anexas a la norma NS-166 de la EAAB.

Figura 8.18 Áreas de drenaje corredores carrera 7



Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 8.9** se presenta el cuadro de resumen de la información extraída de la ortofoto. Adicionalmente se presentan los datos de coeficientes de escorrentía y pendientes de terreno. Las coordenadas medias del proyecto son: X=1004706.589 (este) Y=1010035.626 (norte)

Tabla 8.9. Áreas de drenaje

	UNIDADES	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4
PAVIMENTO	m ²	4656	1855	1974	1981
ZONA VERDE	m ²	2077	690	683	
PENDIENTE	%	0.16	0.73	0.97	1.62
CONCRETO		0.80	0.80	0.80	0.80
PASTO 50 - 75%		0.28	0.28	0.28	
V _C	m ³	95.46	37.18	39.25	35.13

Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro anterior se presenta la información consolidada de áreas de drenaje, pendientes del terreno, valores del coeficiente de escorrentía y el valor calculado de [Vc]. Esta información es tomada de planos y de la norma técnica NS-085 de la EAAB.

El cálculo del volumen de calidad [Vc] se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = h_p * \sum_{i=1}^2 C_i * A_i$$

(4)

Donde:

h_p = profundidad de lluvia (m)

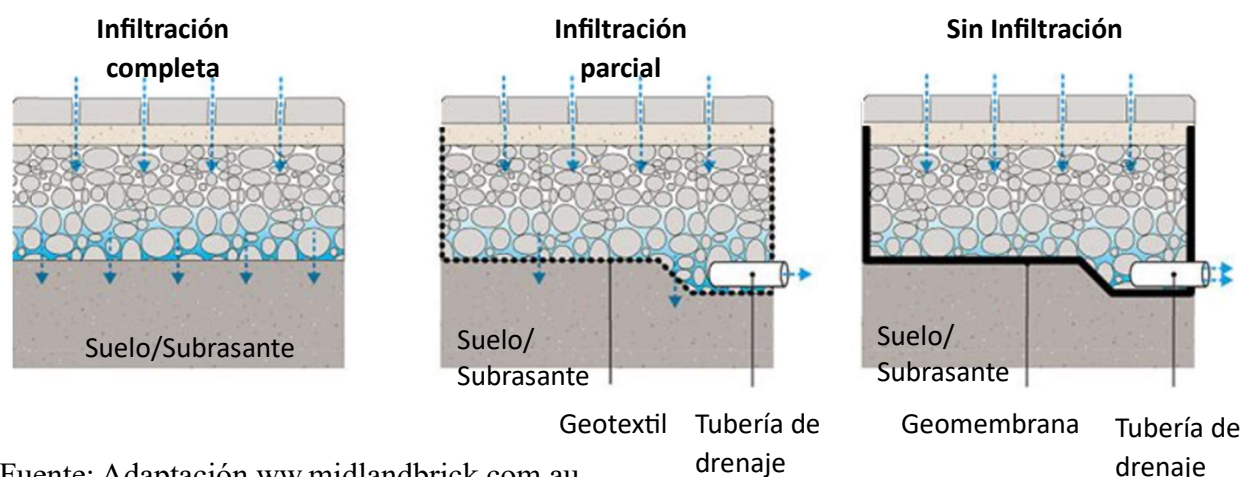
C = Coeficiente de escorrentía

A = Área de drenaje (m²)

Establecido el valor del volumen de calidad de agua, se procede con la selección y dimensionamiento de las capas con conformaran la estructura del pavimento. Para este diseño se tuvo en cuenta como se mencionó anteriormente las 3 posibles alternativas de estructura en

función de la operación del pavimento. De acuerdo con la **Figura 8.19** se tienen los siguientes tipos:

Figura 8.19 Configuración de la estructura en función de la operación.



Fuente: Adaptación ww.midlandbrick.com.au

Un aspecto que se deben tener en cuenta es el tipo de rodadura que se empleará en la estructura la cual es la que recibirá las cargas de los vehículos que transitarán sobre el SUDS y a su vez el material de captación. El presente ejercicio se realizó con dos materiales, el asfalto poroso y el concreto permeable. Los otros materiales como adoquines no serán tenidos en cuenta debido a que no son recomendados para una estructura de circulación de vehículos como bicicletas y patinetas por la inseguridad que estos pueden ocasionar por factores como el uso, dado que en la ciudad no ha sido posible que se instalen de forma adecuada y el daño del material, lo cual ocasionaría baches en la rodadura, y los procesos de mantenimiento no son muy eficientes.

Figura 8.20. Materiales para rodadura propuestos para bicirrailes.



Concreto permeable



Asfalto permeable

Fuente: <https://www.usgs.gov/media/images/types-permeable-pavement>

Con base a lo anterior, se entra en la determinación más adecuada para el diseño de la estructura del pavimento. De acuerdo con lo establecido con la norma técnica NS-166 de la EAAB, a partir del cálculo del volumen de calidad de agua, se procede con la estimación de las capas de la estructura, sin embargo, la norma no evalúa los requerimientos estructurales de esta. La norma NS-166 para el diseño de la estructura se basa en las metodologías sugeridas de Denver (Urban Drainage and Flood Control District (2010), Urban Storm Drainage - Criteria Manual y la de Riverside (Riverside County Flood Control and Water Conservation District (2011). Design Handbook for Low Impact Development Best Management Practices (2011).

Expuesto lo anterior, para el desarrollo del modelo se realizó el diseño estructural del SUDS tipo pavimento poroso, por lo cual se aplicará la metodología propuesta en la tesis Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos, (García, 2012), en la cual proponen la siguiente metodología:

- “
1. Establecer la categoría del tráfico
 2. Comprobar la calidad de subrasante para asegurar la capacidad de portante de la estructura. En caso de ser necesario, se deberá mejorar la capacidad portante.
 3. Seleccionar el tipo de la sub-base y su espesor.
 4. Seleccionar el tipo y espesor de la superficie permeable.”(García Haba, 2012)

Para inicial el diseño se debe identificar el valor del CBR (Californian Bearing Ratio) de la subrasante en la cual se cimentará la estructura del pavimento poroso. Este valor de soporte del suelo debe ser mínimo de 5 (Rodríguez-Hernández, 2008), en función del tráfico considerado.

Para suelo con valores menores del 5 se pueden optar por optimizaciones de la capacidad portante mediante la compactación del suelo (lo cual va en detrimento de la capacidad de infiltración), o la de la optimización de la rodadura mediante la utilización de geosintéticos o estabilizaciones con cemento, o empleando concretos pobres (Rodríguez-Hernández, 2008).

Estas especificaciones de diseño corresponden a pavimentos que pueden ser sometidos a cargas vehiculares sin incluir carga pesada. Para el diseño de los pavimentos porosos objeto del presente estudio teniendo en cuenta que corresponden a corredores de uso exclusivo de bicicletas y algunos sistemas de transporte eléctrico tipo motos, las exigencias por cargas son considerablemente menores a los de un pavimento de tráfico vehicular. Por lo anterior se tomó un número mínimo de ejes para el diseño de la estructural.

En Colombia se tienen como guías para el diseño de pavimentos por ejemplo el “Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito” del INVIAS y el manual “Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá” del IDU, ambos consideran el método AASHTO 1993. Sin embargo, estos manuales no contemplan

una especificación o guía particular para los diseños de pavimentos porosos o permeables. Es así como, para el diseño de estos tipos de pavimentos, se puede partir de la guía de la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos, Porous Pavement, Phase I – Design and Operational Criteria, de 1980. Esta norma establece para el diseño de la estructura en función del CBR y las categorías de tráfico.

En la **Tabla 8.10** se presentan los valores de la resistencia del suelo en función del CBR, con el cual se pueden establecer los espesores de la rodadura que se encuentran en la

Tabla 8.11.

Tabla 8.10. Resistencia del suelo en función del CBR

	Descripción del suelo	Resistencia – CBR
Excelente	Contiene un alto porcentaje uniforme de materiales granulares. Las clases unificadas del suelo (USCS): GW, GM, GC, GP; algunos SM, SP y SC. Grupos de Suelos AASHTO: A-1, A-2 y algunos de los A-3	15 o más
Bueno	Contiene algunos materiales granulares mezclados con limo y/o arcilla. Las clases unificadas del suelo (USCS): SM, SP, SC: algunos ML, CL, CH. Grupos de Suelos AASHTO: A-2, A-3, algunos A-4, y unos pocos A-6 o A-7	10-14
Razonable	Arenas arcillosas, limos arenosos, o arcillas limosas, pueden tener cierta plasticidad. USCS: ML, CL, algunos MH, CH. AASHTO: Que van desde la A-4 a A-7 (bajos índices de grupo)	6-9
Pobre	Arcillas plásticas, limos finos, arcillas limosas finas o micáceas. USCS: MH, CH, OL, OH. AASHTO: desde A-4 a A-7 (los índices más altos de grupo)	5 o menos

Fuente: Adaptación tabla 5 - Porous Pavement (1980)

Tabla 8.11. Mínimo espesor de pavimento poroso para varias condiciones de carga

Categoría de tráfico	Descripción	EAL ¹	CBR		
			≥ 15	10 - 14	6 - 9
1	Tráfico ligero	≥ 5	127	178	229
2	Tráfico ligero-medio (máx. 1000 VPD ²)	6 – 20	152	203	279
3	Tráfico medio (máx. 3000 VPD)	21 - 75	178	229	305

¹ EAL (Equivalent Axial Load) Equivalencia de cargas por eje: la AASHTO-93 establece que se deben transformar los diferentes ejes que circulan por una ruta a un eje simple doble de 80 kN (18 Kips) de peso, considerado como eje patrón, referido al carril de diseño.

² vehículos por día.

1. Para CBR de 5 o menores se debe mejorar con piedra triturada de 5 cm (2")

2. Los espesores están dados en milímetros.

Fuente: Adaptación tabla 6 - Pourus Pavement (1980)

Es de precisar que la norma NS-166 de la EAAB no establece los espesores de las capas de la estructura, motivo por el cual esta metodología permite establecer mediante un criterio técnico los espesores de las capas tanto de la base como de la rodadura.

8.4.1.2 DESARROLLO DEL DISEÑO DE ESTRUCTURA DEL SUDS.

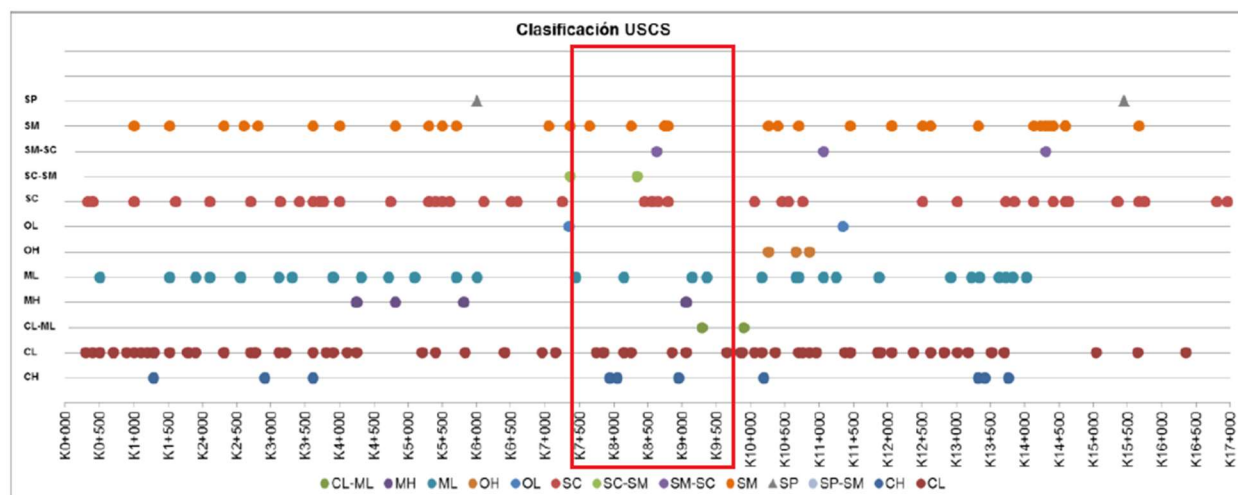
Como se ya se han identificado algunos de los parámetros de entrada para el diseño, a continuación, se realiza el ejemplo del diseño del pavimento para rodaduras de asfalto y concreto.

Con base en los estudios de consultoría realizados para el proyecto Transmilenio, (Ingetec Ingenieros Consultores, 2018), se obtuvieron los parámetros de entrada para la elaboración del diseño.

Inicialmente se identifican los tipos de suelo que se encuentran en el corredor del estudio. De acuerdo con el abscisado dado por el consultor para el corredor en el tramo comprendido entre la calle 100 y calle 116 se encuentra K7+700 hasta el K9+200.

La caracterización de suelo del corredor se encuentra en la **Figura 8.21**

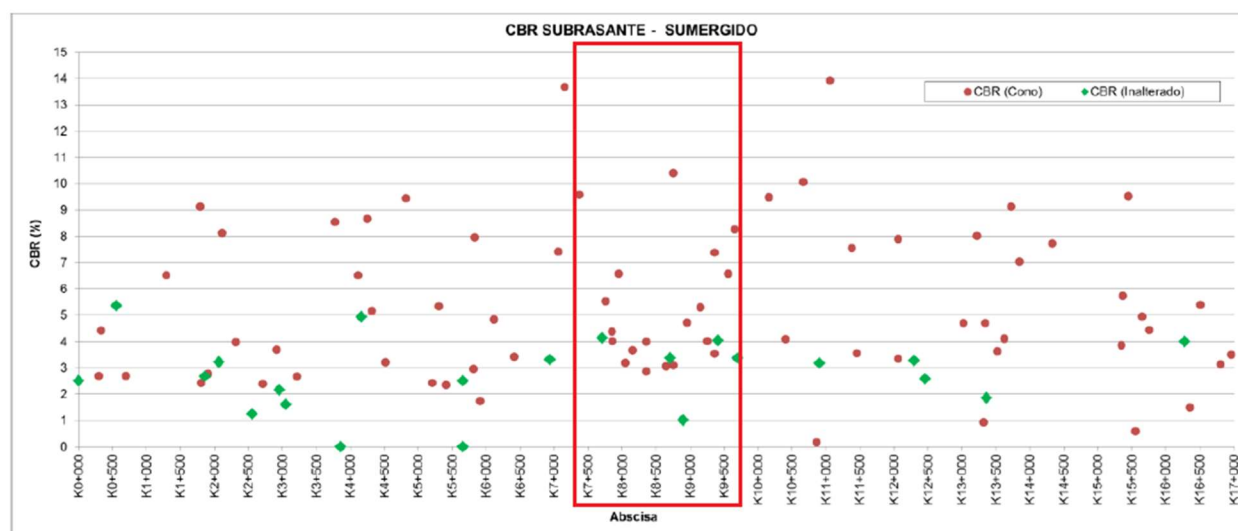
Figura 8.21. Clasificación de USCS subrasante – Avenida Carrera 7 entre CL 34 y CL 182 – Calzada oriental.



