

*ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)  
CASO DE ESTUDIO CARRERA 4 Y CARRERA 5 ENTRE CALLES 68 Y 71, SECTOR CHAPINERO  
ALTO, BOGOTÁ, COLOMBIA.*

**DIANA LORENA MEDINA PIZA  
LUIS YAIR AGUILAR ROJAS  
ANDERSSON CALDERON GOMEZ**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS**

**BOGOTÁ D.C – 2018**

*ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)  
CASO DE ESTUDIO CARRERA 4 Y CARRERA 5 ENTRE CALLES 68 Y 71, SECTOR CHAPINERO  
ALTO, BOGOTÁ, COLOMBIA.*

**DIANA LORENA MEDINA PIZA  
LUIS YAIR AGUILAR ROJAS  
ANDERSSON CALDERON GOMEZ**

**Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.**

**ASESOR: HENRY ALBERTO CORDOBA ROMERO**

**INGENIERO CIVIL, MSC.**

*UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C - 2018*



## Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/col/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C., Diciembre de 2018.

## Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a Dios, por guiarnos en nuestro camino por medio del crecimiento profesional, a nuestras familias por su apoyo incondicional durante el desarrollo de la especialización en Recursos Hídricos, a nuestros compañeros de curso por su compañerismo, respeto y su aporte desde el punto de vista de las diferentes áreas del conocimiento, y a nuestros docentes por ser nuestra guía durante nuestra formación académica los cuales siempre recordaremos con gratitud y cariño.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Católica de Colombia, por brindarnos la posibilidad de ser parte de esta gran institución, para así cumplir con uno más de nuestros proyectos de crecimiento profesional. A nuestros docentes que durante la Especialización en Recursos Hídricos nos brindaron su conocimiento, su experiencia y sabiduría, pilares fundamentales en el desarrollo de nuestro proyecto. A nuestras familias por el apoyo incondicional brindado durante este tiempo, para finalizar con éxito este objetivo que redundará en nuestro crecimiento personal y profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO</b> .....	<b>15</b>
2.1	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	15
2.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2.3	JUSTIFICACIÓN.....	18
2.4	ALCANCE.....	19
2.5	OBJETIVOS.....	20
<b>3</b>	<b>MARCOS DE REFERENCIA</b> .....	<b>21</b>
3.1	MARCO CONCEPTUAL .....	21
3.2	MARCO TEÓRICO .....	21
3.3	MARCO JURÍDICO.....	28
3.4	MARCO GEOGRÁFICO.....	31
3.5	MARCO DEMOGRÁFICO .....	32
3.6	ESTADO DEL ARTE .....	33
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>36</b>
4.1	FASES DEL TRABAJO DE GRADO .....	36
4.2	INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	38
<b>5</b>	<b>DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ALCANTARILLADO COMBINADO</b> .....	<b>39</b>
5.1	MODELACIÓN HIDRÁULICA .....	41
5.2	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN .....	46
<b>6</b>	<b>DISEÑO DE SUDS</b> .....	<b>54</b>
6.1	SELECCIÓN DE SUDS.....	54
6.2	TRENES DE TRATAMIENTO .....	54
6.3	DISEÑO HIDROLÓGICO .....	55
6.4	DISEÑO DE TREN DE TRATAMIENTO CON ALCORQUES INUNDABLES .....	60
6.5	DISEÑO DE TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES .....	69
6.6	TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES PARA LA ZONA DE ESTUDIO .....	74
6.7	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS TIPOLOGÍAS SUDS .....	76

<b>7</b>	<b>MODELACIÓN DE LOS SUDS .....</b>	<b>78</b>
7.1	HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN LID .....	78
7.2	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN .....	87
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>92</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>95</b>
<b>10</b>	<b>APÉNDICES.....</b>	<b>100</b>
<b>11</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>101</b>



## LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 3-1 MARCO CONCEPTUAL .....	21
ILUSTRACIÓN 3-2 CAMBIOS INDUCIDOS POR EL DESARROLLO URBANO EN LA TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA .....	22
ILUSTRACIÓN 3-3 ALCORQUES INUNDABLES .....	25
ILUSTRACIÓN 3-4 ESTRUCTURAS MODULARES CON BLOQUES A) JUNTAS, B) APERTURAS.....	26
ILUSTRACIÓN 3-5 A) DISPOSICIÓN TÍPICA DE UN SISTEMA DE PAVIMENTO PERMEABLE, B) DISPOSICIÓN TÍPICA DE UN SISTEMA DE PAVIMENTO POROSO. ....	27
ILUSTRACIÓN 3-6 ÁREA DE ESTUDIO .....	32
ILUSTRACIÓN 5-1 LOCALIZACIÓN GENERAL DE LAS CUENCAS .....	39
ILUSTRACIÓN 5-2 SHAPES DE LAS REDES DE ALCANTARILLADO COMBINADO .....	40
ILUSTRACIÓN 5-3 TOPOLOGÍA DE LA RED EXISTENTE.....	43
ILUSTRACIÓN 5-4 HIETOGRAMA DE DISEÑO QUEBRADA LA VIEJA.....	45
ILUSTRACIÓN 5-5 HIETOGRAMA DE DISEÑO QUEBRADA LOS ROSALES.....	45
ILUSTRACIÓN 5-6 RELACIÓN Y/D PARA SISTEMA DE ALCANTARILLADO COMBINADO .....	46
ILUSTRACIÓN 5-7 VELOCIDADES SISTEMA DE ALCANTARILLADO COMBINADO .....	49
ILUSTRACIÓN 5-8 PERFIL COLECTOR PRINCIPAL – LA VIEJA.....	51
ILUSTRACIÓN 5-9 PERFIL COLECTOR LOS ROSALES– AFLUENTE COLECTOR LA VIEJA .....	51
ILUSTRACIÓN 5-10 PERFIL– AFLUENTE 1 COLECTOR LA VIEJA.....	52
ILUSTRACIÓN 5-11 PERFIL– AFLUENTE 2 COLECTOR LA VIEJA.....	52
ILUSTRACIÓN 5-12 PERFIL– AFLUENTE 3 COLECTOR LA VIEJA.....	52
ILUSTRACIÓN 5-13 PERFIL– AFLUENTE 5 COLECTOR LA VIEJA.....	53
ILUSTRACIÓN 5-14 PERFIL– AFLUENTE 6 COLECTOR LA VIEJA.....	53
ILUSTRACIÓN 6-1 ÁREA DE DRENAJE PARA LOS SUDS .....	57
ILUSTRACIÓN 6-2 ESQUEMA DE ALCORQUE INUNDABLE .....	62
ILUSTRACIÓN 6-3 SECCIÓN TÍPICA DE VÍA CON IMPLEMENTACIÓN DE ALCORQUES.....	67
ILUSTRACIÓN 6-4 PERFIL ESQUEMÁTICO DE UN PAVIMENTO POROSO CON INFILTRACIÓN PARCIAL .....	70
ILUSTRACIÓN 6-5 MÉTODO PARA DETERMINAR LA RELACIÓN TRIBUTARIA IMPERMEABLE .....	71
ILUSTRACIÓN 6-6 PERFIL VIAL PROPUESTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PAVIMENTO POROSO.....	74
ILUSTRACIÓN 6-7 SECCIÓN TIPO DE 3.25 M X 10 M.....	75
ILUSTRACIÓN 7-1 DIAGRAMA CONCEPTUAL DE LAS ESTRUCTURAS LID .....	78
ILUSTRACIÓN 7-2 PARÁMETROS LID, SUPERFICIE DE LOS ALCORQUES.....	80

ILUSTRACIÓN 7-3 PARÁMETROS LID, SUSTRATO DEL ALCORQUE.....	81
ILUSTRACIÓN 7-4 PARÁMETROS LID, CAPA DE ALMACENAMIENTO DEL ALCORQUE.....	81
ILUSTRACIÓN 7-5 PARÁMETROS LID, DRENAJE DEL ALCORQUE.....	82
ILUSTRACIÓN 7-6 PARÁMETROS LID, SUPERFICIE - PAVIMENTO POROSO.....	83
ILUSTRACIÓN 7-7 PARÁMETROS LID, SUPERFICIE - PAVIMENTO POROSO.....	84
ILUSTRACIÓN 7-8 PARÁMETROS LID, SUPERFICIE - PAVIMENTO POROSO.....	84
ILUSTRACIÓN 7-9 PARÁMETROS LID, SUPERFICIE - PAVIMENTO POROSO.....	85
ILUSTRACIÓN 7-10 ASIGNACIÓN DE LID A LA CUENCA - ALCORQUES.....	86
ILUSTRACIÓN 7-11 ASIGNACIÓN DE LID A LA CUENCA – PAVIMENTOS PERMEABLES.....	86
ILUSTRACIÓN 7-12 COMPARACIÓN CAUDAL PICO SUDS VS ESTADO ACTUAL.....	87
ILUSTRACIÓN 7-13 COMPARACIÓN CAUDAL PICO SUDS VS ESTADO ACTUAL.....	88
ILUSTRACIÓN 7-14 COMPARACIÓN CAUDAL PICO SUDS VS ESTADO ACTUAL.....	88
ILUSTRACIÓN 7-15 COMPARACIÓN CAUDAL PICO SUDS VS ESTADO ACTUAL.....	89
ILUSTRACIÓN 7-16 COMPARACIÓN CAUDAL PICO SUDS VS ESTADO ACTUAL.....	90
ILUSTRACIÓN 7-17 COMPARACIÓN CAUDAL PICO SUDS VS ESTADO ACTUAL.....	91

## LISTA DE TABLAS

TABLA 3-1 MARCO NORMATIVO DE ORDEN NACIONAL .....	29
TABLA 3-2 MARCO NORMATIVO DISTRITAL .....	30
TABLA 5-1 DISTRIBUCIÓN ACTUAL DIÁMETROS Y MATERIAL DE LA RED DE ALCANTARILLADO COMBINADO.....	41
TABLA 5-2 TOPOLOGÍA DE LA RED DE ALCANTARILLADO COMBINADO .....	42
TABLA 5-3 RELACIÓN DE LLENADO.....	47
TABLA 5-4 VELOCIDAD REDES EXISTENTES ALCANTARILLADO COMBINADO .....	49
TABLA 6-1 VALORES DE COEFICIENTES DE LAS CURVAS IDF – ESTACIÓN LA VIEJA .....	56
TABLA 6-2 COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA .....	57
TABLA 6-3 RESTRICCIONES PARA LOCALIZACIÓN DE ALCORQUES .....	61
TABLA 6-4 PARÁMETROS DE DISEÑO DE ALCORQUES .....	62
TABLA 6-5 COMPOSICIÓN DEL SUSTRATO .....	68
TABLA 6-6 ESPACIO REQUERIDO PARA EL DESARROLLO DEL ÁRBOL PLANTADO.....	69
TABLA 6-7 VARIABLES HIDROLÓGICAS REQUERIDAS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS PERMEABLES .....	70
TABLA 6-8 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES N° 1.....	75
TABLA 6-9 RESULTADOS PARA EL TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES N° 1.....	75
TABLA 6-10 VOLUMEN TRATADO.....	76
TABLA 6-11 RESUMEN DE DISEÑO DE LOS ALCORQUES INUNDABLES .....	77
TABLA 6-12 RESUMEN DE DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS PERMEABLES .....	77
TABLA 6-13 COMPARACIÓN ALCORQUES – PAVIMENTOS PERMEABLES.....	77

## RESUMEN

En la actualidad debido al crecimiento acelerado, el cambio climático y el desarrollo de las ciudades se han generado cambios y desequilibrios en el ciclo hidrológico, aumentando los riesgos sobre la población e incrementando la presión sobre las fuentes receptoras, traducido en problemas de inundaciones y pérdidas económicas, teniendo como agravante la limitada capacidad de los sistemas de drenaje existentes, la ocupación de rondas y franjas de protección de ríos y cauces, y en general la falta de una adecuada planificación urbana.