Fuente: Diseños definitivos pavimentos y espacio público. Ingetec.

Paso siguiente se identifican los valores de CBR para el corredor.

Figura 8.22. CBR Subrasante en condición sumergida subrasante – Avenida Carrera 7 entre CL 34 y CL 182 – Calzada oriental.



Fuente: Diseños definitivos pavimentos y espacio público. Ingetec.

Identificados las condiciones de suelo se pudo establecer la metodología para el diseño de la estructura.

De acuerdo con lo establecido en el Manual de SUDS del Reino Unido (Woods Ballard et al., 2016), se puede proceder de la siguiente forma:

- I. Determinación del valor de CBR.
- II. Determinación del tráfico.
- III. Diseño estructural

8.4.1.2.1 Determinación del CBR

Para el diseño se identificó que la media del CBR del corredor se encuentra entre el 3 al 5%. De esto se deduce que se debe realizar un mejoramiento de la estructura con piedra triturada (ver **Tabla 8.11**).

8.4.1.2.2 Determinación de tráfico.

De acuerdo con el diseño objeto del estudio, el corredor está previsto para el uso de biciusuarios, dentro de los cuales ocasionalmente se pueden encontrar vehículos como motos eléctricas y vehículos de emergencia de tamaño pequeño. El uso del bicicarril no contempla el paso de vehículos pesados, o tonelajes superiores a las 3.6 toneladas.

De acuerdo con la clasificación de tráfico de NAPA (Eason - Shook, 2002), se puede establecer una categoría en función del número de camiones por mes que utilizarán el pavimento y el periodo de diseño de la rodadura. En la **Tabla 8.12** se presentan los respectivos valores.

Tabla 8.12. Clasificación del tráfico (Eason & Shook, 2002)

Ubicación y tipo de vehículo	Máximo Camiones/día (carril)	Clase de tráfico	Periodo de diseño (años)	Diseño ESALs
Vías residenciales, puestos de estacionamiento, estacionamientos para automóviles y camionetas.	< 1	Clase I	5	3,000
			10	3,000
			15	5,000
			20	7,000
Calles residenciales sin tráfico regular de camiones o autobuses urbanos; tráfico consistente en automóviles, camiones de reparto a domicilio, recogida de basura, camiones de mudanzas ocasionales, etc.	60	Clase II	5	7,000
			10	14,000
			15	20,000
			20	27,000
Vías secundarias, carriles de reparto de centros comerciales; hasta 10 camiones semirremolque de una sola unidad o de 3 ejes por día o equivalentes; los pesos brutos medios deben ser inferiores al límite legal.	250	Clase III	5	27,000
			10	54,000
			15	82,000
			20	110,000
Camiones pesados; hasta 75 semirremolques de 5 ejes completamente cargados por día; los camiones equivalentes en esta clase pueden incluir camiones volquete cargados de 3 y 4 ejes, con pesos brutos de más de 40,000 libras.	2200	Clase IV	5	270,000
			10	540,000
			15	820,000
			20	1,100,000

Nota: Las especificaciones de carga de los ejes de los vehículos de diseño corresponden a las normas de los Estados Unidos.

En el caso de los bicirreiles, se pueden enmarcar dentro de la clase I, toda vez que el uso de estas calzadas es para un tráfico de bicicletas, patinetas eléctricas, con lo cual no está contemplado tráfico de camiones diario, comportamiento que se asemeja a una vía residencial.

Por otra parte, se estima el periodo de diseño del pavimento de acuerdo con las normas nacionales que para bajos volúmenes de tráfico está en 10 años (INVIAS, 2007). De acuerdo con lo anterior, la cantidad de ejes empleada para el diseño será de 3000.

8.4.1.2.3 Diseño de la estructura con pavimento de asfalto poroso

Para el diseño de una estructura de pavimento con asfalto poroso, se debe partir de la metodología de la ASSTHO 93 la cual permite establecer el diseño de la estructura a partir de la siguiente ecuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{\left[0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \right]} + 2.32 * \log_{10}(M_R) - 8.07$$

(5)

Donde:

- W_{18} = Número acumulado de ejes equivalentes de 18 kip (80 KN) en el carril de diseño durante el período de diseño
- Z_R = Nivel de confiabilidad del diseño
- S_0 = Derivación estándar asociada la ecuación de diseño
- SN = Número estructural de diseño para pavimentos flexibles
- $DPSI$ = Pérdida de serviciabilidad
- M_R = Módulo resiliente de la subrasante, en psi.

Para el diseño del pavimento, se deben determinar el valor del número estructural (SN), el cual está en función de del valor del W_{18} . Con la estimación de este valor se definen las capas de la estructura de pavimento y sus respectivos espesores. A diferencia del diseño tradicional de pavimento, para el diseño de la estructura o capa de asfalto poroso se asignan unos coeficientes estructurales por capa (a_i), el cual representa la capacidad estructural general de cada capa y su aporte a la misma (Schwartz - Hall, 2018a).

I. Diseño estructural

La configuración de la estructura de pavimento está conformada por la rodadura de asfalto poroso y una capa de un lecho de recarga principalmente conformado por piedra con una granulometría gruesa, la cual cumple con la función de almacenar el agua en los eventos de lluvia y/o capa de comportamiento estructural de la vía.

Por otro lado, el espesor de la capa de grava más allá de cumplir con las dos funciones anteriormente descritas llega un punto en el cual no cumple o pierde su capacidad estructural y no presta ningún aporte a la estructura como capacidad de soporte, es decir no hay una contribución al SN (Schwartz - Hall, 2018b).

Para determinar el espesor de la estructura de grava gruesa se debe tener en cuenta dos aspectos, el cálculo hidrológico y la capacidad de soporte de esta. En ensayos realizados mediante los cuales se han comparado los diseños AASHTO 93, se ha determinado que un espesor máximo de esta capa en la cual aporte un funcionamiento estructural está entre los 0.30 a 0.45 metros, sin embargo, no hay una metodología que determine con precisión la estructura máxima efectiva para el lecho de grava (Schwartz - Hall, 2018b).

La capa de grava puede ser utilizada también como una alternativa para mejorar la capacidad del soporte de la subrasante cuando está sea muy baja, con lo cual la capa de grava hasta determinada profundidad cumple la función de capa drenante y después de esta, como una mejora del suelo natural. Por lo anterior, para incorporar dentro del diseño estructural el lecho de grava se puede evaluar como deflexión equivalente, la cual se basa en la teoría de elasticidad. De esta manera se puede considerar el sistema como una subrasante homogénea o compuesta.

II. Espesor mínimo de la capa de asfalto

Es importante determinar el espesor mínimo que debe tener la rodadura o capa de asfalto, la cual protege la capa de grava que funciona como almacenamiento y refuerzo de la subbase. Esta capa puede determinarse con base en la ecuación de AASHTO 93 presentada anteriormente, y que se resume en la **Tabla 8.13**. Es importante tener en cuenta lo siguiente, en la norma AASHTO 93 se especifica unos espesores mínimos para la capa de rodadura, sin embargo, estos espesores son para estructuras con tráfico vehicular, por lo cual no aplicaría para este caso particular, por lo cual se asumirá los valores que se establecen en la NAPA, que están basados con los siguientes datos de entrada:

$$a_1 = 0.1$$

$$E_{\text{base}} = 20.000 \text{ psi}$$

$$\text{Confiabilidad} = 75\%$$

$$S_o = 0.45$$

$$\text{DPSI} = 2.5$$

Tabla 8.13. Espesores mínimos típicos para capas de asfalto poroso

W_{18} (Ejes equivalentes)	Espesor mínimo para asfalto poroso pulgadas (centímetros)
50,000	3.0 (7.5)
100,000	3.5 (8.75)
250,000	4.0 (10.00)
500,000	4.5 (11.25)
750,000	5.0 (12.50)
1,000,000	5.5 (13.75)
2,000,000	6.0 (15.00)
4,000,000	6.5 (16.25)

Fuente: NAPA IS 140.

Ejemplo de diseño:

El presente ejemplo se realiza con base a la metodología sugerida por la NAPA para el diseño de pavimentos.

Paso 1. Información obtenida de los diseños hidrológicos.

De acuerdo con los cálculos anteriormente obtenidos se toma el volumen de almacenamiento y se calcula la altura de la capa de piedra (grava) de recarga. Para esta altura se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$e = \frac{V_{alm}}{\eta * A_{pav}} \quad (6)$$

Donde:

e = espesor de la capa.

V_{alm} = volumen de almacenamiento.

A_{pav} = área de pavimento

η = porosidad del material de relleno de la zona porosa. (volumen de vacíos /
volumen total)

Nota: Para cada estructura se debe calcular el valor de porosidad del material de relleno. Para el caso particular se asume el valor de 0.18, de acuerdo con lo establecido en el trabajo de Pavimentos porosos como sistemas alternativos al drenaje urbano (Trujillo - Quiroz, 2013). Sin embargo, este valor es tomado del trabajo de durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido (Gómez, 2010)

$V_c = 37.19 \text{ m}^3$ (Valor promedio de zonas 2, 3 y 4)

$\eta = 0.18$

$A_{pav} = 1936.67 \text{ m}^2$ (Valor promedio de zonas 2, 3 y 4)

$$e = \frac{37.19}{0.18 \cdot 1936.67} = 0.11m \quad (7)$$

El valor calculado del espesor de la capa de almacenamiento es el mínimo esperado para el volumen de calidad o almacenamiento esperado, sin embargo, para el diseño se tomó un valor de 0.20m de espesor con el fin de dar un mayor grado de estabilidad de la base y estructura.

Ahora:

$h_{asfalto} = 0.075m$ (tomado de los espesores mínimos de capa de asfalto)

$$h_{\text{base}} = 0.20\text{m}$$

Paso 2. Datos de diseño

Parámetros de diseño estructural

- Diseño confiabilidad: $R = 75\%$
 $Z_R = -0.674$
- Desviación estándar: $S_0 = 0.45$
- Índice de servicialidad presente: $\Delta\text{PSI} = 2.5$

 $\text{PSI inicial} = 4.5$
 $\text{PSI final} = 2.0$

Módulo Resiliente de la subrasante

Típico por el tipo de suelo $M_R = 7500 \text{ PSI}$

Reducción $M_R = 25 - 50\%^9$

Valor de diseño $M_R = 3900 \text{ PSI}^{10}$

Trafico de diseño

Volumen estimado de tráfico = $W_{18} = 50.000 \text{ ESALS}^{11}$

⁹ Recomendación de propiedades estructurales para capas de pavimento de asfalto poroso

¹⁰ Valor tomado del estudio de suelos del corredor carrera 7 para los diseños de Transmilenio. Ingetec

¹¹ El valor tomado corresponde a un tráfico de vehículos el cual se asume como un equivalente al que pueda generar las bicicletas a la estructura.

Valores de diseño relacionados con el material del pavimento

Coefficientes estructurales de las capas (a)

Asfalto poroso = $a_1 = 0.40$

Capa de grava = $a_2 = 0.10$

Rigidez de la capa = $E_{base} = 20.000 \text{ PSI}$

Paso 3. Cálculo del módulo de subrasante compuesto para el diseño estructural.

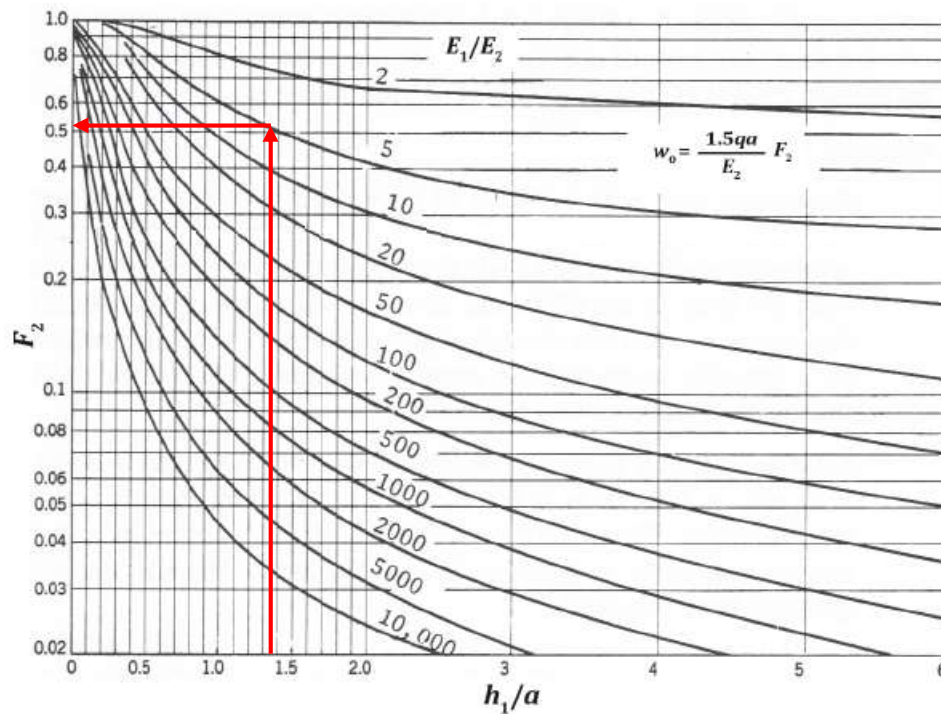
1. Cálculo de la deflexión superficial de dos capas de Burmister¹² Sin compactar

$$h_1/a = 8'' / 6'' = 1.33$$

$$E_1 / E_2 = 20000 \text{ psi} / 3900 \text{ psi} = 5.12$$

¹² Factor de deflexión para diseño de pavimentos mediante el análisis semiempírico diseñado por Burmister donde analiza el pavimento como una serie de capas.

Figura 8.23 Gráfica de Burmister. Deflexión superficial de dos capas



Deflexión superficial (In)

$$W_0 = \frac{1.5 \cdot q \cdot a}{E_2} \cdot F_2 = \frac{1.5 \cdot 100 \text{ psi} \cdot 6 \text{ In}}{3900 \text{ psi}} \cdot 0.51 = 0.118 \text{ In} \quad (8)$$

2. Cálculo del módulo compuesto de una sola capa que proporciona una deflexión equivalente

$$E = \frac{1.5 \cdot q \cdot a}{W_0} = \frac{1.5 \cdot 100 \text{ psi} \cdot 6 \text{ In}}{0.118 \text{ In}} = 7627.19 \text{ psi} \quad (9)$$

Paso 4. Determinación del número estructural – determinación del espesor de la capa de asfalto
poros requerido para el tráfico de diseño.

$$\log_{10}(50.000) = -0.674 * 0.45 + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10} \left[\frac{2.5}{4.2 - 1.5} \right]}{\left[0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \right]}$$

$$+ 2.32 * \log_{10}(7627.19) - 8.07$$

$$SN_{\text{req}} = 1.86$$

$$d_{\text{asfalto}} = (SN / a_1) = 1.86 / 0.40 = 4.65 \text{ In}$$

$$d_{\text{asfalto}} = 4.65 \text{ In} \cong 0.118\text{m}$$

Paso 5. Diseño estructural usando la ecuación con el M_R de la capa de grava.

$$\log_{10}(50.000) = -0.674 * 0.45 + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10} \left[\frac{2.5}{4.2 - 1.5} \right]}{\left[0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}} \right]}$$

$$+ 2.32 * \log_{10}(20.000) - 8.07$$

$$SN_{\text{mínimo}} = 1.25$$

$$D_{\text{mínimo}} = (SN / a_1) = 1.25 / 0.40 = 3.13 \text{ In}$$

$$D_{\text{mínimo}} = 3.13 \text{ In} \cong 0.08\text{m}$$

Paso 6. Diseño estructural final.

Por diseño hidrológico se requiere un espesor de 7.5cm, sin embargo, por efecto del tráfico a soportar el diseño se aumenta a 12 cm. La estructura drenante se mantiene en un espesor de 20cm.

Figura 8.24 Capas de la estructura final del SUDS con rodadura en asfalto



Fuente: Elaboración propia.

8.4.1.2.4 Diseño de pavimento en concreto poroso (permeable)

Para el diseño de la estructura con un concreto, se debe partir de algunos de los siguientes parámetros de diseño:

Diseño a la compresión: 3000 psi – 20.68 MPa.

Contenido de vacíos: 15 – 30%

El concreto puede corresponder a un diseño específico o puede provenir de planta, en donde realizan el diseño de la mezcla en función del proyecto. Asimismo, existen aditivos que pueden ayudar en el desempeño del diseño de la mezcla.

En el país existen dos ejemplos de proveedores de concreto permeable y aditivos para mezcla de concreto, cementos Argos y Toxement respectivamente.

Al igual que para el caso del diseño de la mezcla de asfalto para pavimentos, las mezclas de concreto para pavimentos están enfocadas a tráfico pesado, en los cuales se proyectan proyecciones de tráfico de carga pesada para el periodo de diseño. En el diseño para el presente ejercicio se toma el mismo EALS proyectado para la estructura de asfalto poroso.

Para el diseño de la estructura de pavimento, se empleó el software de diseño de pavement designer.

Figura 8.25. Diseño de estructura con pavimento permeable.

ESTIMATED TRAFFIC FROM ASPHALT DESIGN

Number of layers: 2 Layers (dropdown)
 Reliability: 75 (input)
 Subgrade Resilient Modulus: 3,900 (psi) (input)

	Material	Layer Coefficient, a	Drainage Coefficient, m	Thickness
LAYER 1	Asphalt Cement Concrete (dropdown)	0.44 (input)	1 (input)	4.5 (in) (input)
LAYER 2	Crushed Stone Base (dropdown)	0.1 (input)	1 (input)	8 (in) (input)
LAYER 3	Select Material (dropdown)	(input)	(input)	(in) (input)
LAYER 4	Select Material (dropdown)	(input)	(input)	(in) (input)
LAYER 5	Select Material (dropdown)	(input)	(input)	(in) (input)
LAYER 6	Select Material (dropdown)	(input)	(input)	(in) (input)

DEFAULT PARAMETERS

Overall Standard Deviation: 0.45 (input)
 Initial Serviceability: 4.5 (input)
 Terminal Serviceability: 2.5 (input)
 EDIT (button)

TRAFFIC OUTPUTS

Structural Number (SN): 2.78 (input)
 Flexible ESALs: 119,253 (input)
 Average Trucks/Day: 108 (input)
 Total Trucks Over Design Life: 395,160 (input)
 SAVE (button)

Fuente: www.pavementdesigner.org

Nota: En el software, la capa definida como Layer 1, muestra “Asphalt cement concret” el cual corresponde a la capa o rodadura de concreto.

De acuerdo con los datos arrojado por el software, la conformación de la estructura es la siguiente:

Figura 8.26 Capas de la estructura final del SUDS con rodadura en concreto



Fuente: Elaboración propia.

8.4.1.3 *MODELACIÓN DEL SUDS*

Una vez se definen las estructuras de los SUDS, se procede con el modelado de estos para establecer cómo funcionan y su posible eficiencia. Para este análisis se procede a realizar el modelo mediante el software de sistemas de drenaje de alcantarillado de la US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) SWMM (Storm Water Management Model).

Para tal fin, se procedió a modelar 3 escenarios de las redes del sistema pluvial del tramo comprendido entre la calle 100 y la diagonal 108, bajo las siguientes condiciones para realizar el análisis del modelo.

- i. La red existente de alcantarillado.
- ii. Red existente de alcantarillado sin el aporte del área aferente aguas arriba de la calle 100.
- iii. Red existente de alcantarillado con SUDS y sin el aporte del área aferente aguas arriba de la calle 100.

A continuación, se describen cada uno de los escenarios.

Condición 1. Red existente de alcantarillado pluvial.

De acuerdo con la información secundaria de la EAAB (SIGUE) y el contrato IDU 1073 de 2016, con el cual se realizaron los levantamientos de las redes existentes, se realizó el modelo con los datos de topografía para tomar las cotas del sistema y rasante. Asimismo, los datos de materiales y áreas de drenaje.

Los datos de precipitaciones para la estimación de las curvas IDF son tomadas del estudio de tormentas de la EAAB realizado por la firma de consultoría INGETEC. En la **Figura 8.27** se presenta la respectiva información.

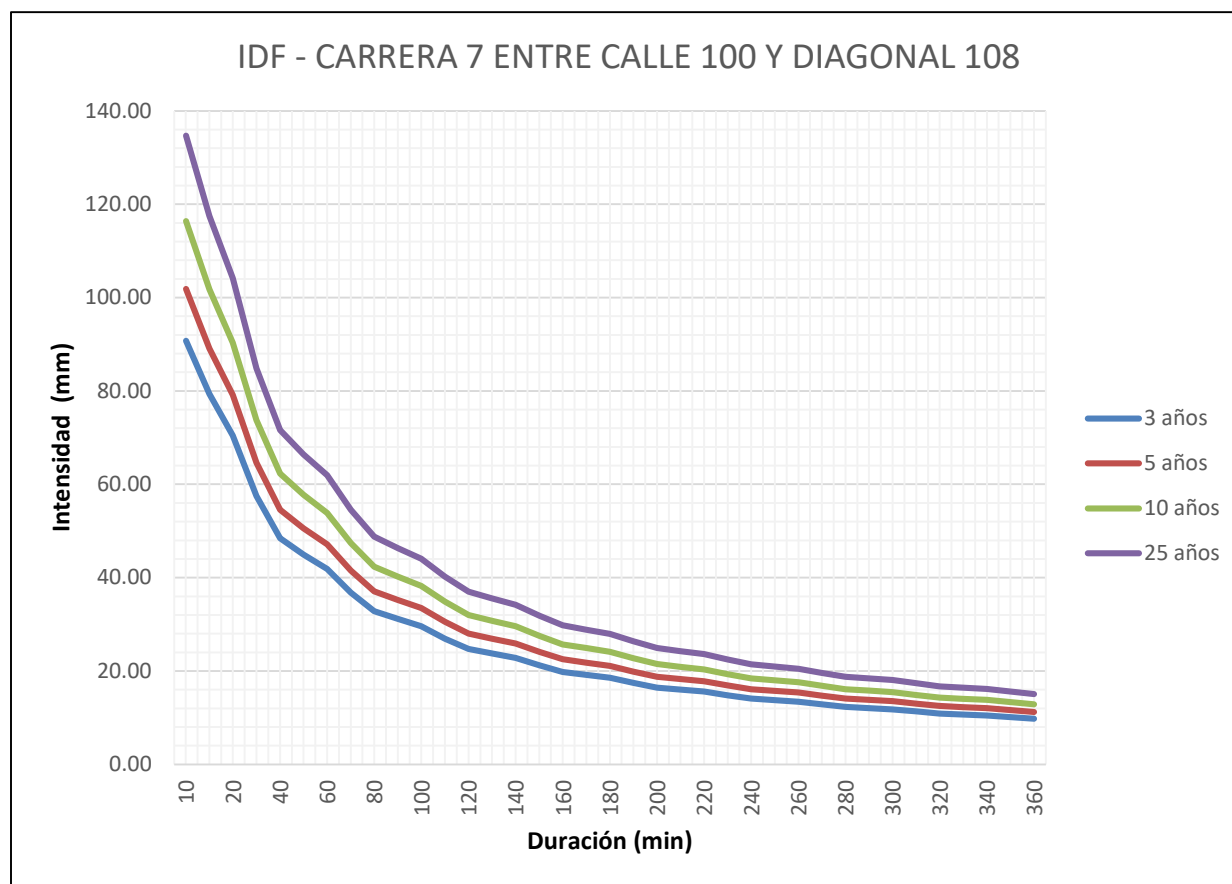
Figura 8.27 Parámetros curva IDF para el estudio.

														
ECUACIÓN $INTENSIDAD = C_1 (DURACIÓN + X_0)^{C_2}$														
Código	ESTE	NORTE	Tiempo retorno 3 Años			Tiempo retorno 5 Años			Tiempo retorno 10 Años			Tiempo retorno 25 Años		
			C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2
1	104515	109600	3947.735	26.6	-1.04791	4046.31	25.9	-1.02822	4508.582	25.6	-1.0236	4610.195	24.1	-1.00098
		min	3947.735	26.6	-1.04791	4046.31	25.9	-1.02822	4508.582	25.6	-1.0236	4610.195	24.1	-1.00098
		max	3947.735	26.6	-1.04791	4046.31	25.9	-1.02822	4508.582	25.6	-1.0236	4610.195	24.1	-1.00098
		promedio	3947.735	26.6	-1.04791	4046.31	25.9	-1.02822	4508.582	25.6	-1.0236	4610.195	24.1	-1.00098
		datos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

Con esta información se procede a realizar las gráficas de las curvas IDF, las cuales se presentan en la **Figura 8.28** .

Figura 8.28 Curvas IDF sector de la calle 100 con carrera 7.

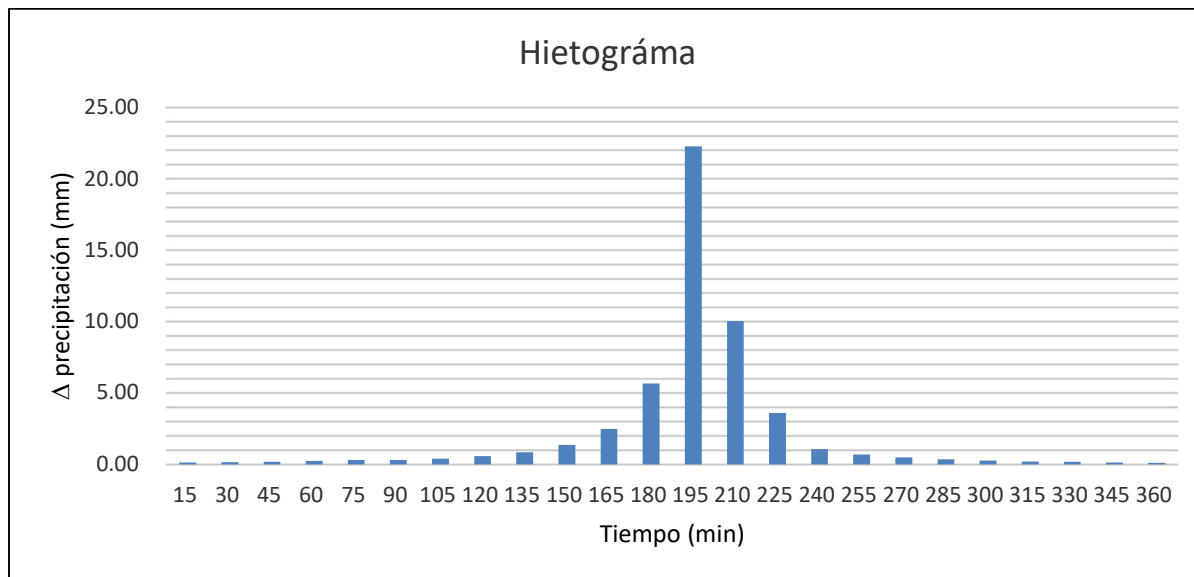


Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con esta información se elabora el hietograma para poder realizar el modelo. En la

Figura 8.29 se presenta la respectiva gráfica.

Figura 8.29 Hietograma sector calle 100 a diagonal 108



Fuente: Elaboración propia.

Con la información completa de topografía, materiales e hidrología, se procede a elaborar el modelo completo en condiciones existentes de la infraestructura del corredor.

La **Figura 8.30** se presenta el modelo de las condiciones de redes existentes y áreas de drenaje del corredor de la carrera 7.

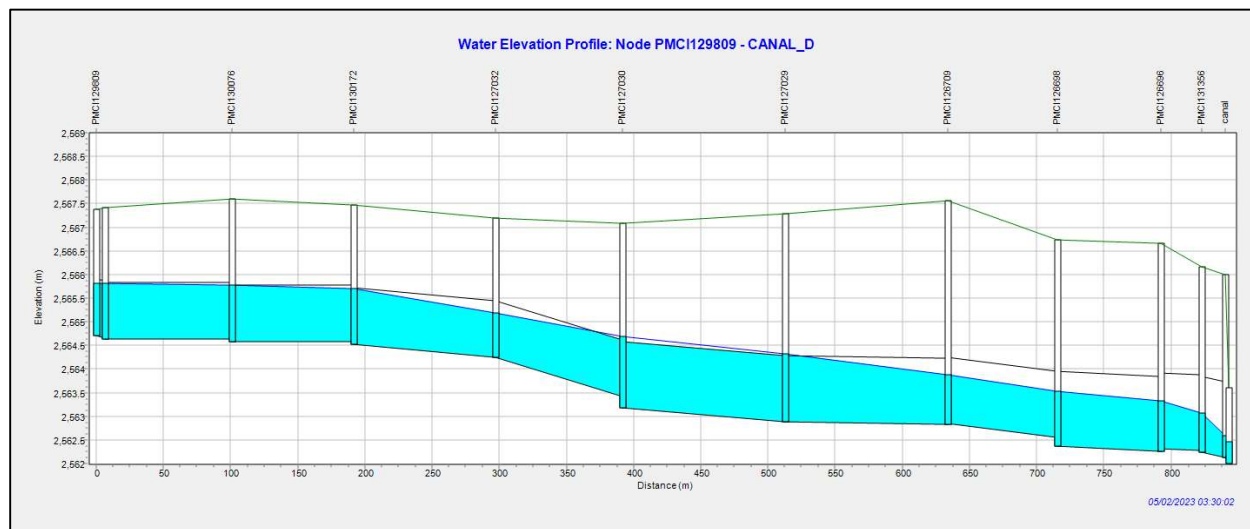
Figura 8.30 Modelo SWMM corredor carrera 7 entre calle 100 y diagonal 108.



Fuente: Elaboración propia.

Quando se corre del modelo, se pueden evidenciar las condiciones de la capacidad hidráulica de la red pluvial existente para el pico del hietograma como se muestra en la **Figura 8.31**.