Ante el panorama previamente descrito es necesario evaluar los procesos de urbanización y expansión de las ciudades de una manera no convencional, que integre aspectos ambientales de manera sostenible, por esta razón mediante la evaluación de dos sistemas SUDS se revisara el comportamiento hidráulico para los dos trenes de estudio y determinar de acuerdo a sus características la mejor alternativa que permita mitigar los caudales picos debido a la urbanización de la zona de estudio.

Mediante modelaciones hidráulicas del sistema de alcantarillado combinado se determinara el estado actual de la cuenca y de las capacidades de los colectores, adicionalmente se evaluara la influencia de los SUDS dentro del comportamiento del sistema en el momento de un evento de precipitación o tormenta con el fin de conocer el factor de reducción de caudal para cada uno de los afluentes en donde descola los trenes de SUDS.

Finalmente, una vez evaluadas todas las variadas anteriormente nombradas bajo los escenarios propuestos, se realizara la comparación directa entre las dos tipologías de SUDS planteadas con el fin de decidir la que mejor se adapta a las condiciones de las zona en estudio y, que adicionalmente presenta mejor comportamiento hidráulico.

**Palabras clave:** SUDS, Alcorques, Pavimentos Porosos, Zona Impermeable, Caudal Pico, Velocidad, Tren de Drenaje, Comportamiento Hidráulico.

## ABSTRACT

Currently due to rapid growth, climate change and the development of cities have been generated changes and imbalances in the hydrological cycle, increasing the risks on the population and increasing pressure on receiving supplies, resulted in problems of floods and lost economic, considering as an aggravating circumstance the limited capacity of the existing drainage systems, the occupation of rounds and buffer zone protection of rivers and streams, and in general lack of proper urban planning.

Before the previously described scenario, it is necessary to evaluate the processes of urbanization and expansion of cities in an unconventional manner, integrating environmental aspects in a sustainable manner, for this reason by evaluating two systems SUDS is revise the hydraulic behavior for two trains to study and determine according to its characteristics the best alternative allowing to mitigate flow peaks due to the urbanization of the area of study.

By means of hydraulic system of combined sewer modeling will be determined the current state basin and the capabilities of the collectors, in addition the influence of SUDS in the behavior of the system will be assessed at the time of a event of rainfall or storm in order to know the flow reduction factor for each of the tributaries where the SUDS trains drain.

Finally, once evaluated all the varied previously appointed under the scenarios proposed, will be the direct comparison between the two types of SUDS raised in order to decide which is best suited to the conditions of the study area and, Additionally presenting better hydraulic performance.

**Keywords:** SUDS, engineered tree boxes, Porous pavements, Area waterproof, Peak flow, Speed, Drainage train, Hydraulic behavior.

## 1 INTRODUCCIÓN

Bogotá se localiza dentro de la zona de confluencia intertropical la cual cruza la ciudad dos veces al año, situación que influye en el comportamiento de las lluvias produciendo dos épocas de lluvias que popularmente se denominan invierno. La primera se presenta en los meses de marzo, abril y mayo, y la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Especialmente hablando, la precipitación se caracteriza por valores medios que oscilan de 69 mm en la localidad de Bosa, al occidente, mientras que los valores medios alcanzan los 142 mm en el sector de Torca, al norte de la ciudad (IDEAM, 2015).

Conforme a lo anterior, una de las problemáticas más importantes que tiene la ciudad de Bogotá es la amortiguación de aguas lluvias en el espacio público, sobre todo en los periodos de precipitación, debido a que el rápido desarrollo urbano ha generado la impermeabilización de la ciudad teniéndose pocas coberturas vegetales que ayuden a interceptar el agua lluvia (FOPAE, 2015). Es frecuente ver los sistemas de drenaje desbordados en tiempos de lluvia debido a los grandes volúmenes de agua pluvial que se reciben provenientes de las zonas urbanas impermeables especialmente cuando estos sistemas son combinados como lo es el caso de la cuenca en estudio, sobrepasando en muchas ocasiones la capacidad de los colectores y generando lo que en los últimos años se ha vuelto repetitivo en cada temporada invernal: inundaciones y encharcamientos en las vías y espacio público.

Por lo anterior el siguiente trabajo de investigación tiene como finalidad estudiar dos diferentes tipología de SUDS (alcorques y pavimentos porosos) para determinar el que mejor comportamiento hidráulico presente frente a los eventos de precipitación de la zona en estudio.

## **2 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO**

### **2.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

Saneamiento de comunidades

### **2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La densificación de la ciudad, el alto valor del suelo, y su localización contigua a un sector empresarial de la ciudad, han llevado al sector de chapinero alto a convertirse en una zona de gran desarrollo urbanístico y densificación poblacional. La modificación del uso del suelo, la construcción, impermeabilización de zonas públicas, demanda de zonas de tránsito vehicular y peatonal y mal manejo de las rondas hídricas, han derivado en una impermeabilización del suelo, que sumado a un sistema de alcantarillado con capacidad limitada genera problemas de inundaciones y encharcamientos en las vías del sector. El sistema de alcantarillado del sector de chapinero alto se diseñó y construyó durante de la década de 1970, hace aproximadamente 40 años, el sistema de alcantarillado existente es un sistema de tipo combinado, construido predominantemente con materiales como gres y concreto.(EAB-ESP, s. f.)

La modificación del uso del suelo, la falta de políticas de control de la cuenca hídrica de la quebrada la Vieja, que atraviesa el barrio Rosales y es canalizada en un box coulvert a la altura de la carrera 3ª con calle 71, sobre todo en la parte alta, zona que por sus condiciones geomorfológicas debería ser protegida para evitar la generación de grandes picos de caudal, sumado a la impermeabilización casi de la mayor parte del suelo en la cuenca baja, conllevan a la generación de caudales que sobrepasan la capacidad de la infraestructura existente, han generado inundaciones, problemas de tráfico y choques simples de vehículos (Alcaldía Local de Chapinero, 2017).

El costo de la renovación de las redes matrices de alcantarillado, combinado con la intervención a la malla vial por la cual se localizan es muy alto, sin embargo, su desarrollo no

presenta una solución real y a largo plazo para el manejo de la escorrentía superficial, sino en cambio traslada los problemas de anegaciones a las zonas de las riberas del cauce en las partes bajas donde el río Bogotá genera un control de nivel. (Secretaria Distrital de Ambiente, 2011)

El objetivo de este trabajo es plantear una solución al drenaje pluvial de una forma no convencional, mediante el diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS). Analizando y seleccionando las tipologías de mejor ajuste a la zona de estudio por sus condiciones físicas, hidráulicas y de amenidad con el desarrollo urbanístico existente.

### 2.2.1 Antecedentes del problema

En los Estados Unidos, al igual que ocurría en muchos otros lugares, la legislación en materia de drenaje urbano se enfocó al problema de las inundaciones, sin embargo, ya en la década de los 70 se reconoció el problema de la contaminación difusa, reflejando en 1987 esta problemática en la *Clean Water Act* que derivó en programas específicos de actuación para resolver este problema. La progresiva concienciación durante las dos últimas décadas de la necesidad de mejorar la calidad de las aguas condujo a la aparición del concepto de *Best Management Practices* (BMPs). Desde el desarrollo de las BMP, varios estados y gobiernos locales han adoptado un gran número de leyes, normativas y ordenanzas para fomentarlos u obligar a su utilización (7). Un proceso similar es el que se produjo en Australia a finales de la década de los 90, contando en la actualidad con normativa, legislación y manuales de diseño propios (MOMPARLER & ANDRÉS-DOMÉNECH, s. f.).

En Europa, la gestión de las escorrentías urbanas se ha centrado en el control de las inundaciones, y no ha sido hasta hace aproximadamente una década cuando se ha empezado a tomar conciencia del problema de la contaminación difusa. A partir de entonces, comienzan a adoptarse criterios combinados de cantidad y calidad, intentando maximizar la integración paisajística y el valor social y ambiental de las actuaciones.



El uso de las diferentes técnicas SUDS está más extendido en los países del centro y norte de Europa que en la zona sur, donde países como España, Italia, Grecia y Portugal cuentan todavía con escasas experiencias. Por otra parte, las tipologías de SUDS empleadas varían entre países.

Como ejemplo de implantación integral de técnicas SUDS en una actuación urbanística cabe citar el proyecto *Porte des Alpes* en Lyon (Francia). Durante el planeamiento del parque tecnológico *Porte des Alpes* en St. Priest (200 ha) se adoptaron técnicas SUDS para dar respuesta a los diferentes condicionantes del lugar, entre ellos la falta de una salida natural de drenaje.

De este modo, se conjugaron soluciones como cunetas verdes, drenes filtrantes, estanques de retención y depósitos de infiltración que constituyen el punto final del sistema. Las instalaciones están abiertas al público permitiendo el desarrollo de otras actividades: educativas, recreativas y deportivas. El bienestar de los trabajadores del parque fue considerado durante el proceso de diseño, obteniendo como resultado un entorno agradable de trabajo. Así mismo, el recinto recibe múltiples visitas tanto de grupos escolares como de profesionales interesados en el desarrollo de estas técnicas.

En el ámbito nacional se desarrolla un primer estudio en cuanto al tema de los SUDS en el documento en referencia consultoría realizada para la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá: Factibilidad técnica, ambiental, económica y financiera para el desarrollo de la infraestructura de acueducto y alcantarillado sanitario y sistema de drenaje pluvial del borde norte de la ciudad de Bogotá.

Dicha consultoría aborda de manera conceptual el tema de los SUDS, el cual corresponde a un nivel de “factibilidad” y aclara que es responsabilidad de la entidad contratante, y en especial para los productos de diseños básicos, diseños conceptuales y lineamientos, desarrollar posterior a la presente etapa los diseños definitivos para construcción de la infraestructura de acueducto y alcantarillado y sistema de drenaje pluvial y demás obras o intervenciones requeridas para el desarrollo del proyecto en todos sus aspectos.

Por otro lado, la normatividad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá reconoce los SUDS como un sistema que presenta ventajas sobre los sistemas convencionales. En particular, la norma técnica NS-085 establece que éstos son: “Son el conjunto de soluciones que se adoptan en un sistema de drenaje urbano con el objeto de retener el mayor tiempo posible las aguas lluvias en su punto de origen sin generar problemas de inundación, minimizando los impactos del sistema urbanístico en cuanto a la cantidad y calidad de la escorrentía y evitando así sobredimensionamientos o ampliaciones innecesarias en el sistema. La filosofía de los SUDS es reproducir, de la manera más fiel posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación humana”. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011)

### 2.2.2 Pregunta de investigación

¿Qué ventajas presentan las nuevas tipologías SUDS (Alcorques y Pavimentos Porosos), que puedan ser alternativas confiables al momento de brindar soluciones ante el tema de inundaciones urbanas?

## 2.3 JUSTIFICACIÓN

La implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible, han sido una importante alternativa a la hora de contrarrestar las consecuencias que han traído consigo el auge de la construcción de las grandes urbes, menos zonas impermeables han sido una de las causas para que los sistemas de alcantarillado no sean suficientes al momento del manejo de las aguas pluviales.

Un gran porcentaje de las zonas urbanizadas están constituidas por vías, las cuales son completamente impermeables o en su defecto un grado muy bajo de permeabilidad, es allí donde los pavimentos porosos y los alcorques juegan un papel protagónico, gracias a sus cualidades con respecto a la retención hidráulica pueden ser una alternativa que debe ser tomada en cuenta al momento de generar entornos amigables con el ciclo hidrológico y que no constituyan un cambio negativo a las personas que residen en estas zonas.

Es indispensable entender que los predios privados deben ser parte de la solución al problema, aportando las áreas de zonas verdes (jardines, antejardines) para reducir y postergar el impacto de las aguas lluvias, como era en un pasado, si políticas como estas sumadas a la reducción de parqueaderos, serian grandes los beneficios, la calidad del aire, el aumento de la producción de oxígeno, valorización paisajística, etc.

No podemos ser siendo ajenos a buenas políticas utilizadas en el extranjero en cuanto a conservación del medio ambiente se trata, es el caso de Tokio donde cuyos pavimentos porosos son todos porosos o en ciudades como Chicago que tienen su manual de zonas verdes, gracias a estas medidas en el año 2009 la ciudad logro sustraer del sistema de alcantarillado 70 millones de metros cúbicos de agua lluvia (Benassi, 2012).