Figura 8.31 Perfil colector existente para el pico del evento.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el perfil hidráulico se evidencia que el sistema presenta una insuficiencia hidráulica de la red en algunos tramos para las condiciones existentes de la red instalada. En este caso es importante tener en cuenta que la infraestructura existente es antigua y puede estar cerca del tiempo de vida útil del sistema, lo cual, aunado con los cambios en los regímenes de lluvias ocasionados por el cambio climático agrava las condiciones operativas de la red. De acuerdo con el modelo realizado, existe una insuficiencia hidráulica del colector existente y se requiere de un refuerzo de la infraestructura en el corto plazo.

Condición 2. Red de alcantarillado pluvial existente sin incluir las áreas de drenaje aguas arriba de la calle 100.

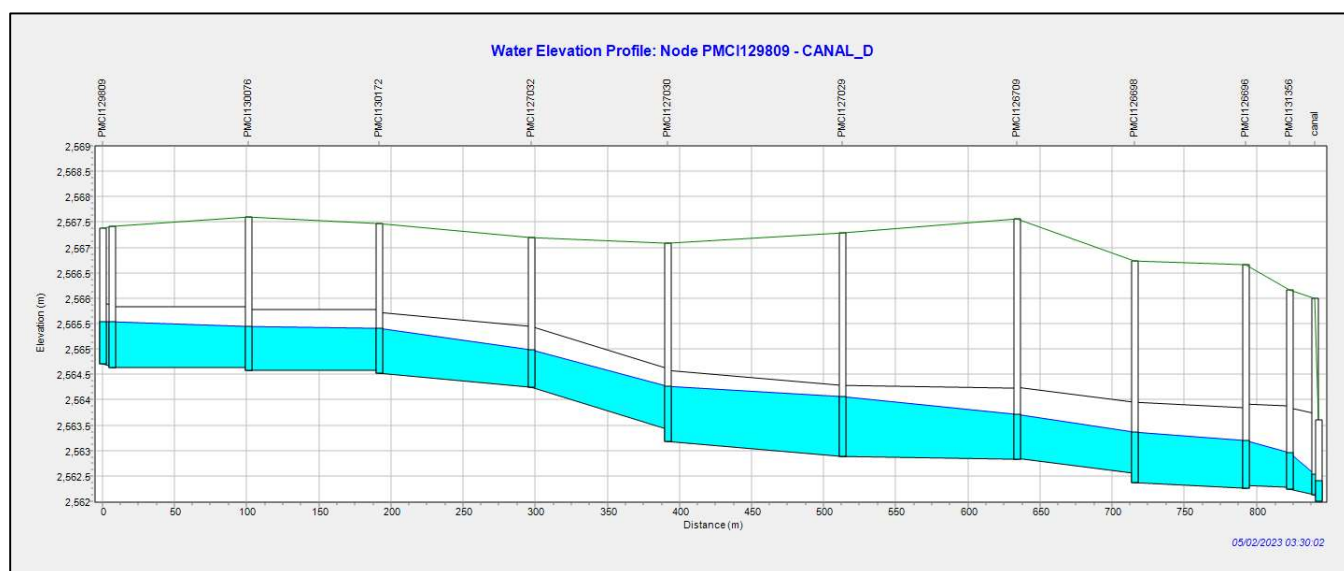
Para este caso se analiza la red existente considerando únicamente con las áreas de drenaje de los sumideros del corredor, pero no se incluye el área de drenaje inicial aguas arriba de la calle 100.

Lo anterior, se base en dos postulados. El primero es que, al realizar el análisis de las condiciones actuales, el sistema evidencia una insuficiencia hidráulica en el tramo que se realizará el estudio con SUDS, por lo cual, al realizar el análisis con la totalidad de caudal el impacto de los SUDS puede llegar a no ser representativo al manejar el colector un caudal alto. El segundo aspecto es el relacionado con el tramo aguas arriba de la calle 100, que es el sector que presenta el mayor aporte del caudal al sistema, es el tramo susceptible de aliviar en el colector y así dar una mayor vida útil a este desde la calle 100 hasta la entrega al canal Los Molinos. En esta condición se puede generar un mayor alivio al sistema quitando las áreas de drenaje propuestas más el sistema de SUDS.

En la **Figura 8.32** se puede evidenciar la infraestructura pluvial a modelar con las respectivas áreas de drenaje.

presenta el perfil hidráulico del colector principal y en la **Tabla 8.14** se presenta el resumen de características hidráulicas por tramo.

Figura 8.33 Perfil colector con áreas de drenaje de sumideros.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior su evidencia la operación del colector pluvial en el pico del evento, el cual se presenta aproximadamente a las 3:30 horas de la lluvia de diseño.

Tabla 8.14. Tabla de resumen de resultados de características hidráulicas del colector. Modelo SWMM.

Link	Type	Maximun [Flow] LPS	Hour of Maxium Flow	Maximum [Velocity] m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
PMCI129809- PMCI129815	CONDUIT	637.55	0:00	2.24	0.21	0.73
PMCI129815- PMCI130076	CONDUIT	666.12	0:04	0.85	1.66	0.74
PMCI130076- PMCI130172	CONDUIT	652.16	3:28	1.2	1.59	0.74
PMCI130172- PMCI127032	CONDUIT	2190.16	0:05	2.73	1.07	0.69
PMCI127032- PMCI127030	CONDUIT	2516.35	3:34	3.39	0.69	0.67
PMCI127030- PMCI127029	CONDUIT	2569.6	3:35	2.02	0.91	0.82
PMCI127029- PMCI126709	CONDUIT	2566.11	3:35	2.16	1.96	0.75
PMCI126709- PMCI126698	CONDUIT	2584.83	3:32	2.59	0.75	0.62
PMCI126698- PMCI126696	CONDUIT	2641.51	3:33	2.04	0.83	0.62
PMCI126696- PMCI131356	CONDUIT	2655.46	3:33	2.41	1.01	0.54
PMCI131356-canal	CONDUIT	2756.39	3:33	4.35	0.41	0.35

Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia en el modelo, el funcionamiento hidráulico del colector es adecuado con relación a la capacidad de este. En el tramo en el que se presenta una menor pendiente su capacidad llega aproximadamente al 82% de llenado, la cual de acuerdo con la norma técnica de la EAAB NS-085 es adecuada para su operación.

Condición 3. Red de alcantarillado pluvial existente sin incluir las áreas de drenaje aguas arriba de la calle 100 e incluyendo los SUDS.

Para este caso se evalúa el corredor con las mismas características hidráulicas de la condición 2 pero con la implementación de los sistemas de SUDS propuestos con pavimentos porosos. En el software SWMM se encuentra el módulo LID, el cual le permite al software simular el comportamiento del SUDS en la cuenca cuando ocurre la lluvia de diseño.

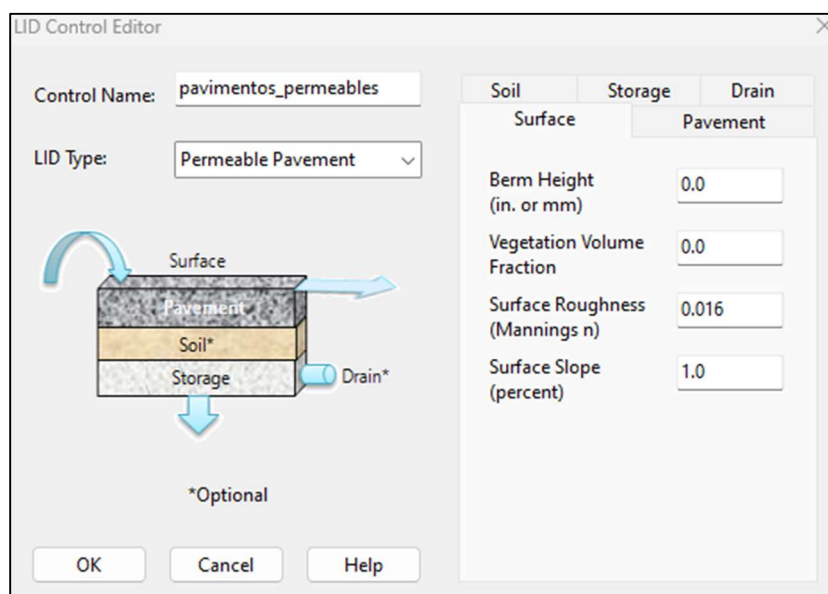
El módulo LID para pavimentos permeables, contempla 5 parámetros para su análisis que son:

La superficie de drenaje, el pavimento, el suelo, el almacenaje y drenaje.

Los anteriores parámetros deben corresponder a las características propias del suelo de implantación del sistema de drenaje, materiales del SUDS a emplear y las características del material de almacenamiento del SUDS. En la **Figura 8.34** se presenta la interfaz del programa para configurar el modelo del SUDS.

Figura 8.34

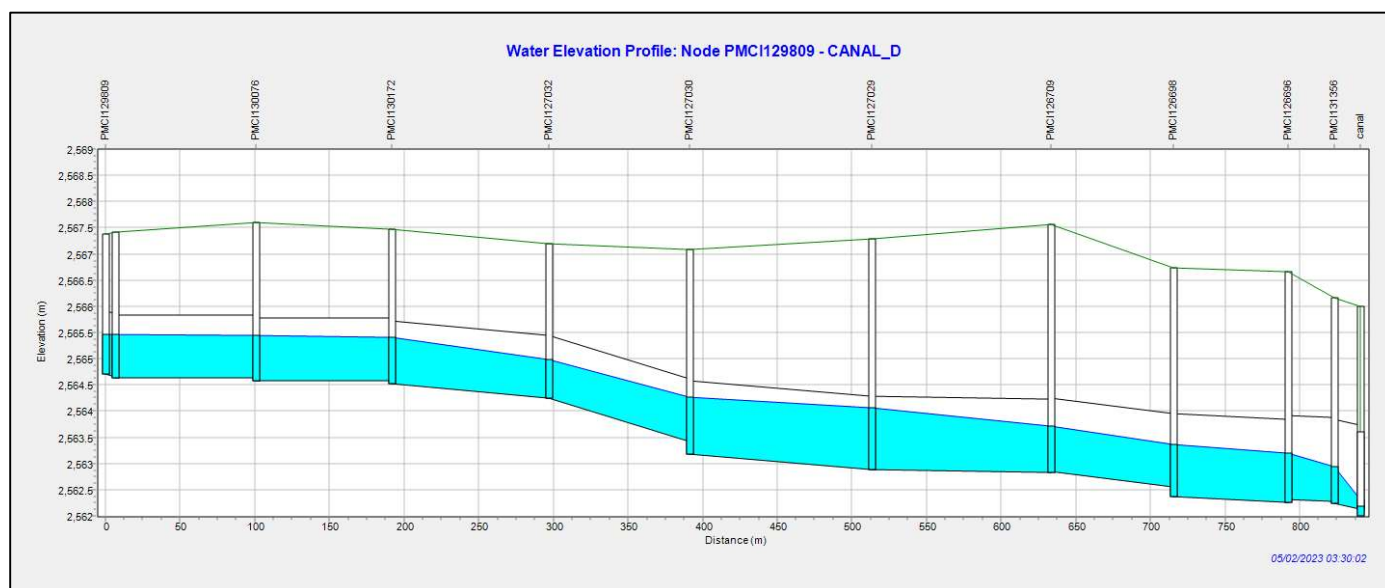
Interfaz del módulo LID en el software SWMM



Fuente: Software SWMM

Después de correr el modelo, se evidencia cómo la operación del sistema con los aportes generados por los sumideros que están conectados directamente al colector y el alivio que producen los SUDS proyectados, que en este caso está representado en el pavimento permeable. En la **Figura 8.36** se presenta el perfil hidráulico del colector principal y en la **Tabla 8.15** se presenta el resumen de caudales por tramo.

Figura 8.36 Perfil colector con áreas de drenaje de sumideros.



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica anterior su evidencia la forma en la cual opera el colector pluvial en el pico del evento, el cual se presenta aproximadamente a las 3:30 horas del evento de diseño.

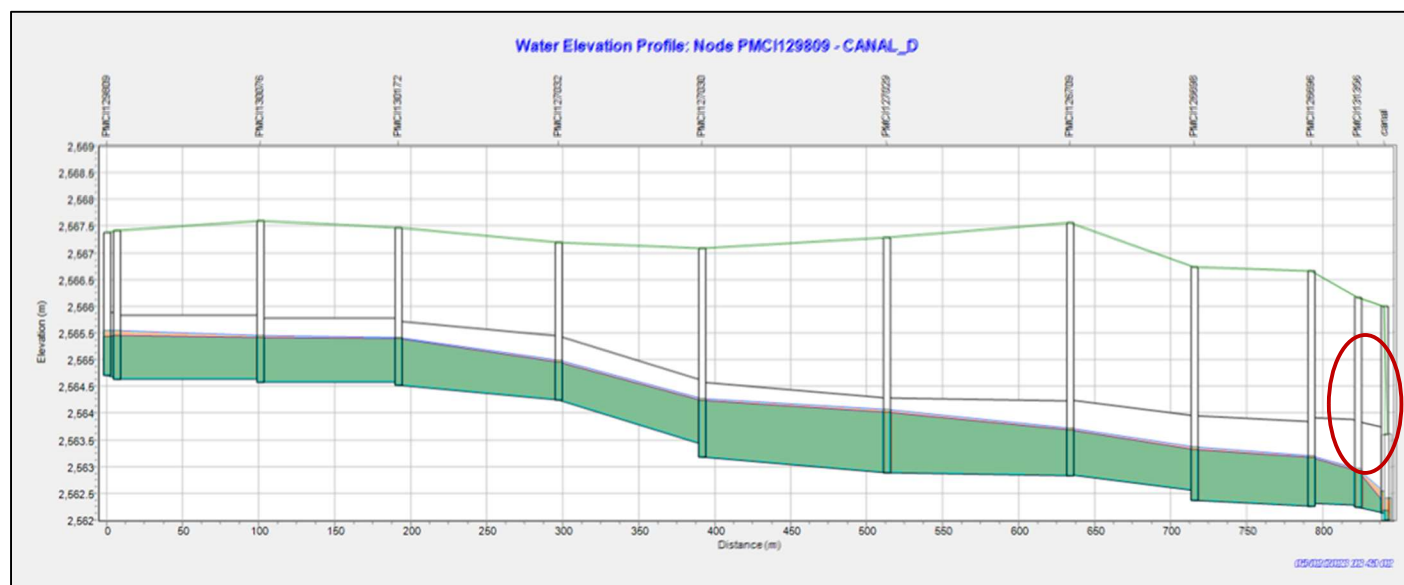
Tabla 8.15. Resumen resultados de caudales colector.

Link	Type	Maximun [Flow] LPS	Hour of Maxium Flow	Maximum [Velocity]m/sec	Max / Full Flow	Max / Full Depth
PMCI129809-PMCI129815	CONDUIT	660.42	0:00	2.29	0.22	0.73
PMCI129815-PMCI130076	CONDUIT	665.99	0:04	0.85	1.66	0.74
PMCI130076-PMCI130172	CONDUIT	648.96	0:04	1.21	1.58	0.74
PMCI130172-PMCI127032	CONDUIT	2190.21	0:05	2.73	1.07	0.69
PMCI127032-PMCI127030	CONDUIT	2510.11	0:05	3.39	0.69	0.66
PMCI127030-PMCI127029	CONDUIT	2524.41	3:32	2.03	0.89	0.81
PMCI127029-PMCI126709	CONDUIT	2530.92	3:32	2.16	1.93	0.74
PMCI126709-PMCI126698	CONDUIT	2553.41	3:33	2.58	0.74	0.61
PMCI126698-PMCI126696	CONDUIT	2601.04	3:33	2.03	0.82	0.61
PMCI126696-PMCI131356	CONDUIT	2606.38	3:33	2.39	0.99	0.53
PMCI131356-canal	CONDUIT	2698.44	3:33	5.87	0.41	0.28

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el análisis comparativo entre la condición 2 y 3 para la hora pico del evento que está a las 3:30 horas del inicio del evento, se evidencia que para el tramo comprendido entre el pozo PMCI127032 y la descarga al canal, la variación de caudal oscila entre los 6.24 a los 57.95 l/s, con lo cual se demuestra la eficiencia de la captación del SUDS en el sistema de drenaje y su impacto en la descarga al canal Molinos. En la **Figura 8.37** se observa en color naranja el nivel de la lámina de agua en el colector en la condición 2 y en color verde en la condición 3. En esta gráfica se puede apreciar especialmente el alivio del sistema en la descarga en el canal Los Molinos como se mencionó anteriormente.

Figura 8.37 Comparación de los perfiles de la lámina de agua en los colectores para la condición 2 y 3.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 8.16** se presenta la comparación de caudales entre la condición 2 y 3. En este caso los valores negativos indican las variaciones de caudales del colector existente con respecto al proyectado con SUDS donde hay un ligero aumento en los caudales del último; sin embargo, en los otros tramos del colector se presentan los alivios generados en el colector con los SUDS.

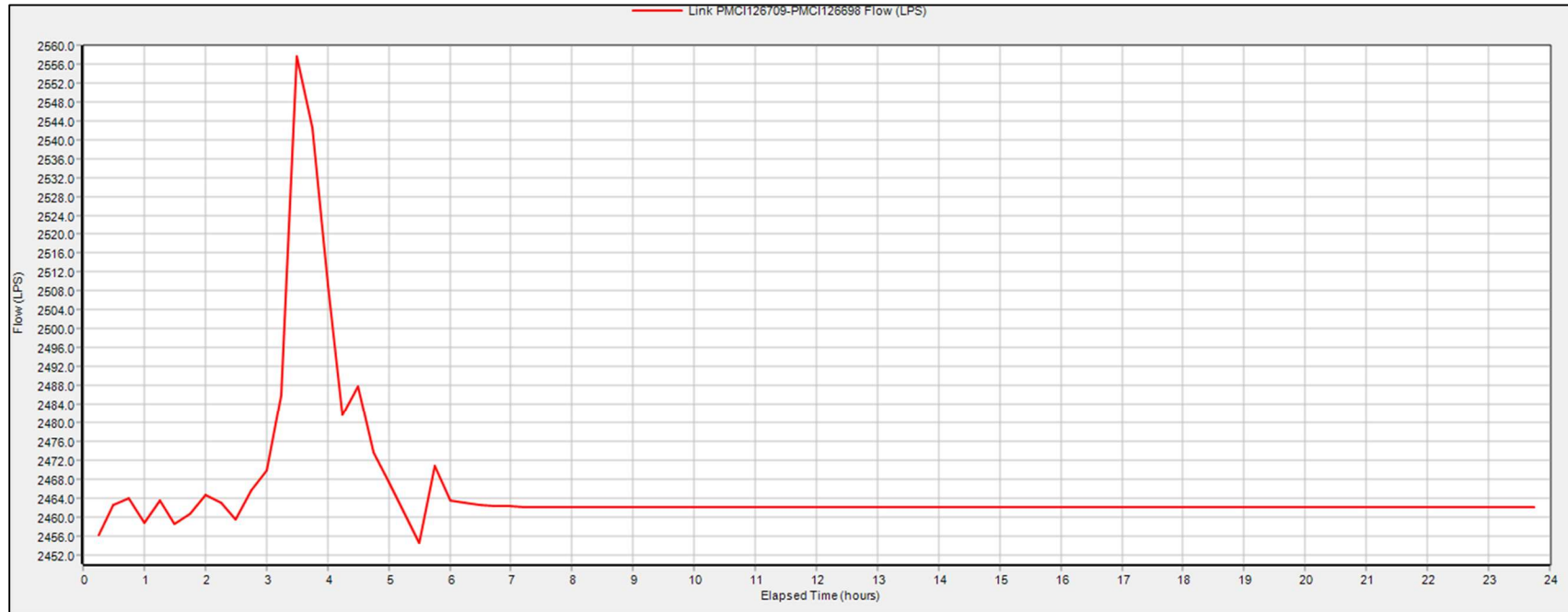
Tabla 8.16. Resumen resultados de caudales colector.

Link	Type	Variation [Flow] LPS
PMCI129809-PMCI129815	CONDUIT	-22.87
PMCI129815-PMCI130076	CONDUIT	0.13
PMCI130076-PMCI130172	CONDUIT	3.20
PMCI130172-PMCI127032	CONDUIT	-0.05
PMCI127032-PMCI127030	CONDUIT	6.24
PMCI127030-PMCI127029	CONDUIT	45.19
PMCI127029-PMCI126709	CONDUIT	35.19
PMCI126709-PMCI126698	CONDUIT	31.42
PMCI126698-PMCI126696	CONDUIT	40.47
PMCI126696-PMCI131356	CONDUIT	49.08
PMCI131356-canal	CONDUIT	57.95

Fuente: Elaboración propia.

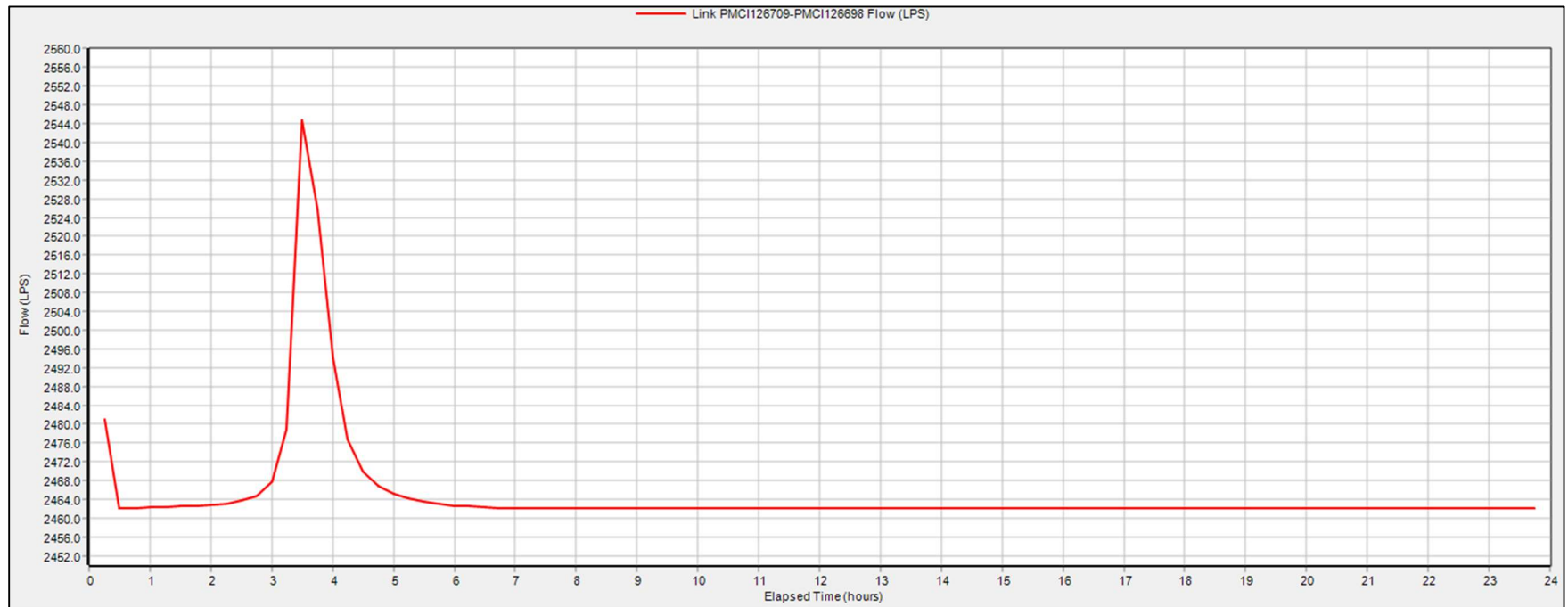
Adicionalmente, se elaboraron las curvas de caudal Vs tiempo de los tramos finales del colector con el fin de evaluar cómo se comporta el colector en las dos condiciones modeladas, sin la incorporación de los SUDS. En la **Figura 8.38** a **Figura 8.41** se presentan las gráficas obtenidas del software SWWM,

Figura 8.38 Curva caudal Vs tiempo sin SUDS - pozos PMCI 126709 – PMCI 126698



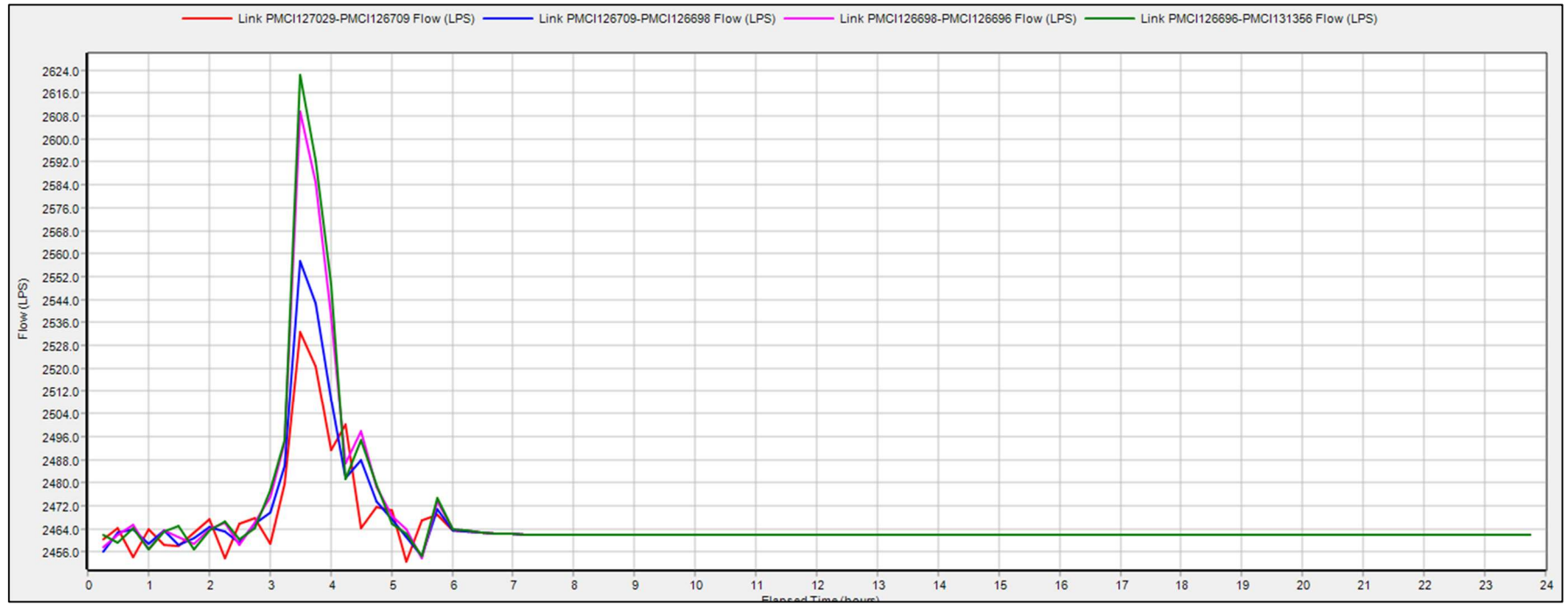
Fuente: Elaboración propia

Figura 8.39 Curva caudal Vs tiempo con SUDS - pozos PMCI 126709 – PMCI 126698



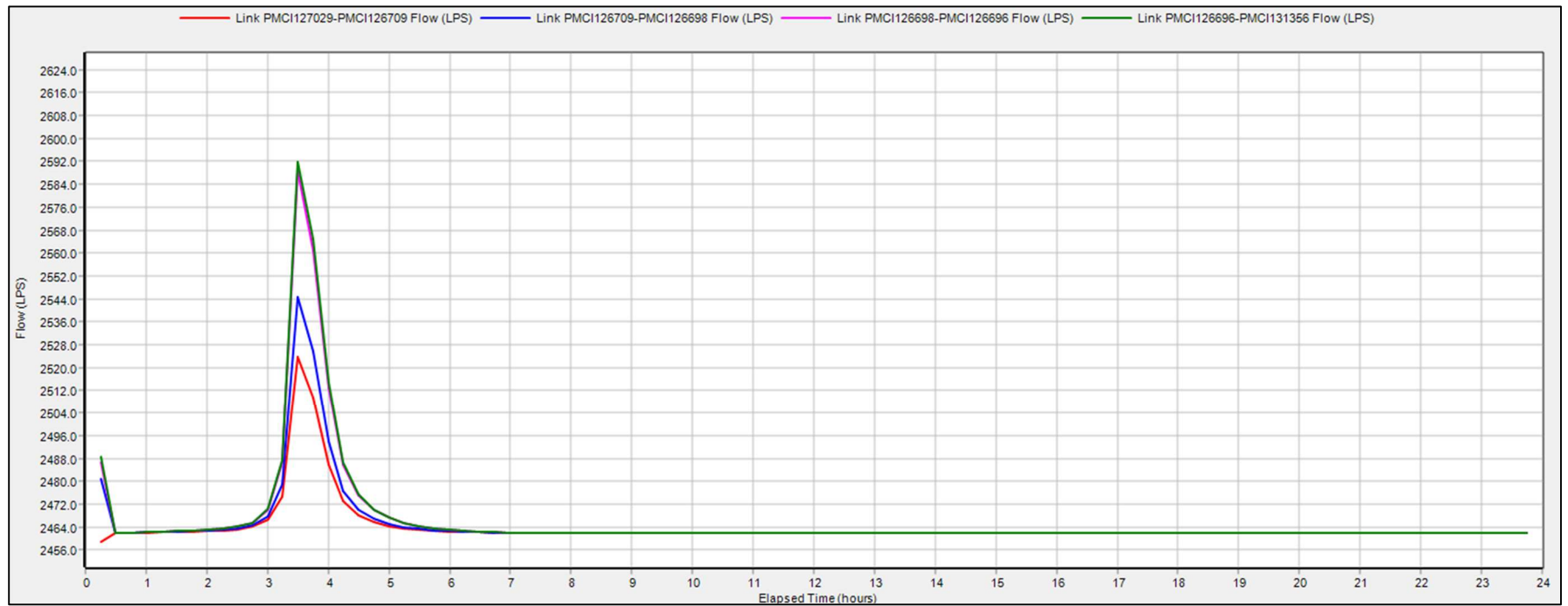
Fuente: Elaboración propia

Figura 8.40 Curva caudal Vs tiempo sin SUDS - pozos PMCI 127029 – PMCI 131356



Fuente: Elaboración propia

Figura 8.41 Curva caudal Vs tiempo con SUDS - pozos PMCI 127029 – PMCI 131356



Fuente: Elaboración propia

Las gráficas presentadas evidencian una clara disminución en los picos de caudal en el periodo comprendido entre las 3 y 5 horas del evento, manteniendo un comportamiento más estable de los caudales y un menor volumen en el sistema por el efecto del complemento en la infraestructura de los SUDS en comparación del colector operando en su forma tradicional.