Siguiendo las recomendaciones de la Universidad de los Andes, la cual en su 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. describe de manera detallada las zonas potenciales de la ciudad de Bogotá. D.C Las cuales podrían ser intervenidas con tipologías SUDS como las estudiadas en este proyecto, pavimento porosos y alcorques, las cuales después de ser calificadas con relación a varios factores, que van desde la calidad del suelo hasta optimización del agua son recomendables a usar en el sector chapinero alto, toda vez que es una zona con una topografía óptima y con características urbanas que se adaptan a estas tipologías.

## **2.4 ALCANCE**

El alcance estará enmarcado específicamente en la evaluación de los sistemas escogidos (pavimentos porosos y alcorques), con la finalidad de realizar una comparación del comportamiento hidráulico de cada uno de los sistemas e identificar el que presenta mejor ajuste a la zona de estudio.

Con el propósito de brindar una solución a la problemática de inundaciones y encharcamientos ocurridos de manera reiterada que se presentan en épocas de invierno en la ciudad

de Bogotá, se decidió escoger el sector de las carreras cuarta y quinta entre calles 68 y 71, en sector chapinero alto para realizar el análisis de implementación de los SUDS, y seleccionar la tipología más adecuada para el área de estudio.

## **2.5 OBJETIVOS**

### **2.5.1 Objetivo general**

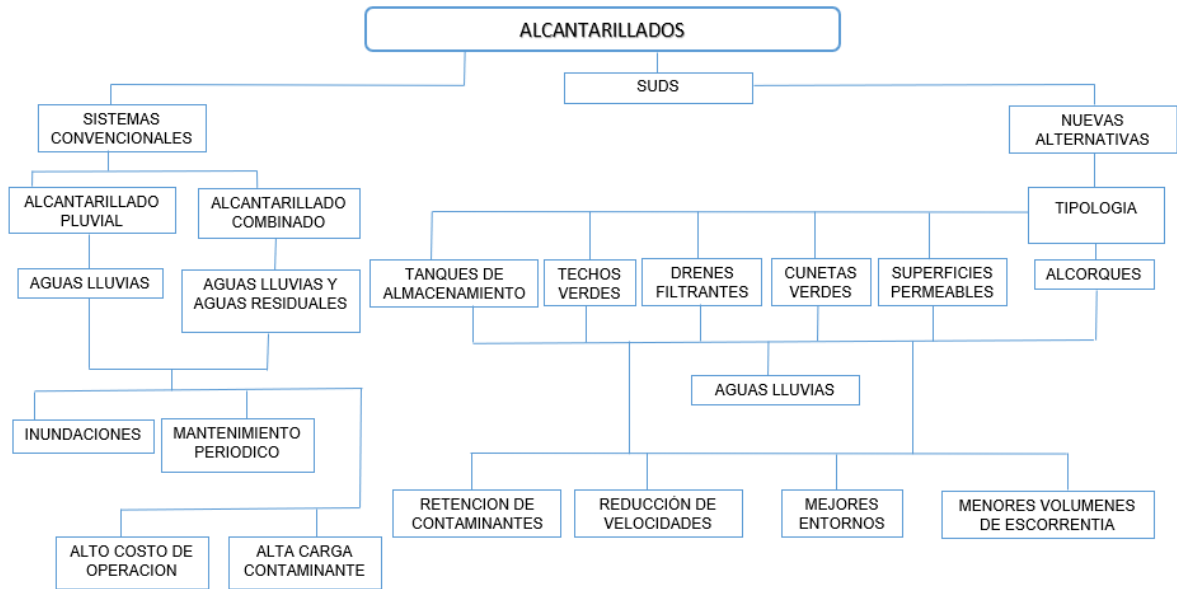
Analizar el comportamiento hidráulico de dos tipologías SUDS (Alcorques y pavimentos porosos), frente a eventos de precipitación en diferentes periodos de retornos.

### **2.5.2 Objetivos específicos**

- Recopilar, analizar y evaluar toda la información relacionada con la zona de influencia del Proyecto en el sector de estudio que pudiera ser considerada para la ejecución de los trabajos y la información relacionada con los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles.
- Realizar el diagnóstico hidráulico de la red de alcantarillado combinado del sector en estudio.
- Comparar las características hidráulicas de cada uno de los sistemas analizados (Alcorques y Pavimentos Porosos).

### 3 MARCOS DE REFERENCIA

#### 3.1 MARCO CONCEPTUAL



*Ilustración 3-1 Marco Conceptual*  
*Fuente: Propia*

#### 3.2 MARCO TEÓRICO

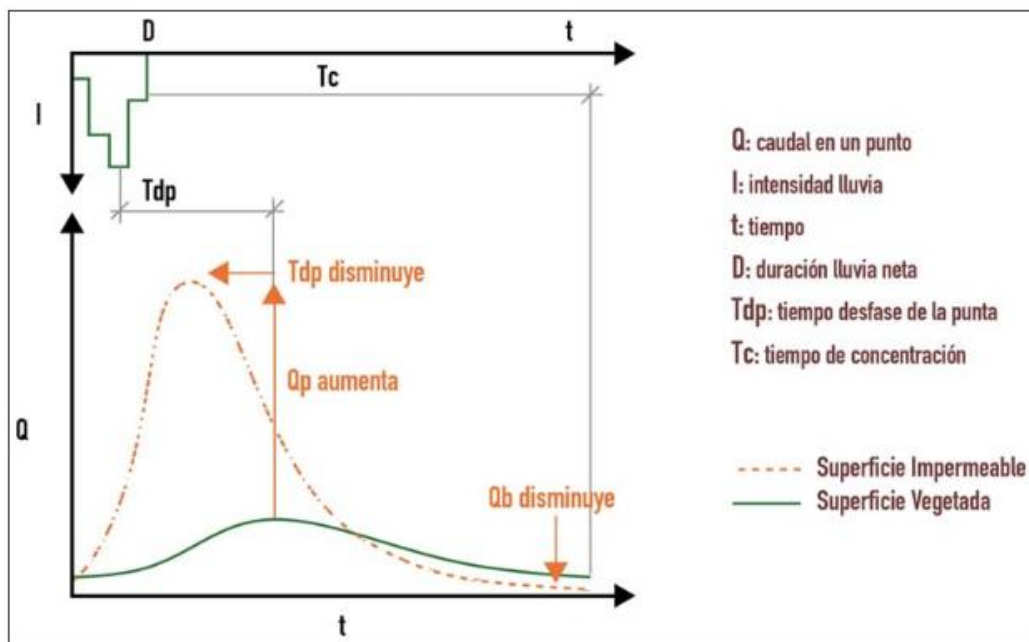
##### 3.2.1 Ciclo hidrológico natural y ciclo hidrológico urbano

El ciclo hidrológico, es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra, el cual se define como la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmosfera a la tierra y volver a la atmosfera: evaporación desde el suelo, masas de aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y evaporación.(Aranda, 1984)

La irregular distribución espacial y temporal de las aguas, ha obligado a construir grandes obras de protección y drenaje, y de regulación, capaces de compensar, estas últimas, la escasez y el exceso de aguas. El desarrollo de tales proyectos no pueden llevarse a cabo sin los estudios

básicos necesarios para asegurar la mejor utilización racional de los recursos hidráulicos disponibles para evitar las desastrosas consecuencias de su almacenamiento incontrolado o inseguro, además de prevenir los proyectos absurdos y costosos («Meteorología Colombiana», 2002).

El crecimiento de las zonas impermeables en las ciudades modifica los flujos naturales del ciclo hidrológico, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. La reducción de espacios vegetados reduce en primera instancia la interceptación natural y la evapotranspiración. El aumento de la impermeabilidad redonda en una reducción de la infiltración y como consecuencia de todo ello, se generan volúmenes de escorrentía netamente mayores, y además, se aceleran los tiempos de respuesta ver Ilustración 3-2, por lo que aumenta el riesgo de inundaciones (MOMPARLER & ANDRÉS-DOMÉNECH, s. f.).



*Ilustración 3-2 Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía*

*Fuente: (MOMPARLER & ANDRÉS-DOMÉNECH, s. f.)*

### 3.2.2 Inundaciones en zonas urbanas

Uno de los problemas, tal vez el más importante y visible, derivado de la impermeabilización de las zonas urbanas es la formación de inundaciones localizadas tras eventos de lluvia, estas inundaciones se producen por el criterio de diseño tradicional de evacuar el agua caída en las superficies impermeables de nuestras ciudades lo antes posible. Este criterio es, precisamente, el que hace que los sistemas convencionales de gestión de las aguas pluviales fallen, produciendo en aquellos puntos más bajos de la ciudad inundaciones de carácter local por la acumulación de una cantidad enorme de agua en un pequeño periodo de tiempo, agua que no es capaz de gestionar el dispositivo de drenaje dispuesto, ya sea por tener un diseño inferior al requerido para el volumen acumulado, o por la falta de mantenimiento, lo cual hace que su funcionamiento no sea el correcto (Bayon, Hernández, Fuente, & Fresno, s. f.).

Podemos afirmar que los sistemas de drenaje convencionales han contribuido de manera incuestionable a la desnaturalización de los entornos urbanos. La filosofía de entender el agua de lluvia como "un problema del cual hay que deshacerse lo más rápidamente posible" ha provocado que las ciudades estén llenas de zonas impermeables a través de las cuáles el agua fluye rápidamente y donde la presencia de elementos naturales es escasa, con la consecuente pérdida de los ecosistemas existentes antes del desarrollo urbano (García & Thomas, 2014)

### 3.2.3 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

El crecimiento de la población y su concentración en áreas limitadas ha ocasionado una alta urbanización del suelo natural, y por lo tanto su impermeabilización acelerada. Esto a su vez ha cambiado las dinámicas hidrológicas previas, modificando los balances naturales del ciclo del agua. La concepción del sistema de drenaje de las ciudades de occidente, estructurado formalmente desde tiempos antiguos con el imperio romano, ha intentado manejar y redirigir los flujos naturales de escorrentía de áreas habitadas hacia cuerpos de agua externos, para de este modo reducir los riesgos que implica la acumulación de agua en áreas pobladas. En este sentido, la escorrentía se

ha visualizado como una amenaza y un residuo a disponer, y no como una oportunidad o un recurso a manejar (Acosta, 2017).

La filosofía de los SUDS es reproducir, de la manera más fiel posible, el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación antrópica, de manera que sea posible minimizar los impactos del desarrollo urbanístico en cuanto a la cantidad y la calidad de la escorrentía. Con la implantación de SUDS en entornos urbanos se pretende minimizar la necesidad de construir y mantener grandes infraestructuras de detención y retención de escorrentía, lograr un tratamiento eficiente del agua y disminuir el riesgo de inundaciones de origen pluvial, suponiendo, además, un ahorro en los costes globales derivados de la gestión del agua de lluvia (García, Dantas, Claudia, & Antunes, s. f.).

En este capítulo se establecerá las características de los SUDS en estudio (alcorques y pavimentos porosos), adicionalmente, como parte de la investigación se establecerán las ventajas y las desventajas teóricas de cada SUDS para dar un panorama general de las propiedades que posee cada uno.

### ***3.2.3.1 Alcorques Inundables***

Esta tipología consiste, generalmente, en una caja de concreto prefabricada, ubicada de manera subterránea, y rellena con suelo compuesto por una mezcla de grava, arena y compost vegetal, para de esta manera sembrar o replantar un árbol o arbusto de mediana envergadura. En este sentido, la parte superior de la estructura se encuentra a nivel con las superficies viales o peatonales, para de esta manera facilitar el ingreso de la escorrentía a este tipo de estructura. Una vez el agua ingresa, ésta se almacena y detiene temporalmente en los intersticios del suelo empleado, interactuando directamente con la planta instalada. Propiciando de este modo el tratamiento del agua a partir de los procesos físicos de filtración del suelo, así como también biológicos a partir de la captación radicular por medio de la planta. En este sentido, las características de las plantas presentes en esta tipología deben tomarse en consideración, ya que el desarrollo de éstas no debe afectar la estructura prefabricada (Acosta, 2017).