Con este ejercicio se puede determinar cómo funciona la captación de la escorrentía superficial mediante un sistema de SUDS en un sistema de drenaje de una vía y cuál es la eficiencia que puede llegar a aportar a la infraestructura convencional con captación mediante sumideros y conducción de aguas lluvias mediante un sistema de tuberías.

Es importante tener en cuenta que el corredor seleccionado cuenta con características particulares en la conformación de la sección vial, lo cual ocasiona que los SUDS proyectados cuenten con una desventaja para su implementación, como lo es el tamaño del área drenaje impermeable la cual es muy grande en contraste con el área de zona verde existente en la zona, generando que no se permita una mayor infiltración de la escorrentía superficial y que esta fluya hacia las zonas de calzada generando láminas y caudales altos. Aun a pesar de la condición adversa descrita anteriormente para la implementación de los SUDS, se presenta un importante aporte al control de los caudales y de la conducción del agua lluvia que transita en los sistemas convencionales.

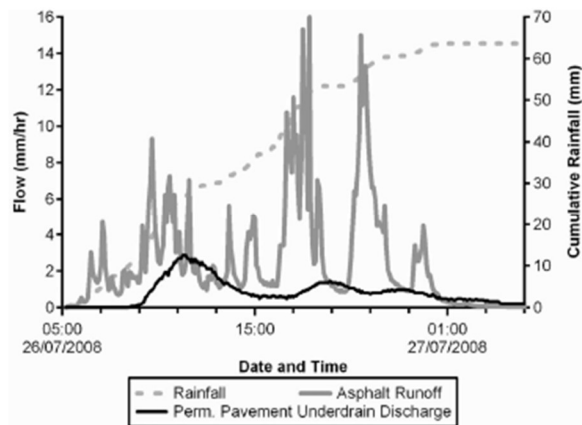
Es importante validar la eficiencia del pavimento permeable mediante instrumentación que se pueda realizar en campo una vez estén contruidos los bicarriles. Para esto, se debe realizar mediciones para recopilar la información de la lluvia por medio de pluviómetros. Asimismo, la escorrentía debería ser medida mediante transductor de medida de agua para medir la profundidad de la lámina de agua en la calzada. Con las anteriores mediciones se pueden

elaborar curvas de profundidad caudal para cada equipo, que permita la estimación de caudales medidos en campo. Estas mediciones deben realizarse para los pavimentos convencionales y los permeables para poder comparar la eficiencia entre los dos.

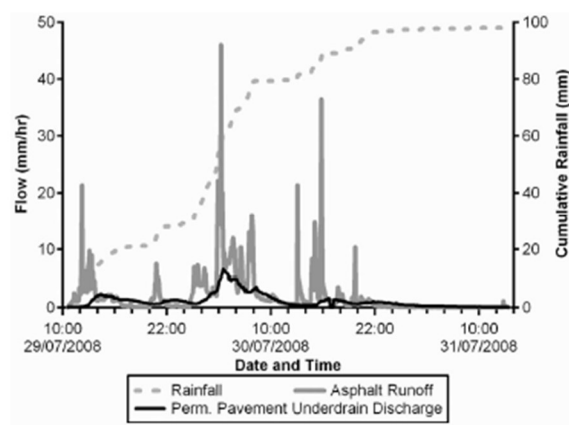
Esta metodología para la medición de caudales la elaboraron en Auckland, Nueva Zelanda (Fassman & Blackbourn, 2010). Con el estudio se elaboraron los hidrogramas para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, con los cuales se demostró que los pavimentos permeables presentaban picos más pequeños y una reducción de los volúmenes de esorrentía.

Figura 8.42 Hidrogramas realizados en Auckland para ensayos de pavimentos permeables.

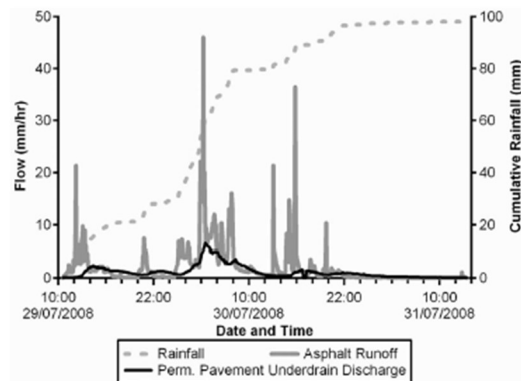
Fassman y Blackbourn.



a. Periodo de retorno de 2 años



b. Periodo de retorno de 5 años



c. Periodo de retorno de 10 años

Fuente: (Fassman & Blackbourn, 2010)

Finalmente, es importante que se pueda evaluar el efecto que se tiene en los pavimentos permeables por la intensidad de las lluvias. Para esto, se puede partir del estudio realizado por (Jung & Kim, 2012), en el cual se pudo analizar el comportamiento del pavimento en función de la cantidad de infiltración y escurrimiento para diferentes intensidades. Con estos estudios se establecen las eficiencias de los pavimentos para los diferentes eventos que se pueden presentar en un periodo de tiempo, con lo cual se pueden evaluar medidas de contingencia para proteger el sistema de drenaje vial integral, entendiéndose este como el conjunto entre el sistema convencional y los SUDS.

9 PROCESO CONSTRUCTIVO

Para que un proyecto que contemple el uso de pavimentos porosos tenga éxito en su operación, este debe enfocarse en tres factores esencialmente, los procesos de preconstrucción, la calidad de los materiales y el proceso de construcción. Asimismo, existen factores externos que influyen de forma directa en la vida útil de la operación de los pavimentos porosos o permeables como por ejemplo la protección de la zona de intervención y el cuidado del sitio de obra durante el proceso constructivo de los SUDS.

Expuesto lo anterior, cobra vital importancia la planificación de la programación de obra con el fin de evitar los riesgos asociados al no cumplimiento de los EDT (Estructura de Desglose del Trabajo) establecidos para la etapa de preconstrucción y construcción.

Actualmente en diferentes ciudades alrededor del mundo donde se han ido implementando proyectos de infraestructura sostenible, se han desarrollado metodologías propias para la construcción, operación y mantenimiento de SUDS. Con base en lo anterior, a continuación, se propone una guía metodológica que puede ser implementada en proyectos de construcción de SUDS a nivel local y nacional. Esta metodología tiene como base la realizada para el estado de Iowa en Estados Unidos, donde se reglamentó el procedimiento para la construcción de SUDS con pavimentos permeables (Iowa Department of Natural Resources, 2019), el cual parte de establecer la etapa de preconstrucción y desarrolla la etapa de construcción del proyecto.

A continuación, se presentan las etapas propuestas para la construcción de SUDS con pavimentos poros para proyectos de bicarriles.

9.1 PRECONSTRUCCIÓN.

En la primera etapa del proyecto se deberá realizar la reunión de inicio entre contratista, interventoría y aquellas partes que forma contractual intervienen en la toma de decisiones técnicas dentro del proyecto, con el fin de establecer las condiciones de la instalación del sistema de SUDS de pavimentos permeables. En esta reunión se debe dejar claramente especificado las características del proceso constructivo con el fin de establecer una clara diferencia de la construcción de una estructura de pavimento convencional a un pavimento permeable.

Es de vital importancia capacitar al personal en temas como la no compactación del suelo natural toda vez que esto hace parte de la eficiencia de la estructura y su periodo de vida útil.

Como resultados de las reuniones se debe dejar como constancia una lista de chequeo por cada tramo a ejecutar en la obra. La siguiente lista hace parte del capítulo 8, pavimentos permeables del Manual de manejo de agua pluvial de Iowa, (Iowa Department of Natural Resources, 2019).

A continuación, se presenta la lista de chequeo que se debe realizar antes del inicio de obra de cada tramo.

- ☒ Recorrido por el corredor del tramo a intervenir:
 - Elaboración del plan de control de erosión y sedimentos.
 - Elaboración del plan de prevención de contaminación de aguas pluviales (SWPPP)¹³
- ☒ Secuencia de construcción:
 - Identificar en que parte de la secuencia de la construcción del proyecto se construirá el pavimento permeable e identificar las medidas a tomar para minimizar los impactos de la construcción.

¹³ Puede tomarse como fuente el EPA-833-R-06-044 de la Environmental Protección Agency – United States. May 2007.

☒ Identificación de sitios:

Se debe identificar los sitios para el almacenamiento del material agregado y las rutas de acceso a la obra.

☒ Instalación de un tramo de prueba para aprobación y antes de la ejecución de todo el corredor a construir.

☒ Pruebas de los materiales

☒ Mantenimiento de los materiales limpios

☒ Informes de seguimiento y control (implementación de los sistemas de calidad)

☒ Plan de compactación:

Selección de la maquinaria, personal que ejecutará las obras y control del proceso.

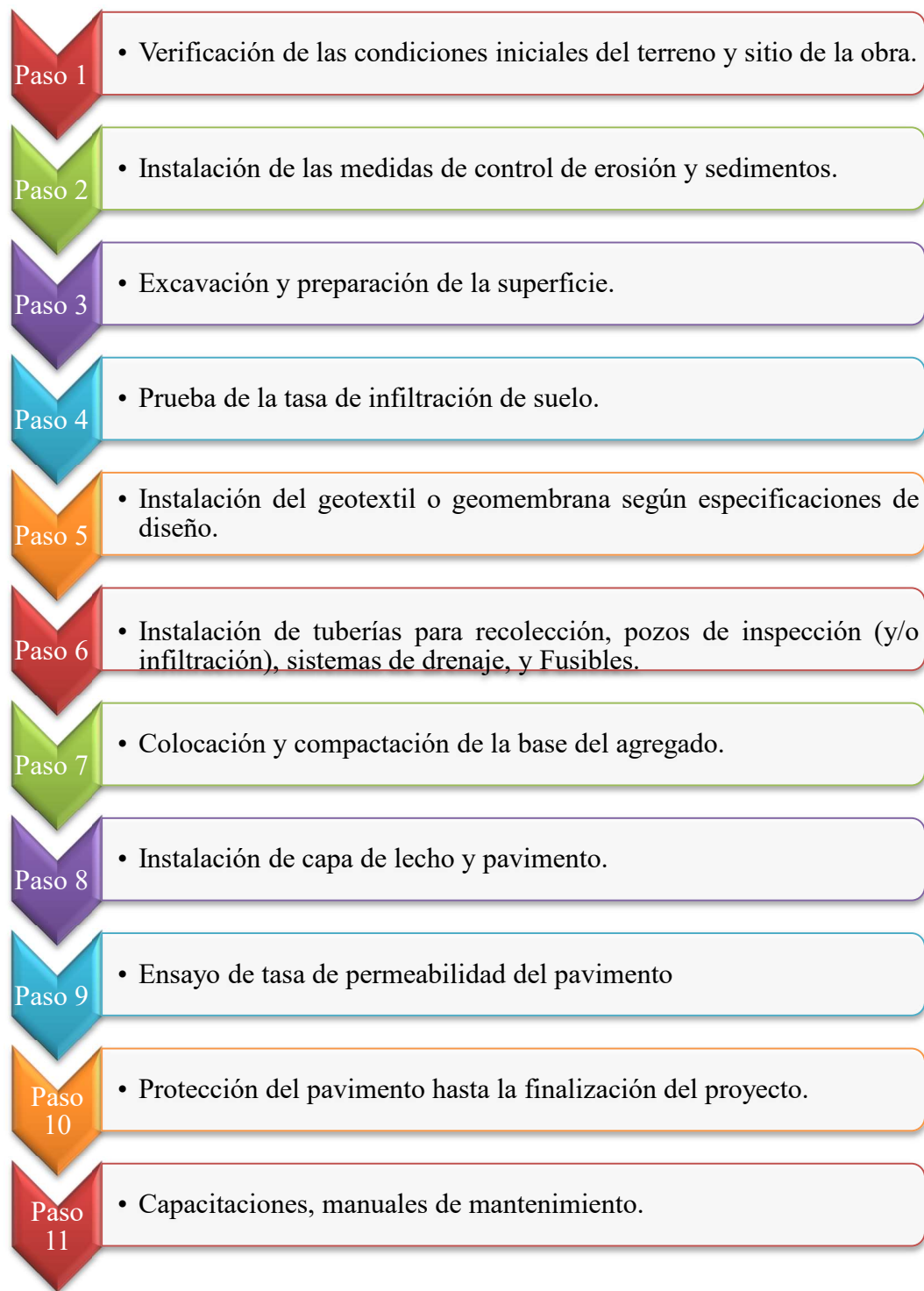
Fuente: Basado en el (Iowa Department of Natural Resources, 2019).

Surtida la etapa de preconstrucción y con el contratista e interventoría coordinados en la metodología de construcción se procede a entrar en la etapa de construcción.

9.2 CONSTRUCCIÓN

Así como en la etapa de preconstrucción se definieron los procedimientos para tener en cuenta en la etapa de construcción, con énfasis en el proceso de compactación de la subrasante y la protección del corredor, la etapa de construcción debe definir unos pasos para la preparación de la subrasante, colocación de los materiales, ensayos, obras de alivio, etc. Así las cosas, se procede con establecer los siguientes pasos para la construcción de la estructura.

Figura 9.1 Etapas de proceso constructivo.



Fuente: Adaptación del autor.

Nota: Los anteriores pasos, con excepción del número 9, son tomados de (Iowa Department of Natural Resources, 2019).

Paso 1: Para el inicio de la construcción será necesario la verificación de las siguientes condiciones del sitio de obra.

- ✓ Controlar el área a intervenir de lotes de grava, zonas inestables, áreas con coberturas vegetales, todos aquellos materiales que sean susceptibles de caer en la zona de intervención.
- ✓ Aislar las áreas de drenaje aferentes.
- ✓ Estabilizar las áreas adyacentes al pavimento permeable mediante materiales geosintéticos, que eviten el ingreso de material suelto y la posible contaminación con sedimentos.
- ✓ Establecer el acceso al sitio de construcción y el manejo de tráfico de construcción para evitar el paso por la zona que se interviene durante la instalación de materiales. Se debe demarcar y/o señalizar e instalar barreras o cercas de ser necesario.
- ✓ Realizar la verificación del estado del tiempo prefiriendo periodos secos para evitar una inadecuada compactación de la subrasante o alteración de esta.
- ✓ El pavimento permeable deberá estar debidamente demarcado en sitio.