Estos elementos son fundamentalmente zonas de bioretención que se usarán como un sistema de apoyo al sistema de captación de aguas lluvias en vías a través de sumideros laterales convencionales. Estos sumideros serán similares a los ya definidos por las normas técnicas de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAB) (SL-100, SL150 y SL-200), pero con una longitud de ventana de captación mayor en cada caso de 1.00 m. En este espacio adicional, se conformará un alcorque que se inundará con agua lluvia que será filtrada a través de un sistema de capas granulares con vegetación superficial (Secretaria Distrital de Ambiente, 2011).



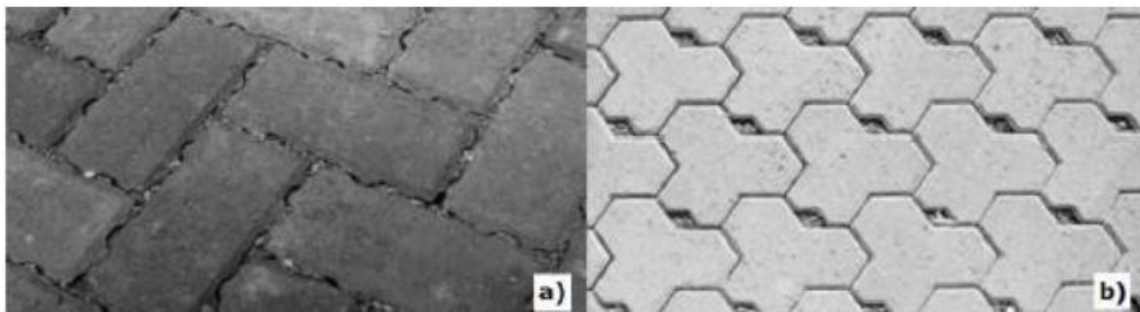
*Ilustración 3-3 Alcorques Inundables*  
*Fuente: (Filterra, 2016)*

### **3.2.3.2 Pavimentos Porosos**

El concreto poroso aplicado como pavimento permeable ha adquirido especial atención en la última década debido a que el calentamiento global está provocando sequías en muchos países a nivel mundial, obligando a impulsar en los países, medidas de conservación del agua, donde los pavimentos permeables constituyen una atractiva alternativa, porque proporcionan una forma de construcción de ciudades sostenibles, al permitir el tratamiento de las aguas superficiales de lluvia, infiltrando esta agua al subsuelo, recargando los mantos acuíferos o permitiendo el almacenamiento de estas aguas en tanques para luego reutilizarlas para el sistema de riego en parques, inodoros de zonas residenciales, agua para uso industrial, entre otros (Sequera, Vera, Correa, & Mendieta, 2015).

Los concretos sin finos transmiten las cargas en forma heterogénea a diferencia de los concretos convencionales que lo hacen en forma homogénea. En los concretos sin finos la transmisión de cargas se realiza por puntos de contacto, originando que las cargas sean repartidas en forma aleatoria, dando como resultado que éstas sean distribuidas en una superficie mucho mayor. La transmisión heterogénea de las cargas provoca que la superficie sobre la cual éstas se reparten, sea varias veces mayor al producto de la repartición de cargas en un piso hecho con un concreto convencional o con asfalto. Aunado a esto, las bases diseñadas para pisos permeables son más económicas, más eficientes y no generan baches. Adicionalmente, dada la repartición heterogénea de las cargas, casi nunca hace falta mejorar el terreno natural (Sequera et al., 2015).

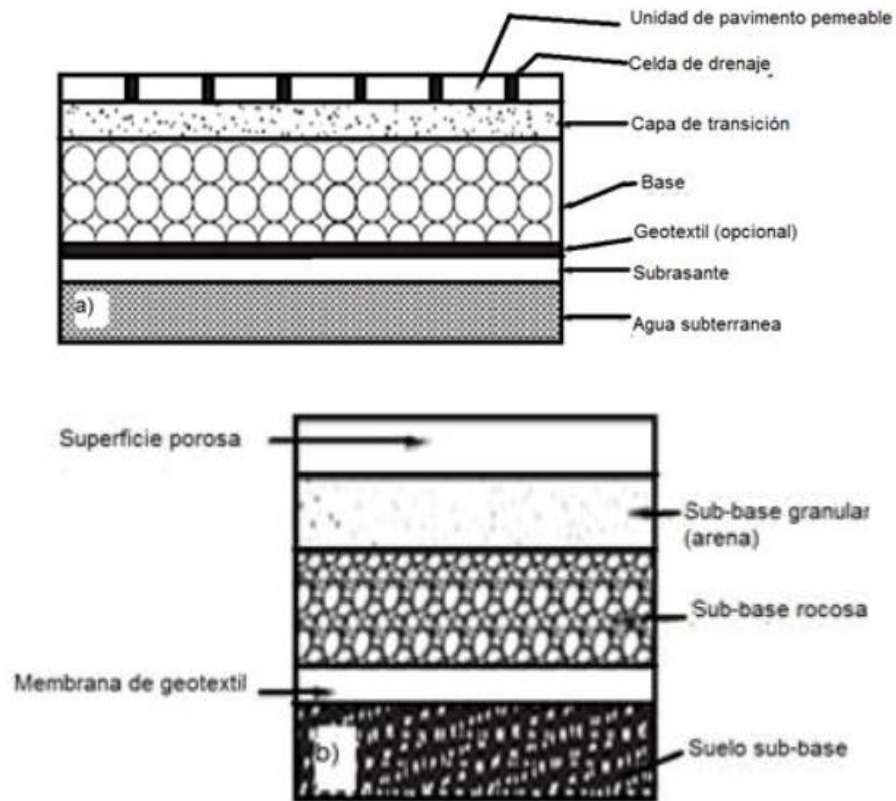
Existen varias formas de pavimentos permeables: el monolítico y el modular (Lucke, Beecham, Boogaard, & Myers, 2013). Las estructuras monolíticas incluyen asfalto poroso y concreto poroso, que permite la infiltración a través de la superficie del pavimento. El asfalto poroso es similar a una mezcla típica de asfalto pero la porción fina de asfalto es omitida. Del mismo modo, en el concreto poroso la cantidad de agregados finos debe ser omitida. Las estructuras modulares son bloques o adoquines de concreto impermeables, pero el agua puede filtrarse a través de sus uniones o aperturas.



*Ilustración 3-4 Estructuras modulares con bloques a) juntas, b) aperturas.  
Fuente: (Lucke et al., 2013)*

La estructura más común de los pavimentos permeables y porosos consiste en tres capas, primero una capa de rodadura que permite la entrada del agua, que puede ser en diferentes materiales como asfalto, concreto (pavimentos porosos), arcilla, grava, pasto (pavimentos

permeables), segundo una capa de material granular fino, la cual permite una instalación adecuada de la capa de rodadura y por último una capa compuesta por una matriz de material granular de gran tamaño, o por módulos o geo-células plásticas donde el agua se almacena (sub-base).



*Ilustración 3-5 a) Disposición típica de un sistema de pavimento permeable, b) Disposición típica de un sistema de pavimento poroso.  
Fuente: Scholz & Grabowiecki, 2006*

El pavimento permeable debe tener un perfil relativamente plano. Si se aplica sobre una pendiente pronunciada, las aguas lluvias absorbidas por la capa de concreto poroso comenzarán a escurrir en la capa inferior, generando posibles subpresiones que pueden dañar las losas. Si las pendientes requeridas son mayores al 1% es recomendable construir barreras impermeables. (Reyes & Torres, 2002)

Para vibrar este tipo de concretos se recomienda en la mayoría de los casos, el uso de un vibrador mecánico en el modo más lento posible, pues si se utilizan frecuencias de vibrado altas, lo más probable es que el concreto se sobre compacte, alterando la estructura de huecos y por ende la permeabilidad.(Reyes & Torres, 2002).

Las juntas requeridas en un concreto poroso difieren de las convencionales debido a que el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de un concreto común. El espaciamiento de las juntas transversales es de aproximadamente 15 o 20m. En Europa, la experiencia ha demostrado que las juntas de dilatación térmica no son necesarias en estos pavimentos.(Reyes & Torres, 2002)

### **3.3 MARCO JURÍDICO**

El marco jurídico para el diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), en Colombia ha tenido un desarrollo lento, y los cambios normativos únicamente se evidencian en la última década. En el año 2017, con la expedición de la resolución 0330 del ministerio de vivienda, ciudad y territorio, por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico – RAS, por primera vez se incluye un artículo para los SUDS, sin embargo, éste solo establece unos lineamientos generales en cuanto a su requerimiento. A nivel local la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo de Bogotá ESP (EAB), encargada del sistema de alcantarillado de la ciudad, cuenta con normativa técnica propia y ha desarrollado la norma técnica de servicio NS-166 Criterios de diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), vigente desde febrero de 2018, en la que se incluye de forma detallada un primer análisis de las diferentes tipologías de SUDS aplicables en la ciudad, características, requisitos y procedimiento de cálculo. A continuación, se indica de forma más detallada en orden cronológico el avance normativo.

Tabla 3-1 Marco normativo de orden nacional

Fuente: Propia

LEGISLACIÓN VIGENTE	
NACIONAL	
NORMA	DESCRIPCIÓN
Constitución política de Colombia, Artículo 80.	El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas
resolución 0330 del ministerio de vivienda, ciudad y territorio	<p>Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico – <b>RAS</b>.</p> <p><b>Artículo 153:</b> Sistemas urbanos de drenaje sostenible. Para nuevos desarrollos urbanos, donde se modifique la cobertura del suelo, se deben generar estrategias con el fin de mitigar el efecto de la impermeabilización de las áreas en el aumento de los caudales de escorrentía. Se requiere diseñar sistemas urbanos de drenaje sostenible, con el objeto de reducir mínimo en un 25% el caudal pico del hidrograma de crecienta de diseño, a fin de evitar sobrecargas de los sistemas pluviales y posteriores inundaciones, para ello, adicionalmente, se debe hacer un análisis de las condiciones de escorrentía antes y después del proyecto versus la capacidad de flujo de los cuerpos receptores ya sea el sistema de alcantarillado de drenaje o cuerpos naturales.</p> <p>Cuando se utilicen estructuras de retención, se deben implementar sistemas de cribado y sedimentación, prever la facilidad del mantenimiento manual o mecánico, y la accesibilidad y medios para transportar los desechos a los sitios finales de disposición, de acuerdo con su composición y la normatividad vigente.</p>

Tabla 3-2 Marco normativo distrital

Fuente: Propia

LEGISLACIÓN VIGENTE	
BOGOTA D.C.	
NORMA	DESCRIPCIÓN
Acuerdo 418 de 2009 Consejo distrital	"Por el cual se promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables, como techos o terrazas verdes, entre otras en el D. C. y se dictan otras disposiciones". Con éste acuerdo se motiva a la administración distrital a promover el urbanismo sostenible en proyectos públicos y privados, nuevos y existentes; especialmente los techos verdes, como iniciativa para la mitigación del cambio climático, y se da a la secretaria distrital de ambiente y al jardín botánico, responsabilidad de soporte técnico para el desarrollo de dichos proyectos. Con éste precedente se dio inicio al desarrollo jurídico y normativo en la ciudad para los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).
Resolución 5926 de 2011 Secretaría Distrital de Ambiente	"Por la cual se crea y regula el programa de reconocimiento ambiental a Edificaciones Ecoeficientes – PRECO" Mecanismo de participación voluntaria para edificaciones públicas o privadas, que establece un programa de reconocimiento público para edificaciones que incluyan y dentro de los ítems evaluados se encuentra la implementación de techos verdes, muros vivos, sistemas de reuso de agua lluvia, equipos ahorradores y SUDS, entre otras.
Resolución 6423 de 2011 Secretaría Distrital de Ambiente	"Por medio de la cual se adopta la Guía Técnica de Techos Verdes" Establece los requerimientos técnicos y prácticas recomendadas para la correcta aplicación de tecnologías de techos verdes en Bogotá D.C. y le encomienda la asesoría y el soporte técnico a la Subdirección de Ecourbanismo y Gestión Ambiental Empresarial y la Subdirección de Ecosistemas y Ruralidad de la Secretaría Distrital de Ambiente, en coordinación con el Jardín Botánico.
Resolución 6523 de 2011 Secretaría Distrital de Ambiente	"Por la cual se reglamentan y adoptan los sistemas urbanos de drenaje sostenibles SUSD para el plan de ordenamiento zonal norte POZN" Reglamenta y adopta los lineamientos técnicos para los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en el plan de ordenamiento zonal norte (POZN), y busca minimizar los impactos del desarrollo urbano, en cuanto a inundaciones y caudal pico de aguas lluvias generado. Dando especial importancia a la estructura ecológica, busca reducir las áreas impermeables en las vías, estableciendo el porcentaje de área verde en andenes, alamedas, parques distritales y separadores, e incluye los SUDS en las secciones transversales viales a construir.