Paso 2: Instalar medidas de control de erosión y sedimentos.

Es necesario la instalación de elementos que aislen el sistema de pavimento permeable del pavimento impermeable para evitar que la escorrentía superficial y elementos como sedimentos

ingresen a la excavación. En este paso adicionalmente se debe verificar que el diseño y los materiales a instalar sean consistentes.

Paso 3: Excavar y preparar la superficie.

Se debe proteger la subrasante para mantener su tasa de filtración. Esto se puede lograr teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones.

- ✓ Mantener seca la subrasante y evitar excavar inmediatamente después de eventos de lluvia sin permitir un tiempo de secado adecuado.
- ✓ Elaborar el plan de excavación para garantizar no cruzar con equipos la zona de excavación. Se recomienda operar equipos desde fuera del área de excavación y en caso de requerirlo, emplear maquinara de orugas. No es recomendable equipos con neumáticos.
- ✓ Verificar que la pendiente de la subrasante no exceda el 1%.
- ✓ Tener en cuenta las recomendaciones geotécnicas particulares para la descompactación¹⁴ del suelo y previo a la instalación de los geosintéticos y grava.

NOTA ESPECIAL: Las anteriores recomendaciones aplican para las estructuras de pavimentos permeables que son diseñadas para trabajar por filtración total o parcial del caudal captado. Para estructuras que su diseño contempla la recolección y posterior conducción del caudal al sistema

¹⁴ Proceso necesario para no modificar las condiciones de filtración del suelo.

pluvial, tendrán en cuenta condiciones diferentes para el comportamiento de la subrasante durante el proceso constructivo acorde con las recomendaciones del geotecnista.

Paso 4: Prueba de la tasa de filtración del suelo de la subrasante. (Para estructuras que contemplan la filtración parcial o total del caudal)

Se debe realizar la medición de la tasa de filtración del suelo por personal calificado una vez se finalice la excavación y antes de la instalación del agregado. La prueba se debe realizar por un periodo de 72 horas para la verificación de la cantidad de percolación que alcanza el suelo y si esta presenta alguna disminución. En caso de presentarse el caso mencionado anteriormente, se deberá realizar la consulta al geotecnista para sus respectivas recomendaciones.

Paso 5: Colocación de los geosintéticos. (según el diseño que aplique¹⁵.)

De acuerdo con el diseño de la estructura de pavimento permeable y su operación relacionada con la filtración parcial, total o ninguna del caudal filtrado, se deberá seleccionar la utilización de geotextiles o geomembranas.

En la instalación del material, es necesario tener en cuenta las recomendaciones del proveedor relacionadas con la adecuada colocación garantizando traslapes y anclaje del material.

¹⁵ En caso de diseño de operación para filtración aplica geotextil. Cuando se retiene y se descarga a la red aplica geomembrana.

Finalmente, las telas deben envolver la sección de la estructura para garantizar que pueda existir migración del material o ingrese material por los costados de la estructura.

Paso 6: Colocación de los sistemas tuberías para recolección, pozos de inspección (y/o infiltración), sistemas de drenaje y Fusibles.

De acuerdo con el diseño de la estructura de pavimento y la concepción del drenaje, se deben colocar las tuberías para el manejo del caudal filtrado. Asimismo, se debe tener en cuenta la construcción de los pozos de inspección estimados para la operación y mantenimiento del sistema y que permitan su respectivo acceso.

En los diseños de pavimentos permeables, es necesario la construcción de fusibles que permita evacuar los excesos de caudal que se puedan ocasionar por eventos esporádicos con picos muy altos de lluvia, obstrucción del sistema o fenómenos exógenos a la operación del drenaje vial. Estos sistemas deben ser previstos desde el diseño hidráulico.

En la se presentan ejemplos de los sistemas de drenaje y fusibles para estructuras de pavimentos permeables.

Figura 9.2. Drenajes, pozos y de inspección y sistemas de fusibles para bicarriles. SUDS Av. San Francisco Javier. Distrito Santa Justa – San Pablo. Sevilla.



Fuente: Emesa. Ingeniero Angel Mena. Jornadas internacionales de SUDS – CONDESAN. Octubre 2022. Bolivia.

Paso 7: Colocación y compactación de agregado.

Se debe verificar que el material (graba o agregado) se encuentre libres de finos y que cumplan con los respectivos ensayos de materiales que garantice su calidad.

Antes de la instalación se debe verificar la pendiente de la subrasante, la instalación de las geomembranas y de todos los materiales requeridos previa a la colocación del agregado. La colocación se debe realizar mediante el uso de cargador frontal o excavadora colocada desde un punto lateral a la excavación, lo anterior con el fin de no alterar la compactación del suelo el cual debe conservar las condiciones de filtración natural necesarias para el funcionamiento del SUDS. Se debe esparcir de forma uniforme con la maquinaria teniendo prevención de no afectar la

infraestructura colocada. La compactación del agregado debe corresponder a las recomendaciones dadas por el diseñador y asegurarse de tener una compactación homogénea en la sección, esquinas, bordes de pozos, etc. Finalmente, es necesario evitar la generación de finos por el aplastamiento de los agregados.

Figura 9.3. Colocación y compactación de agregados.



Fuente: (Iowa Department of Natural Resources, 2019)

Paso 8: Instalación de capas de lecho y pavimento.

La metodología de instalación del pavimento está en función del material de la rodadura. Para el caso particular de los bicirreiles se contemplan solo dos materiales asfalto y concreto, los cuales cada uno tiene su particularidad de colocación. En ambos casos se debe tener la capa de grava instalada y compactada, libre de finos y nivelada.

A continuación, se describe las características de la colocación para cada tipo de material de rodadura

Concreto:

Para la instalación de concreto poroso existen dos tipos de procedimientos, de uno y dos pasos.

El proceso que se utiliza generalmente es el de dos pasos el cual separa los procesos de enrasado de la compactación del concreto permeable. El concreto empleado en este tipo de colocación es de características similares a la mezcla de concreto tradicional y de consistencia rígida. El método de un paso “one-step” utiliza regla de rodillos, los cuales nivelan y compactan la mezcla simultáneamente.

Asfalto:

En el proceso de instalación de la capa de asfalto debe realizarse con maquinaria de bajo tonelaje e ir compactando con rodillo de 10 toneladas en dos pasadas. No se recomienda realizar más pasadas para evitar la reducción de la filtración del material. Una vez colocado se debe esperar 24 horas para el paso de vehículos sobre la estructura. Después de instalado, se debe proteger la rodadura para mantenerla libre de sedimentos durante el periodo de construcción de las obras y antes de la puesta en operación de la estructura.

Paso 9: Ensayos de permeabilidad.

Para el ensayo se debe tomar como referencia la norma de ensayos de materiales del INVIAS, E – 796, (NORMA DE ESPECIFICACIONES DE ENSAYO DE MATERIALES, 2013), en el cual se encuentra el procedimiento para el ensayo de permeabilidad para pavimentos mediante el uso de permeámetro LCS.

Este procedimiento aplica para pavimentos porosos en asfalto y concreto.

Paso 10: Protección del pavimento hasta la finalización del proyecto.

Una vez se finalice el proceso de instalación del material de rodadura se debe colocar barreras y/o elementos aislantes que impidan el tráfico sobre la estructura y adicionalmente se requiere el control de sedimentos, erosión mediante láminas, barreras o esteras.

En algunos casos se puede requerir de mantenimiento de la rodadura mediante el uso de aspiradoras. Estas son más recomendadas que las barredoras que pueden ocasionar la obstrucción de los vacíos por sedimentos.

Paso 11: Capacitación de personal y manual de operación.

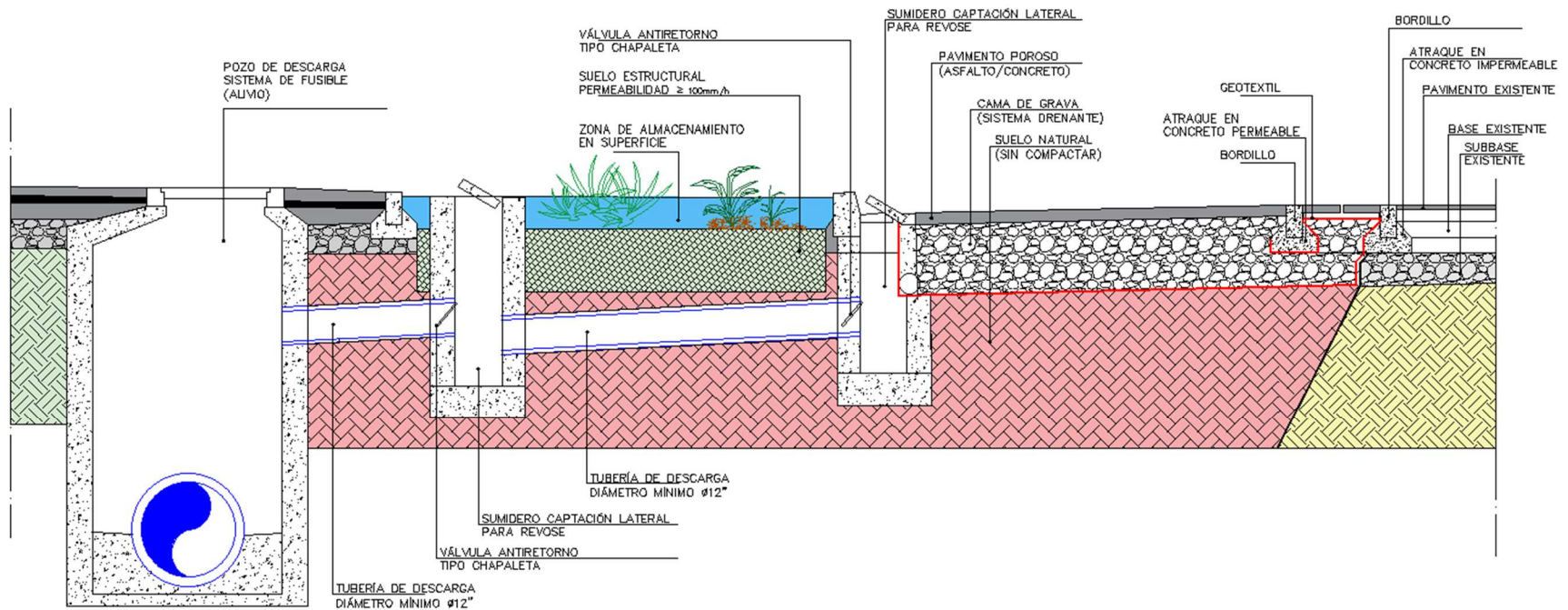
En la etapa de preconstrucción del proyecto se requiere realizar una socialización con todos los actores del proyecto, diseñador, dueño del proyecto, empresas públicas encargadas del mantenimiento y usuarios, en donde se haga una explicación del proyecto y el cuidado que se requiere para su operación para que tenga éxito a largo plazo la infraestructura construida.

Se deben considerar las siguientes actividades para este proceso.

- ✓ Descripción del cómo funciona el sistema y los elementos claves del diseño.
- ✓ Definición de los procedimientos de mantenimiento y los cronogramas.
- ✓ Socializar la importancia de la infraestructura y el aporte que tiene con el entorno y su interacción con la comunidad. Asimismo, la importancia del cuidado y mantenimiento de toda la infraestructura nueva y la detección temprana zonas que requieran mantenimiento.
- ✓ Inspección rutinaria del pavimento permeable.
- ✓ Inspecciones los sistemas de drenaje de la estructura.
- ✓ Proporcionar la información inherente a manuales, planos, especificaciones, y toda aquella relacionada con su operación y mantenimiento.

9.3 DETALLES CONSTRUCTIVOS

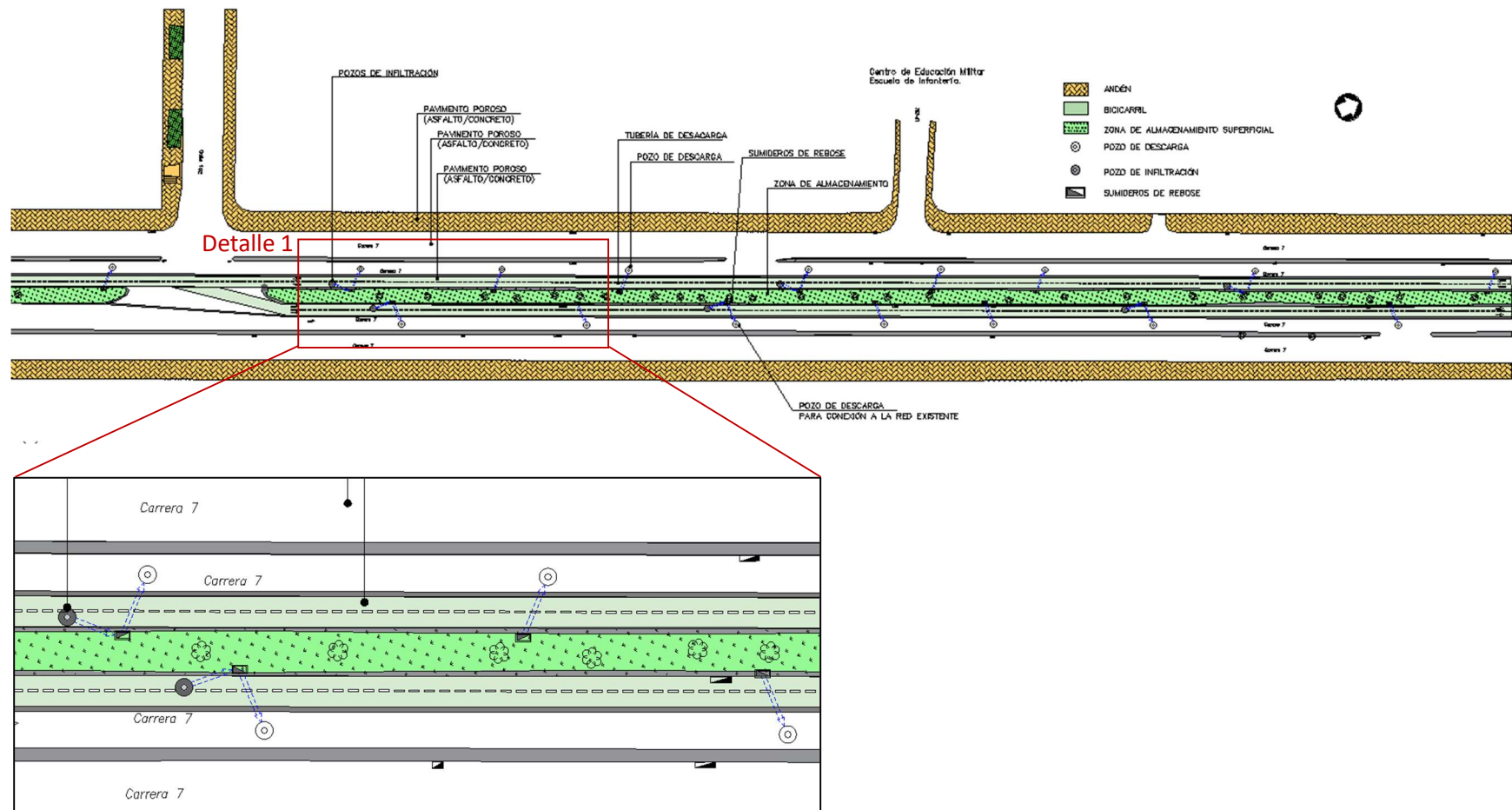
Figura 9.4. Sección transversal modelo tipo bicarril.