LEGISLACIÓN VIGENTE	
BOGOTA D.C.	
NORMA	DESCRIPCIÓN
Decreto 528 de 2014 Alcalde Mayor	"Por medio del cual se establece el sistema de Drenaje Pluvial Sostenible del Distrito Capital, se organizan sus instancias de dirección, coordinación y administración; se definen lineamientos para su funcionamiento y se dictan otras disposiciones." Cuyo objetivo es establecer el sistema de drenaje pluvial sostenible para el distrito capital, organizando sus instancias de dirección, coordinación y administración para su funcionamiento, cuyo principal objetivo es reconocer al sistema de drenaje pluvial sostenible como un bien público orientado a la satisfacción de intereses colectivos, protección de los ecosistemas, recuperación del ciclo hidrológico, reducción de los riesgos de inundación, oferta de espacio público natural y establecer la conectividad de la estructura ecológica principal del distrito como mecanismo de adaptación al cambio climático. Se establece el plan estratégico de transformación del sistema de drenaje pluvial sostenible como instrumento para orientar la transformación progresiva del sistema de drenaje existente en un sistema sostenible y le encarga su formulación al Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) conjuntamente con las entidades del sector ambiente y la empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá -EAB ESP
Norma técnica de la empresa de acueducto y alcantarillado, NS-085	"NS-085 Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado" La cual define los lineamientos técnicos que debe cumplir los sistemas de alcantarillado pluvial y combinado para la ciudad de Bogotá.

### 3.4 MARCO GEOGRÁFICO

El área de estudio para realizar el análisis comparativo entre sistemas de drenaje urbano sostenible SUDS, se encuentra localizada en la ciudad de Bogotá, localidad de chapinero, sobre las carreras 4 y carrera 5 entre las calles 68 a 71. El sector de estudio se encuentra en el área de influencia de la quebrada la Vieja y la quebrada Rosales, que presentan su nacimiento en los cerros orientales de la ciudad, y que forma parte de la cuenca del río salitre. La cuenca alta de las quebradas, se caracteriza por tener pendientes pronunciadas y bosques, que generan protección y disminución de caudales pico.

El área de estudio, comprende la microcuenca establecida en el sector de chapinero alto, delimitada por en la parte alta, sector oriental por la avenida circunvalar, al norte por la calle 72, al costado sur por la calle 68 y al sector occidental (parte baja de la cuenca) delimitada por la carrera 7, como se indica en la Ilustración 3-6.



*Ilustración 3-6 Área de estudio  
Fuente: Google Earth 2018*

La cuenca alta de la quebrada La Vieja y la quebrada Rosales, inicia en los cerros orientales dentro del área de reserva forestal protectora bosque de los cerros orientales, y discurre en sentido oriente occidente por su cauce natural hasta el barrio Rosales donde es canalizada en un box coulvert a la altura de la carrera 3ª con calle 71 y conducida por el sistema de alcantarillado.

### **3.5 MARCO DEMOGRÁFICO**

La localidad de chapinero (localidad 2), presenta una población estimada de 126.192 habitantes, sin embargo por las condiciones de desarrollo y ubicación estratégica de la localidad, gran parte del área disponible es dedicada a la prestación de servicios y comercio, como actividades principales, lo que se traduce en una población flotante alta que se desplaza cada día desde su lugar



de vivienda para desempeñar algún trabajo o prestar servicios, acompañada de la gran cantidad de establecimientos de educación superior que se localizan en el sector y generan una dinámica poblacional atípica. La localidad de chapinero presenta una clasificación socioeconómica de estrato alto, y la mayor parte de los predios se clasifican en estrato 6, con un promedio 2.5 e habitantes por vivienda (Secretaria Distrital de planeación, 2016).

### **3.6 ESTADO DEL ARTE**

El crecimiento desmedido de la población en las grandes urbes ha traído consigo una serie de problemáticas, una de ellas ha sido los colapsos de los sistemas de alcantarillado, esta apresurada ocupación demográfica ha ocasionado un cambio significativo en el área permeable de las zonas edificadas, cambiando por completo las condiciones y dinámicas naturales preexistentes. (José Alejandro Martínez Acosta, 2017).

El pensamiento a lo largo de décadas había sido, que el manejo de las aguas lluvias, debían ser evacuadas tan rápido como fuese necesario para evitar problemas de inundaciones entre otras, pues, en este sentido la ampliación de los sistemas de alcantarillados convencionales, instalando tuberías de mayores diámetros, se convirtió en una alternativa que no fue la más apropiada, ya que conlleva altos costos y una respuesta débil ante las grandes precipitaciones que se presentan en la actualidad.

Algunos antecedentes notables, en la generación de alternativas que contribuyan a un manejo óptimo del agua escorrentía, se presentan a continuación.

Un primer ejemplo es el presentado por (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017), los cuales adelantaron una investigación para determinar las tipologías y/o tecnologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), que más se adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá, en este trabajo se tuvieron como objetivos específicos 1). Determinar, priorizar y seleccionar las seis (6) tipologías más apropiadas para optimizar el manejo de la escorrentía pluvial en el área urbana de Bogotá D.C. en sus diferentes

localidades, entornos urbanos y usos del suelo; 2). Elaborar la guía técnica de diseño, construcción, operación, mantenimiento y monitoreo del desempeño de las seis tipologías de SUDS seleccionadas, evaluadas, recomendadas y definidas como idóneas para el caso particular de Bogotá D.C., que incluye los diseños de ingeniería de detalle para la construcción y monitoreo de los pilotos de SUDS a escala real con áreas aferentes en promedio entre 0,5 y 2 ha, o para el rango de áreas recomendadas; 3). Elaborar un proyecto de norma técnica de la EAB para las diferentes tipologías de SUDS estudiadas y monitoreadas para que a futuro sea insumo para modificar las normas y cartillas de las entidades del distrito, responsables de implementar los SUDS en la ciudad. Ahora bien en la actualidad estudiantes de pregrado, posgrado se han enfocado en las alternativas amigables con el medio ambiente y que brinden soluciones eficaces a la problemática de inundaciones que se presentan continuamente, las cuales enfocan su trabajo en diseño hidráulico de losas en pavimento poroso rígido como estructuras complementarias al drenaje pluvial de Bogotá D.C (Ángela María Polanco Andrade y Ángela María Sánchez Vega, 2012), es importante resaltar que los pavimentos porosos, hacen parte de la tipología de SUDS, “Superficies Permeables”, con el cual se pretende generar alternativas nuevas de construcción de pavimentos que sean capaces de generar esos espacios permeables, que contribuyan a la infiltración de escorrentía.

De igual manera, (Mario Leandro Castro Espinosa, 2011) en la ciudad de Bogotá, realizó un estudio juicioso de como los pavimentos porosos son una alternativa que ha tomado mucha fuerza en las últimas décadas, para construir vías amigables con el Medio ambiente y que además presentan muy buenas características de infiltración hidráulica, lo que conlleva a la reducción de velocidades en los caudales de agua escorrentía que se presentan en las fuertes precipitaciones.

Por otra parte, la recopilación de información acerca de los pavimentos porosos para el diseño, construcción y mantenimiento llevado a cabo por Trujillo y Quiroz (Alejandra Trujillo López y Diana Paola Quiroz Lasprilla, 2013), teniendo en cuenta si se pueden aplicar para una zona de estudio en Bogotá y finalmente realizan la aplicación de los métodos de diseño, construcción y mantenimiento en una zona en específico en la ciudad de Bogotá D.C .

Además se han realizado investigaciones de posgrado como es el ejemplo de Martínez, (José Alejandro Martínez Acosta, 2017), la cual construye una metodología de preselección de SUDS en áreas privadas de uso de suelo residencial, a partir de análisis de información geográfica, que permita identificar el potencial de cada predio de manejar su propia escorrentía a través de medidas de manejo no estructural y estructural. Lo cual busca determinar que tipologías SUDS son más adecuadas para cada uno de los predios privados analizados, a partir de las características climáticas y las restricciones físicas propias del sitio a intervenir, generando de este modo un ranking que evidencie cuáles de éstas son más factibles de implementación. Así como Determinar el volumen de escorrentía que sería tratado a escala de ciudad, mediante la implementación de medidas de manejo en predios con uso del suelo residencial.

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

**FASE I:** Recopilación y análisis de la información relacionada con la zona de influencia del proyecto en el sector de estudio que pudiera ser considerada para la ejecución de los trabajos y la información relacionada con los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles (SUDS).

1. La primera fase se llevará a cabo mediante un análisis documental de la información bibliográfica disponible en publicaciones y trabajos de investigación nacional e internacional, haciendo especial énfasis en las desarrolladas para la ciudad de Bogotá D.C. Se incluirán las investigaciones y documentos cuyo objetivo de estudio sean los sistemas de alcantarillado mediante tecnologías no convencionales, sistemas urbanos de drenaje sostenible de diversas tipologías, normatividad de aplicación nacional y la desarrollada en el ámbito local, así como los casos de aplicación que se han desarrollado con la finalidad de identificar el estado del arte.
2. Para llevar a cabo la recopilación de la información se realizara una investigación bibliográfica en repositorios de algunas universidades que han desarrollado estudios sobre éste tópico tales como son la universidad Católica, universidad de los Andes y la universidad Javeriana, se realizara una búsqueda en bases de datos especializadas de ingeniería, así como publicaciones especializadas de ingeniería y normativa local.
3. Solicitud formal mediante oficios a la EAB referente los planos de alcantarillado de la zona en estudio (en físico o shapes), para determinar la cuenca y las áreas aferentes a los colectores de alcantarillado existentes.
4. Se realizará una visita a la zona de estudio con el objetivo de identificar los puntos susceptibles a encharcamiento e identificar las condiciones del sector favorables y desfavorables para la implementación de tecnologías SUDS.

5. Solicitud de información hidrológica de la zona de estudio a las entidades responsables tales como la Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá –EAB e IDEAM, que disponen de estaciones meteorológicas en la zona de estudio con la finalidad de realizar la caracterización hidrológica del área de estudio.

**FASE II:** Diagnóstico hidráulico de la red de alcantarillado combinado del sector en estudio.

1. Para realizar el análisis y diagnóstico hidráulico de la red de alcantarillado existente en la zona de estudio, es necesario contar con la información de la topología para la red de alcantarillado, definir si las redes existentes corresponden a alcantarillado pluvial, sanitario o combinado, realizar una estimación de caudal de cada zona de aferencia y un modelo hidráulico para definir el estado actual de las redes y su capacidad para recibir los aportes generados por los sistemas de alcantarillado mediante SUDS.
2. Mediante modelos digitales de terreno identificar las rasantes las estructuras hidráulicas que pertenecen al sistema de alcantarillado.
3. Estudio de población para estimar la densidad poblacional de la zona.
4. De acuerdo a la información entregada por la EAB establecer la topología de las redes (conectividad, diámetro, material).
5. Elaboración de la hidrología para la cuenca delimitada según las características morfológicas y el régimen de lluvias presentada en la zona.
6. Determinar el caudal de aporte para las redes de alcantarillado pluvial o combinado, según sea el caso.
7. Establecer la capacidad del sistema mediante modelo racional.
8. Identificar los puntos de descarga de los sistemas propuestos de alcantarillado SUDS.