Fuente. Elaboración propia.¹⁶

¹⁶ Adaptado proyecto Distrito Santa Paula, Sevilla, España.

Figura 9.5. Planta diseño tipo bicicarriil.



Fuente: Elaboración propia.

10 CONCLUSIONES

Con base en los modelos de SUDS normatizados por la Empresa de Acueducto de Bogotá, se pudo desarrollar un modelo tipo para la utilización de pavimentos poros o permeables en bicarriles, el cual se puede implementar para proyectos de infraestructura vial en cualquier ciudad del país. El modelo desarrollado complementa la norma técnica NS-166 en el diseño de pavimentos permeables, implementando el cálculo de la rodadura (pavimento) para materiales en asfalto poroso y concreto poroso. Asimismo, determina los espesores de la capa de material granular que sirve como zona retención de agua y descargarla de forma paulatina al sistema tradicional, o de infiltrarla al suelo natural. En ambos casos el agua captada al entrar en la estructura puede presentar una mejora en su calidad por el proceso de filtración que se presenta al pasar por las capas del pavimento y de grava.

Con respecto a la operación de la estructura del SUDS, el modelo desarrollado con el software SWMM permitió verificar la eficiencia del sistema y el alivio que genera en la infraestructura de alcantarillado existente para el caudal pico del aguacero de diseño. Si bien el caudal captado por el SUDS es un porcentaje bajo con respecto al que puede ser transportado por el sistema de tuberías, la porosidad del material de pavimento puede incrementar el caudal captado, pero para esto se deben realizar ensayos del pavimento que permita determinar la tasa captación en función de su porosidad y la resistencia, buscando siempre mantener las características de resistencia y captación adecuadas para que el proyecto sea rentable y eficiente.

Se identificó que para la construcción del bicicarril es necesario considerar en el diseño los sistemas de fusibles (alivios) que permitan que en eventos de lluvia que puedan superar los caudales pico, las estructuras cuenten con alternativas de descarga de emergencia hacia el sistema de alcantarillado y así se evite generar láminas altas de agua en la calzada mientras pasa el pico de la lluvia. Lo anterior implica que en la planeación del proyecto se debe pensar siempre que con la construcción del SUDS se deben contemplar las estructuras de alivio que complementan para su operación.

Antes de la implementación del SUDS, es necesario realizar ensayos de la estructura mediante la construcción de tramos para calibrar el modelo con materiales disponibles en el mercado nacional de pavimentos y bases granulares. Con base en las mediciones y los resultados se puede validar y optimizar el modelo tipo propuesto.

Con la información de materiales ya definida se puede llegar a establecer el costo por metro lineal de SUDS para construcción de un bicicarril en Colombia. Es importante establecer el costo de la implementación del SUDS con el fin de evaluar la alternativa de su construcción en los proyectos de infraestructura vial y poder generar una mayor implementación en los proyectos viales y de espacio público para generar una mayor demanda de los materiales y que los precios de los pavimentos sean más competitivos en el mercado.

La implementación de SUDS de pavimentos permeables implementados en bicicarriles en el país no ha sido una alternativa explorada, sin embargo, con los tramos de prueba se puede ir evaluando el comportamiento de estos modelos de drenaje vial, así como en Sevilla, España, que

se han construido en algunos sectores de la ciudad demostrado sus bondades para mitigar el impacto del cambio climático en el drenaje convencional. Actualmente en algunas ciudades de Colombia están enfocando sus políticas públicas hacia nuevas alternativas de transporte lo que conlleva a diseñar nuevos corredores para vehículos como bicicletas, patinetas y motos eléctricas, siendo los bicicarriles la infraestructura ideal y los cuales pueden ser construidos con pavimentos permeables como una alternativa de drenaje y adicionalmente como control de la escorrentía superficial y de paso, un factor que coadyuba a extender la vida útil de la infraestructura de drenaje tradicional existente.

La implementación de SUDS con pavimentos permeables empleados como bicicarriles tiene un impacto importante en el desarrollo futuro de proyectos viales en las ciudades, los cuales pueden ser evaluados desde distintas ópticas. En primer lugar, como se demostró en el presente proyecto existe una mitigación en el caudal transportado por los sistemas de colectores existentes. El caudal captado al ser filtrado puede ser una fuente importante para la recarga de acuíferos. Otro aspecto a resalta y no menos importante es que al generar la demanda del material de rodadura puede ocasionar una baja en la producción de este, favoreciendo el precio de estos en el mercado. Finalmente, este tipo de SUDS pueden favorecer los requisitos contractuales de los contratos de infraestructura vial enfocados a la implementación de sistemas de drenaje sostenible alternativo. Por lo anterior, es necesario que se pueda desarrollar e implementar la estructura de SUDS en el corto plazo para medir los beneficios a las ciudades que pueden brindar estas estructuras.

11 RECOMENDACIONES

Dentro del estudio realizado en este trabajo de grado se han podido encontrar aspectos relevantes para el estudio e implementación de los pavimentos porosos para ser aplicados en bicisarriles, los cuales deben ser objeto de estudios y ensayos para poder determinar de forma más precisa su implementación en corredores viales de una ciudad.

Por lo anterior, se sugiere que a partir de este trabajo se desarrollen ensayos en modelos pilotos de pavimentos permeables de asfalto y concreto con el fin de determinar las tasas de filtración de estos materiales. Asimismo, realizar ensayos con diferentes tipos de agregados locales y/o regionales para determinar las relaciones de vacíos y evaluar también las tasas de filtración y saturación de este. Con estos estudios se pueden determinar los valores para los diseños de la estructura de pavimento.

Buscar en el país proyectos en los cuales se hayan construido pavimentos porosos para poder realizar un seguimiento de su operación, resultados que se puedan percibir en la captación de la escorrentía superficial, estado estructural del pavimento y las capas que lo conforman, con el fin de determinar aspectos a ser tenidos en cuenta en el medio local sobre la construcción, operación y mantenimiento de los pavimentos porosos en el país.

12 BIBLIOGRAFÍA

- Abellan, A. (2020). *Sudsostenible.com*. [Http://Sudsostenible.Com/](http://Sudsostenible.Com/).
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2021). *Decreto 555 de 2021. Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.*
- Amaris Castro, G. E. (2015). *ANÁLISIS DE ACEPTACIÓN Y DISPOSICIÓN AL PAGO PARA EL USO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE DOMICILIARIO - CASO DE ESTUDIO PARA LA CIUDAD DE BARRANQUILLA, COLOMBIA*. Fundación Universidad del Norte.
- Ariza Cañas, K. Johana, & Gutiérrez Zambrano, D. P. (2020). *Diseño de un tren de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para la Universidad Santo Tomás, Campus Floridablanca*. Universidad Santo Tomás.
- Ayala, J., & Ospino, R. (2023, July). Desastres naturales en Colombia: Un análisis regional. *Economía Regional y Urbana*, 1–21.
- Camargo Ramírez, E. A., & Lozada Chamorro, J. (2018). *Diseño de sistema urbano de drenaje sostenible en Bogotá, Calle 127 con Autopista Norte*. Universidad Católica.
- Cano Salazar, H. Y. (2022). *Diseño de un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) para manejo de escorrentía en la carrera 9 entre calles 108 y 112, sector Usaquén, Bogotá, Colombia*. Universidad Santo Tomás.
- Cerda Gutiérrez, H. (2015). *DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA: El pensar y el hacer en la ciencia y en la educación* (2nd ed.). Magisterio.
- Consejo de Bogotá, & Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). *Acuerdo 761 de 2020 - Plan de Distrital de Desarrollo - "Un nuevo contrato social y ambiental para la Bogotá del siglo XXI"* (pp. 1–170). Consejo de Bogotá.
- Diazgranados, M., Camacho, L. A., Rodríguez, J. P., Rodríguez, M., Vargas, H., & Pinilla, M. (2015). Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C. In *Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental CIIA* (pp. 1–315). Universidad de Los Andes.
- Doménech, A., Montanari, A., & Marco, J. B. (2012). Efficiency of Storm Detention Tanks for Urban Drainage Systems Under Climate Variability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 36–46.
- Dunkerley, D. (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22(26), 5024–5036. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.7122>
- Eagleson, P. S. (1978). Climate, soil, and vegetation: 2. The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences. *Water Resources Research*, 14(5), 713–721. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR014i005p00713>

- Eason, J. R., & Shook, J. F. (2002). *Design of Hot Mix Asphalt Pavements for Commercial, Industrial, and Residential Areas*. (National Asphalt Pavement Association, Ed.; Series 109).
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2018). *Norma Técnica NS-166 - Criterios para el diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): Vol. 0.1*.
- Fassman, E. A., & Blackbourn, S. (2010). Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 475–485.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000238](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000238)
- García Haba, E. (2012). *Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: Aplicación en climas mediterráneos*. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/15383>
- Gómez, G. (2018). *Evaluación financiera de la implementación de pavimentos porosos en un proyecto inmobiliario localizado en Villas de Granada de la ciudad de Bogotá*.
- Gómez González, G., Rodríguez Benavides, A., & Torres, A. (2010). Durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- González, J. (2017). *Evaluación técnica, ambiental y económica, de pavimentos asfálticos drenantes en Colombia*. UNIVERSIDAD EIA.
- Gutiérrez López, A., Ramírez, A. I., Lebel, T., & Santillán, O. (2011). El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de mediciones hidrológicas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 59, 193–202.
- Hernández Martínez, J. D., & Gordo Mora, J. J. (2018). *Determinación del impacto económico por la interferencia de las redes de servicios públicos en la construcción de proyectos de infraestructura vial en la ciudad de Bogotá D.C.*
- Hurtado de Barrera, J. (2010). *Guía para la comprensión holística de la ciencia* (4th ed.). Quiron.
- IDIGER. (2019). *Caracterización climatológica de Bogotá, como un aporte al fortalecimiento de la red hidrometeorológica de Bogotá (RHB)*.
- Ingetec Ingenieros Consultores. (2018). *Estudios y Diseños Definitivos Pavimento y Espacio Público* (pp. 1–341).
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2020). *Caracterización General del Escenario de Cambio Climático para Bogotá*. <https://www.idiger.gov.co/Rcc>.
- INVIAS. (2007). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito*. Instituto Nacional de Vías.
- Iowa Department of Natural Resources. (2019). *Storm Water Management Manual - Chapter 8 - PERMEABLE PAVEMENT SYSTEMS*.

- Jung, D., & Kim, Y. (2012). Evaluation of the Infiltration Capacity of a Permeable Paving Block for Urban Flood Disaster Reduction. In *World Environmental and Water Resources Congress 2012* (pp. 3583–3593). <https://doi.org/10.1061/9780784412312.361>
- Mailhot, A., & Duchesne, S. (2010). Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 201–208. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000023)
- Martínez Alejandro - Molina Martha. (2019). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)*.
- Mayorca Torres María Camila, J. A. L. K. (2021). *Evaluación de los factores influyentes en la accidentalidad de los biciusuarios y peatones en puntos críticos de la ciudad de Bogotá*.
- Montealegre, J. (2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico*.
- Moraga Navarrete, J. S. (2015). *Influencia de la estacionalidad al estimar la variabilidad interanual de la precipitación mediante distribuciones derivadas*. Universidad de Concepción.
- NORMA DE ESPECIFICACIONES DE ENSAYO DE MATERIALES, 1 (2013).
- Nuevo Contrato Social y Ambiental Para El Siglo XXI, Plan de Desarrollo Distrital 2020 - 2024, Pub. L. No. 761, 1 (2020).
- Perico-Granados, N. R., Galarza, E. Y., Díaz Ochoa, M. L., & Arevalo-algarra, H. M. (2020). *Guía práctica de investigación en Ingeniería* (1st ed.). Uniminuto.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2021). *Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles*. Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.
- Ranjeet Thakali, A. K., & Sajjad, A. (2016). Understanding the Effects of Climate Change on Urban Stormwater Infrastructures in the Las Vegas Valley. *Hydrology*, 2–16.
- Resolución 0799 de 2021, 1 (2021).
- Rodríguez-Hernández, J. (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 tráfico ligero*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1015.5366>
- Rosa, A. (2016). *Bioretention for Diffuse Pollution Control in SUDS Using Experimental Adaptive Approaches of EcoHydrology*. Universidad de Sao Paulo.
- Sagatume Puerta, D., Ruiz Gibert, J. M., & Salazar Briones, C. (2021). Integración de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SuDS) en la planeación urbana de ciudades áridas. *Aristas*, 8, 37–43.
- Salas Pérez, C., Coy Castro, D., Acuña Ramírez, K., Páez Cuervo, L., & Upegui, E. (2019). Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas Van der Hammen, en la ciudad de Bogotá. *Ambiente y Desarrollo*, 23, 23–44.

- Sanchez Hernandez, K. A., Santos Granados, G. R., Angulo-Jaramillo, R., & González Murillo, C. A. (2020). Evaluation of the retention capacity of Pb and Cu in technosoils of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDs) in Bogota, Colombia. In *EGU General Assembly 2020*.
- Schwartz, C. W., & Hall, K. D. (2018a). *Structural Design Guidelines for Porous Asphalt Pavements* (NAPA, Ed.; NAPA).
- Schwartz, C. W., & Hall, K. D. (2018b). *Structural Design Guidelines for Porous Asphalt Pavements*. National Asphalt Pavement Association.
- Secretaría Distrital de Planeación. (2022). *REGLAMENTACIÓN ECOURBANISMO Y CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE*.
- SRUR, F. R. (2020). *Análisis de la respuesta hidrológica ante un Sistema de Drenaje Urbano Sostenible en la ciudad de Santa Rosa, La Pampa*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA.
- Trujillo López, A., & Quiroz Lasprilla, D. P. (2013). *Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano*. Pontificia Universidad Javeriana.
<http://hdl.handle.net/10554/11174>
- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Uteros Fernández, J. L. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambiental. *Anales de La Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 71–89.
- Virginia Department Environmental Quality. (2013). Hydrologic Methods and Computation. In *Virginia StormWater Management Handbook* (pp. 1–164).
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2016). *The SuDS Manual* (CIRIA, Ed.; Vol. 6). CIRIA.