**FASE III:** Comparación de características hidráulicas de cada uno de los sistemas analizados (Alcorques y Pavimentos Porosos).

1. Definir las zonas que por sus condiciones físicas permiten la implementación de SUDS.
2. Establecer el caudal de aporte para cada tren de SUDS propuesto.
3. Realizar el diseño del sistema urbano de drenaje sostenible mediante la implementación de un tren de alcorques.
4. Realizar el diseño del sistema urbano de drenaje sostenible mediante la implementación de pavimentos porosos, en función del caudal y permeabilidad del suelo.
5. Realizar la evaluación hidráulica para cada uno de los sistemas escogidos (Alcorques y pavimentos poroso)
6. Realizar un análisis comparativo de las condiciones hidráulicas de los SUDS diseñados para el área de estudio.

#### **4.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS**

Para el desarrollo de la hidrología, la cuenca será modelada en el programa HEC-HMS

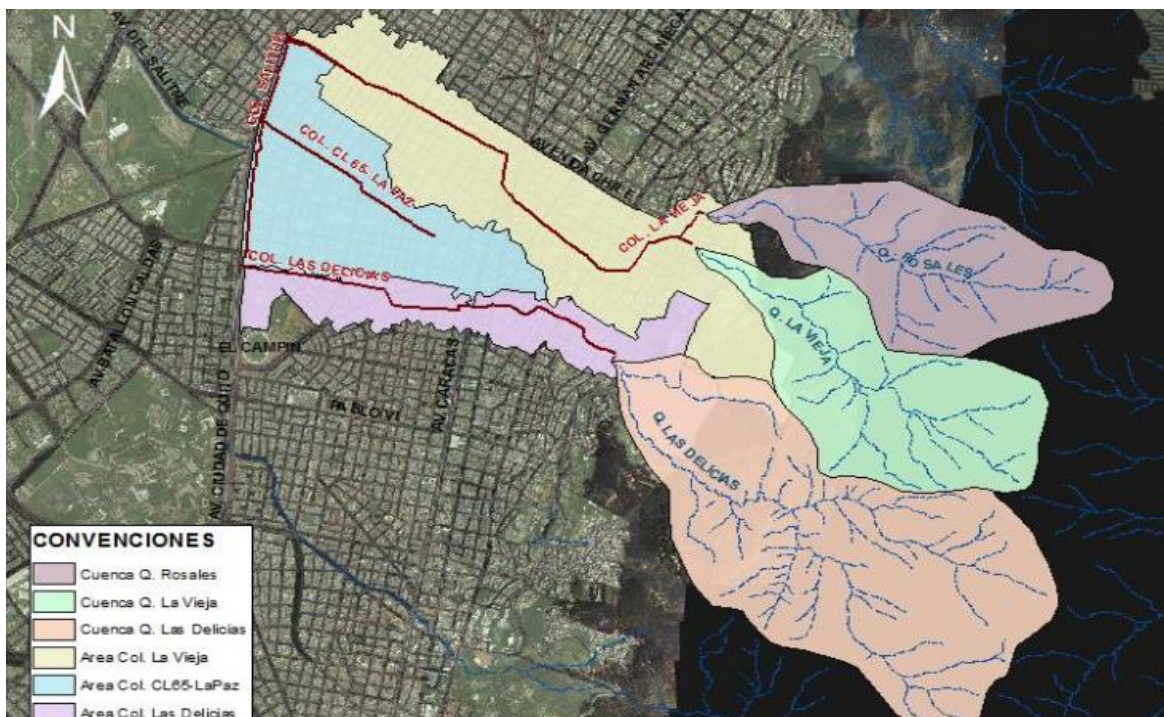
Para el desarrollo del análisis y evaluación hidráulica del sistema de alcantarillado existente se utilizará el programa Storm Water Management Model (SWMM) desarrollado por la agencia de protección ambiental de los estados unidos (EPA) que permite realizar una simulación del sistema de alcantarillado teniendo como punto de partida la topología de la red existente y los caudales de aporte del sistema.

Para la caracterización morfométrica de la cuenca de estudio de la quebrada la vieja y de las cuencas de aporte para cada tren de SUDS propuesto, se utilizará el programa ARCGIS, que permite el análisis de datos en formato Shape para determinar las características del área de estudio.

Para el diseño de los SUDS se emplearán las hojas de predimensionamiento de la norma NS-166 Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018)

## 5 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ALCANTARILLADO COMBINADO

La Subcuenca La Vieja está conformada por un sistema de alcantarillado combinado que recoge el área de la zona montañosa y que recibe las quebradas Los Rosales y la de su propio nombre, y sus tributarios. El sistema funciona a través del colector principal La Vieja, que tiene una longitud aproximada de 3424m y discurre de oriente a occidente, se inicia a la altura de la calle 71 con carrera 3 donde se une el drenaje de la quebrada la Vieja con la quebrada los Rosales y continúa hacia el sur occidente hasta la calle 69 por donde se desvía hasta la carrera 15; aquí gira al nor-occidente a buscar la calle 71 por donde continua hasta la carrera 38, para entregar las aguas lluvias al canal Salitre. Antes de hacer la entrega al canal Salitre, mediante una estructura de alivio localizada en la carrera 32 a la altura de la calle 71, se hace la separación de caudales, y las aguas residuales continúan por otro colector para entregar al interceptor derecho del canal Salitre. El colector La Vieja posee diámetros que varían entre 1.30m hasta 2.55m y un tramo final en box-culvert, previo a su descarga al canal Salitre.

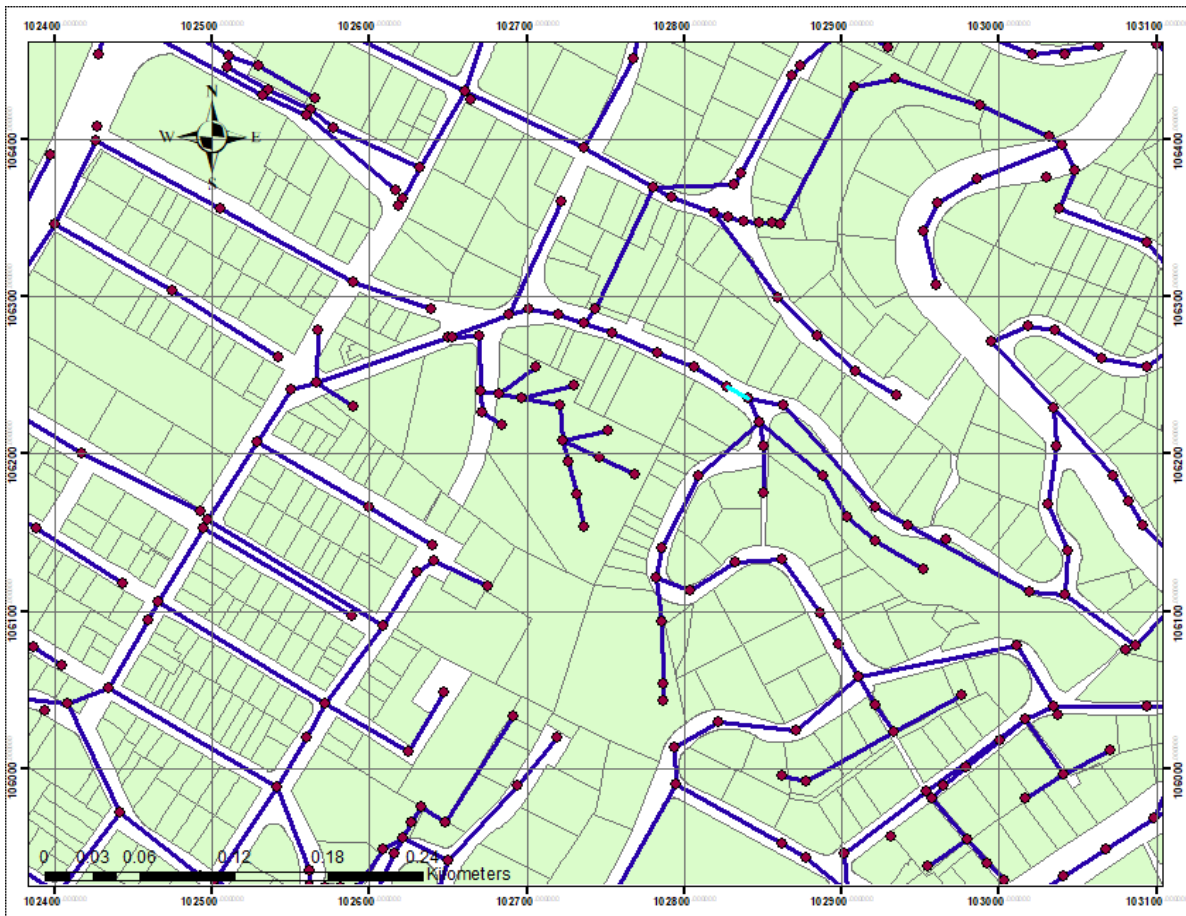


*Ilustración 5-1 Localización general de las cuencas*

*Fuente: EAAB, 2014*

El alcance del diagnóstico del sistema se limita a la localización de los puntos de descole de los trenes de diseño donde se localizarán los SUDS.

Para la elaboración del diagnóstico, se tuvo en cuenta los shapes suministrados por la EAB, en donde se incluyen la localización de los pozos con sus respectivos atributos, el manzaneo de la zona de estudio y la localización de las tuberías con sus respectivas características como se muestra en la siguiente imagen.



*Ilustración 5-2 Shapes de las redes de alcantarillado combinado  
Fuente: Propia, apoyado en el SIG de la EAB*

La red de alcantarillado combinado es en su mayoría de mampostería con diámetros que predominan principalmente entre 1.5m y 0.6m con un 14%.



En la siguiente tabla se presenta un resumen de las tuberías de la red existente de alcantarillado combinado, con su respectivo material, diámetro, longitud y porcentaje.

*Tabla 5-1 Distribución actual diámetros y material de la red de alcantarillado Combinado*  
*Fuente: Propia*

Diámetro (m)	Longitud (m)	Material	Porcentaje
0.2	162.71	Mampostería	8%
0.25	39.61	Mampostería	2%
0.3	199.47	Mampostería	10%
0.4	248.35	Mampostería	13%
0.6	272.13	Mampostería	14%
1.	206.07	Mampostería	11%
1.1	85.30	Mampostería	4%
1.2	11.54	Mampostería	1%
1.3	151.59	Mampostería	8%
1.5	264.16	Mampostería	14%
1.55	54.59	Mampostería	3%
1.6	150.64	Mampostería	8%
1.7	70.15	Mampostería	4%
TOTAL	1916.30		100%

## **5.1 MODELACIÓN HIDRÁULICA**

De acuerdo con las normas NS-163 y NS-165 de la EAB, donde se establecen los requisitos para el desarrollo de modelos hidráulicos para los sistemas de alcantarillado y acueducto, se utilizará el programa EPA SWMM 5.1 para la modelación de redes de alcantarillado existentes.

Para la implementación del modelo, fue necesario realizar la topología según la información suministrada en los Shapes de la EAB. En este modelo se involucran todos los elementos de la red como Pozos o Nodos, tramos con su respectiva longitud, diámetro asumido, pendiente en (%), n manning (0.01 tubería de PVC), en la siguiente tabla se muestra la topología empleada para la modelación.

El primer tramo mostrado, representa el colector principal en el cual se encauza la quebrada La Vieja, cada espacio en la tabla representa un tramo nuevo dentro del sistema que corresponde a un afluente del colector principal.

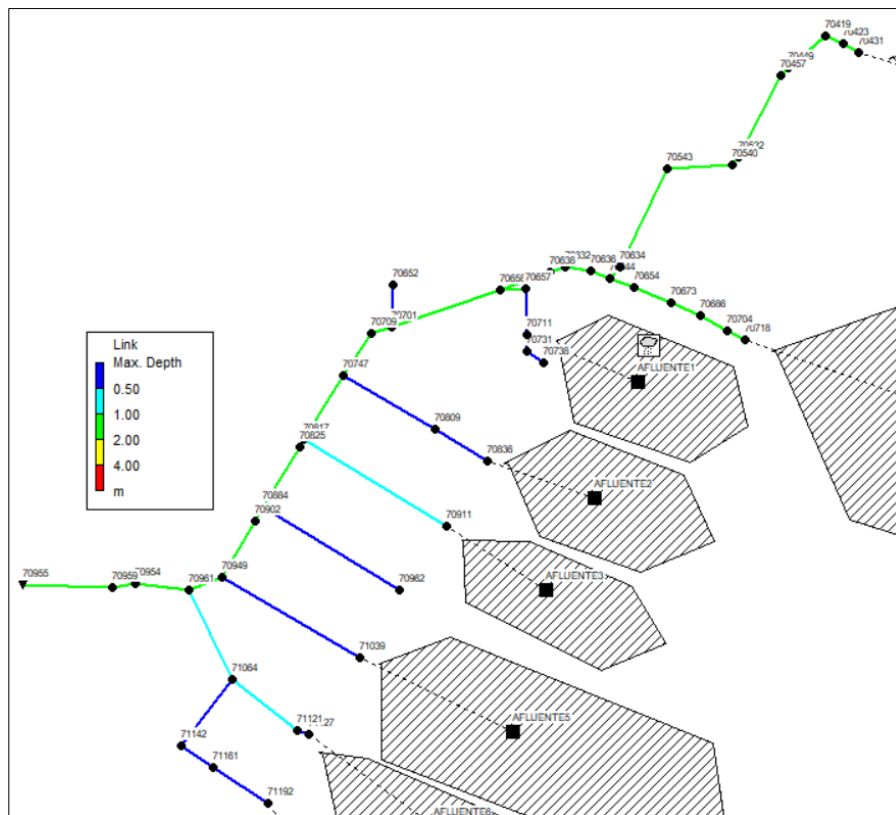
*Tabla 5-2 Topología de la red de alcantarillado Combinado*

*Fuente: Propia*

<b>N TRAMO</b>	<b>POZO INICIAL</b>	<b>POZO FINAL</b>	<b>TRAMO</b>	<b>DIAMETRO</b>	<b>LONGITUD (m)</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>PENDIENTE</b>
1	70718	70704	CLH61673	1.3	15.88	6	18.09%
2	70704	70686	CLH61689	1.3	23.59	6	11.83%
3	70686	70673	CLH61688	1.3	25.13	6	9.91%
4	70673	70654	CLH61692	1.3	31.05	6	2.32%
5	70654	70644	CLH61691	1.3	20.00	6	2.23%
6	70644	70636	CLH61690	1.3	16.42	6	14.39%
7	70636	70632	CLT80281	1.3	19.51	6	3.40%
8	70632	70638	CLT80282	1.5	12.75	6	3.40%
9	70638	70658	CLT80283	1.5	41.43	6	8.40%
10	70658	70701	CLT80277	1.5	88.90	6	2.97%
11	70701	70709	CLT80278	1.5	16.31	6	3.52%
12	70709	70747	CLT80279	1.5	39.90	6	3.52%
13	70747	70817	CLT80268	1.5	58.64	6	3.57%
14	70817	70825	CLT80269	1.5	6.22	6	1.72%
15	70825	70884	CLT80270	1.55	54.59	6	2.75%
16	70884	70902	CLT80275	1.6	12.88	6	17.52%
17	70902	70949	CLT80276	1.6	50.31	6	1.94%
18	70949	70961	CLT80274	1.6	28.01	6	3.04%
19	70961	70954	CLT80273	1.6	41.73	6	3.04%
20	70954	70959	CLT80272	1.6	17.71	6	1.29%
21	70959	70955	CLT80271	1.7	70.15	6	0.51%
22	70431	70423	CLT80289	1.05	13.50	6	21.89%
23	70423	70419	CLT80288	1.05	15.72	6	1.40%
24	70419	70449	CLT80290	1.05	38.36	6	2.12%
25	70449	70457	CLT80291	1.05	8.29	6	41.18%
26	70457	70532	CLT80286	1.05	70.84	6	2.83%
27	70532	70540	CLT80287	1.05	7.88	6	23.06%
28	70540	70543	CLT80285	1.05	51.47	6	1.76%
29	70543	70634	CLT80284	1.1	85.30	6	4.87%
30	70634	70644	CLT80280	1.2	11.54	6	4.87%
31	70652	70701	CLT79926	0.3	32.98	6	6.55%
32	70738	70731	CLT81743	0.3	15.48	6	9.24%
33	70731	70711	CLT81742	0.3	13.52	6	3.40%
34	70711	70657	CLT81741	0.3	35.23	6	7.92%
35	70657	70658	CLT81128	0.3	19.62	6	5.10%

N TRAMO	POZO INICIAL	POZO FINAL	TRAMO	DIAMETRO	LONGITUD (m)	MATERIAL	PENDIENTE
36	70836	70809	CLT79969	0.2	46.91	6	6.78%
37	70809	70747	CLT79916	0.3	82.62	6	39.21%
38	70911	70817	CLT79922	0.6	130.18	6	25.78%
39	70962	70884	CLT80513	0.4	124.23	6	28.87%
40	71039	70949	CLT83893	0.4	124.12	6	31.59%
41	71127	71121	CLT82114	0.25	9.25	6	2.59%
42	71121	71064	CLT82113	0.6	64.90	6	5.08%
43	71064	70961	CLT83892	0.6	77.05	6	48.89%
44	71192	71161	CLT82120	0.2	50.75	6	3.61%
45	71161	71142	CLT82118	0.25	30.35	6	3.89%
46	71142	71064	CLT82115	0.2	65.05	6	60.74%

En la siguiente imagen se muestra la representación del modelo con sus respectivos elementos de configuración como lo son los nodos, tramos, a etc.



*Ilustración 5-3 Topología de la red existente  
Fuente: Propia.*

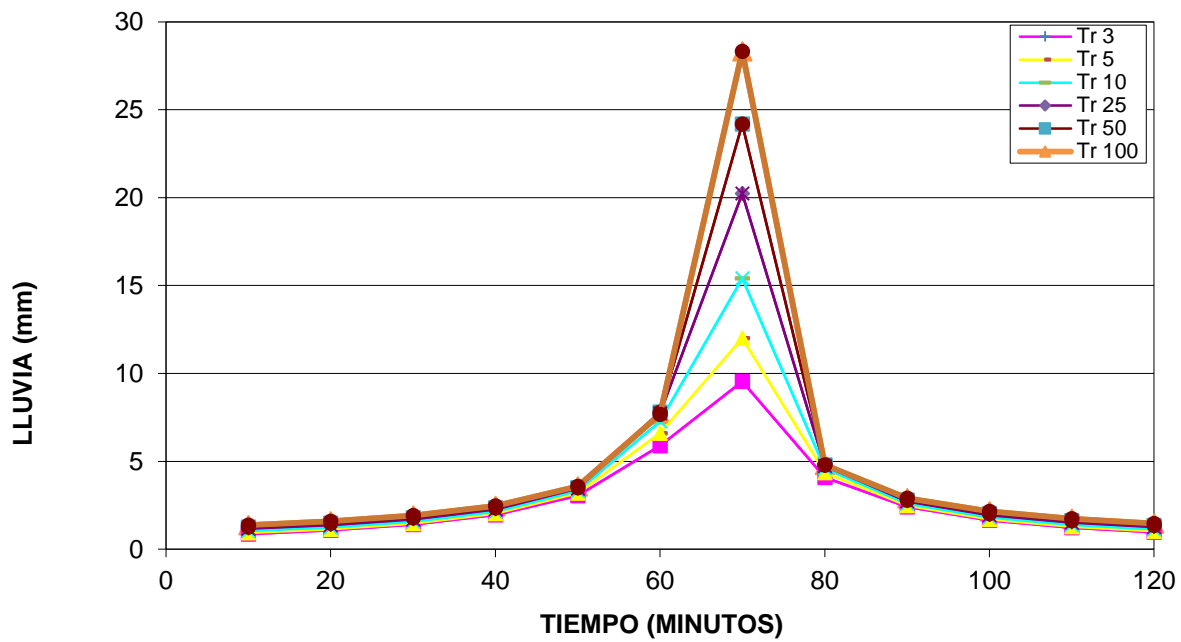
Luego de obtenidos estos valores se insertan como una serie temporal en el modelo de EpaSwmm con el fin de modelar la red proyectada netamente con aguas lluvias. Esta serie temporal ya definida con el hietograma de diseño interactúa directamente con el módulo de hidrología del software como un pluviómetro.

La selección del método está en función de la información disponible, en este caso se utilizó un “hietograma especificado”. Un hietograma no es más que la distribución temporal de la intensidad o de la profundidad de una precipitación a lo largo de la duración del episodio.

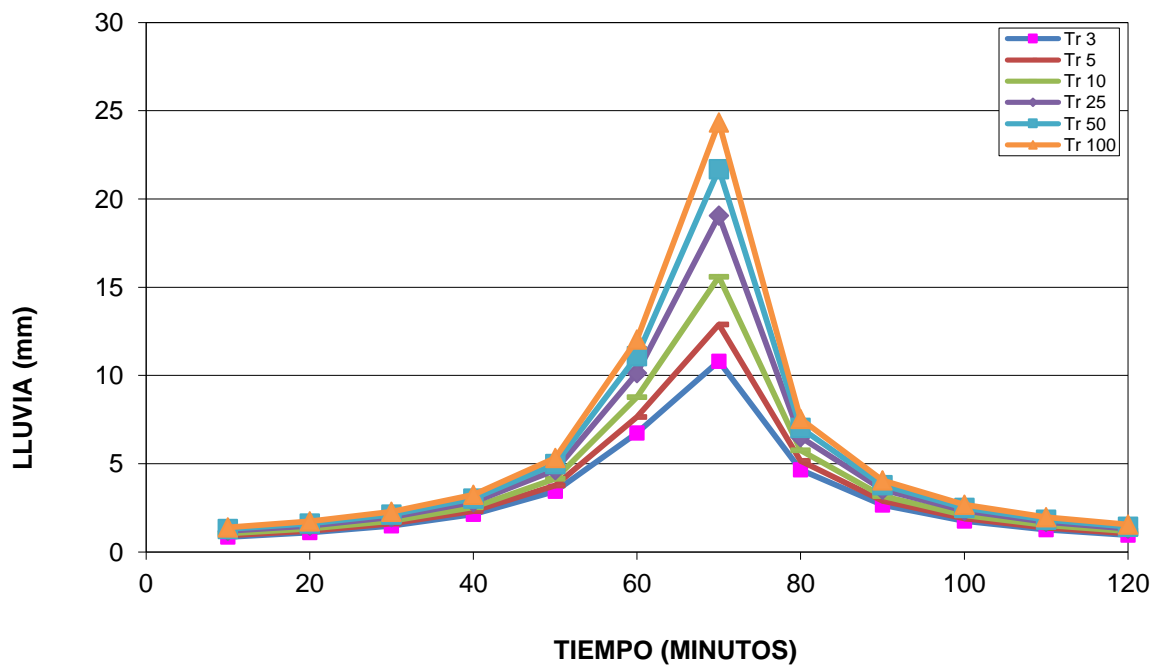
El método utilizado se denomina Bloques alternos, el cual consiste en formar un diagrama de barras con el proceso que a continuación se describe:

1. Fijar la duración de la tormenta, como tiempo de duración de la tormenta de diseño lo usual es tomar es el tiempo de concentración de la cuenca.
2. Divide el tiempo de duración en intervalos de tiempo  $\Delta t$
3. Selecciona el periodo de retorno del cual obtener el hietograma.
4. Obtén de su curva IDF los valores de intensidad de precipitación para cada intervalo  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ , hasta la duración total de la precipitación.
5. Calcular la profundidad o volumen de precipitación caída en cada intervalo, multiplicando la intensidad por la duración del intervalo (en horas).
6. Resta los valores sucesivos de profundidad de precipitación (en mm) calculados antes.
7. Reordena los resultados de manera que el mayor valor esté en medio de la serie, y se vayan alternando en orden descendente alternativamente a lado y lado de ese máximo.

En la Ilustración 5-4 e Ilustración 5-5 se muestran los hietogramas de diseño para las cuencas en estudio, para más detalle del cálculo de los hietogramas ver el Apéndice 1.



*Ilustración 5-4 Hietograma de diseño Quebrada La Vieja  
Fuente: Propia*



*Ilustración 5-5 Hietograma de diseño Quebrada Los Rosales  
Fuente: Propia*

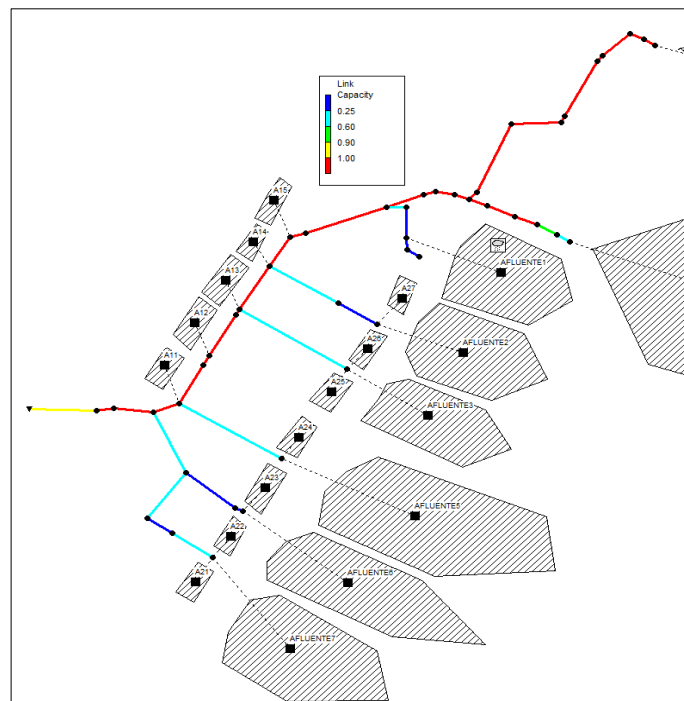
Para cada tramo se asigna el área aferente de acuerdo con la configuración y las cuencas evidenciadas en los Shapes, en este proceso se tuvieron en cuenta las áreas sobre las cuales iban a influir los trenes de los SUDS.

## 5.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

### CAPACIDAD

De acuerdo con el Artículo 151 de la resolución 0330 del 2017 (RAS), la relación máxima entre profundidad y diámetro de la tubería en los alcantarillados combinados permisible para la profundidad del flujo para el caudal en un colector es de 93% del diámetro interno real de éste.

En la Ilustración 5-6 se muestra la capacidad para cada uno de los tramos que hace parte del sistema de alcantarillado combinado en la zona de estudio.



*Ilustración 5-6 Relación Y/d para sistema de alcantarillado combinado  
Fuente: Propia.*

En la siguiente tabla se muestra la capacidad de cada uno de los tramos.

*Tabla 5-3 Relación de llenado*  
*Fuente: Propia*

link	Caudal (l/s)	Relación de llenado
70419-70449	4680.92	1.00
70423-70419	4681.4	1.00
70431-70423	4681.14	1.00
70449-70457	4681.36	1.00
70457-70532	4680.71	1.00
70532-70540	4314.21	1.00
70540-70543	4312.49	1.00
70543-70634	4194.83	1.00
70632-70638	8783.96	1.00
70634-70644	4195.76	1.00
70636-70632	8785.25	1.00
70638-70658	8659.45	1.00
70644-70636	8785.89	1.00
70654-70644	6391.5	1.00
70657-70658	11.35	0.50
70658-70701	8669.17	1.00
70673-70654	6391.88	1.00
70686-70673	6390.53	1.00
70701-70709	8669.8	1.00
70704-70686	6389.48	0.95
70709-70747	8670.34	1.00
70711-70657	11.43	0.09
70718-70704	6407.61	0.70
70731-70711	0	0.00
70738-70731	0	0.00
70747-70817	8679.02	1.00
70809-70747	9.23	0.54
70817-70825	8693.46	1.00
70825-70884	8629.87	1.00
70836-70809	9.34	0.24
70884-70902	8631.02	1.00
70902-70949	8636.79	1.00
70911-70817	14.44	0.53
70949-70961	8665.68	1.00
70954-70959	8347.97	1.00
70959-70955	8347.86	0.92
70961-70954	8692.02	1.00

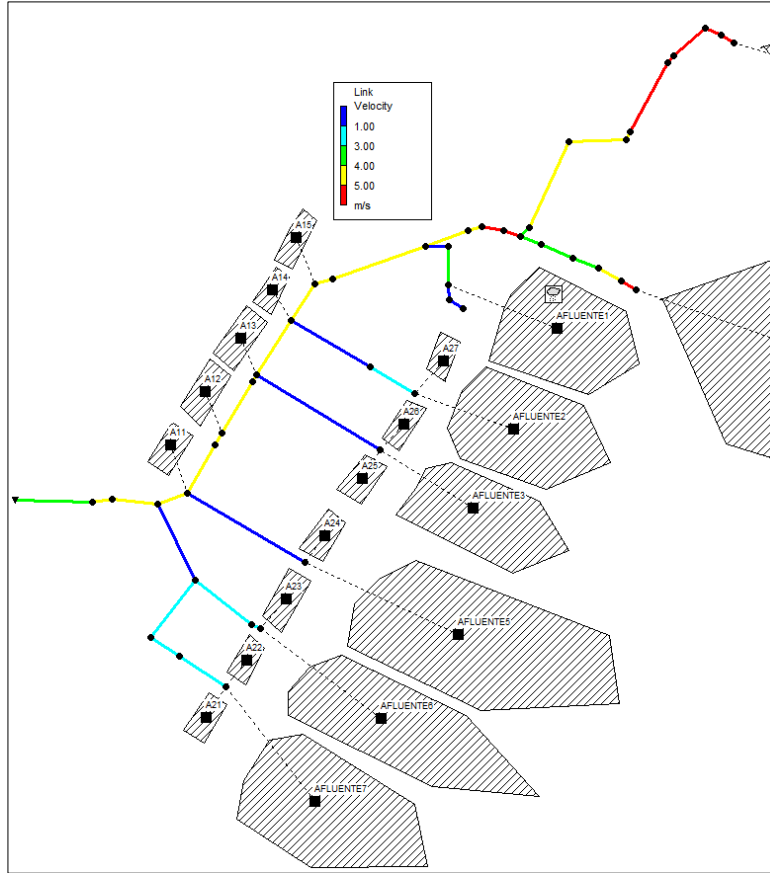
link	Caudal (l/s)	Relación de llenado
71039-70949	23.78	0.55
71064-70961	25.22	0.53
71121-71064	11.86	0.06
71127-71121	12.07	0.26
71142-71064	14.52	0.37
71161-71142	15.11	0.29
71192-71161	15.08	0.36

De lo anterior se puede deducir que el 61% de los tramos pertenecientes al sistema no cumplen con la condición de capacidad de llenado, pues excede el valor permitido por la norma y pone en riesgo la integridad de la tubería existente y la hidráulica de la misma.

### **VELOCIDAD**

De acuerdo con el Artículo 150 de la resolución 0330 del 2017, la velocidad máxima real en un colector por gravedad no debe sobrepasar los 5m/s, determinada para el caudal de diseño. En la siguiente imagen se muestra las velocidades para cada uno de los tramos que hace parte del sistema de alcantarillado combinado en la zona de estudio.





*Ilustración 5-7 Velocidades sistema de alcantarillado combinado*  
*Fuente: Propia.*

En la siguiente tabla se muestra la velocidad de cada uno de los tramos.

*Tabla 5-4 Velocidad redes existentes alcantarillado combinado*  
*Fuente: Propia*

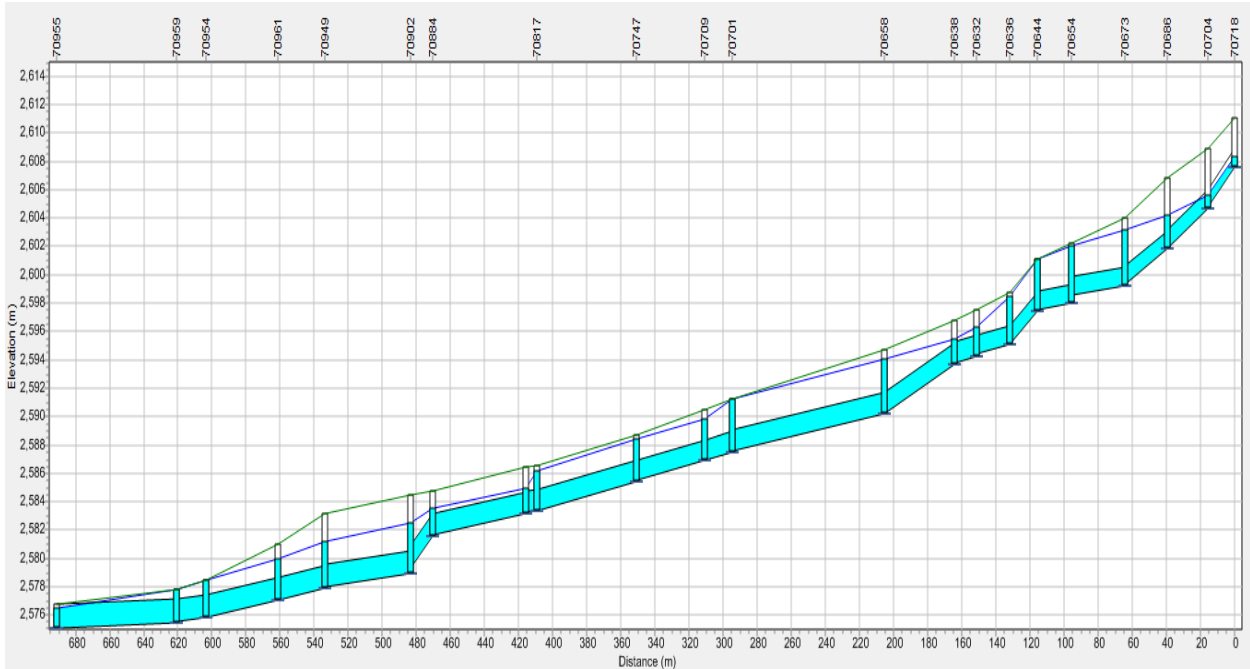
Link	Caudal (l/s)	Velocidad m/s
70419-70449	4680.92	5.59
70423-70419	4681.4	5.41
70431-70423	4681.14	7.92
70449-70457	4681.36	6.07
70457-70532	4680.71	5.41
70532-70540	4314.21	4.98
70540-70543	4312.49	4.98
70543-70634	4194.83	5.06
70632-70638	8783.96	5.62
70634-70644	4195.76	3.87
70636-70632	8785.25	6.62

Link	Caudal (l/s)	Velocidad m/s
70638-70658	8659.45	6.16
70644-70636	8785.89	6.62
70654-70644	6391.5	4.82
70657-70658	11.35	0.02
70658-70701	8669.17	4.91
70673-70654	6391.88	4.82
70686-70673	6390.53	5.33
70701-70709	8669.8	4.91
70704-70686	6389.48	7.45
70709-70747	8670.34	4.94
70711-70657	11.43	3.64
70718-70704	6407.61	8.43
70731-70711	0	0
70738-70731	0	0
70747-70817	8679.02	4.91
70809-70747	9.23	0.23
70817-70825	8693.46	4.96
70825-70884	8629.87	5.63
70836-70809	9.34	1.61
70884-70902	8631.02	7.14
70902-70949	8636.79	4.3
70911-70817	14.44	0.1
70949-70961	8665.68	4.31
70954-70959	8347.97	4.15
70959-70955	8347.86	3.81
70961-70954	8692.02	4.32
71039-70949	23.78	0.33
71064-70961	25.22	0.17
71121-71064	11.86	1.53
71127-71121	12.07	1.17
71142-71064	14.52	1.36
71161-71142	15.11	1.3
71192-71161	15.08	1.46

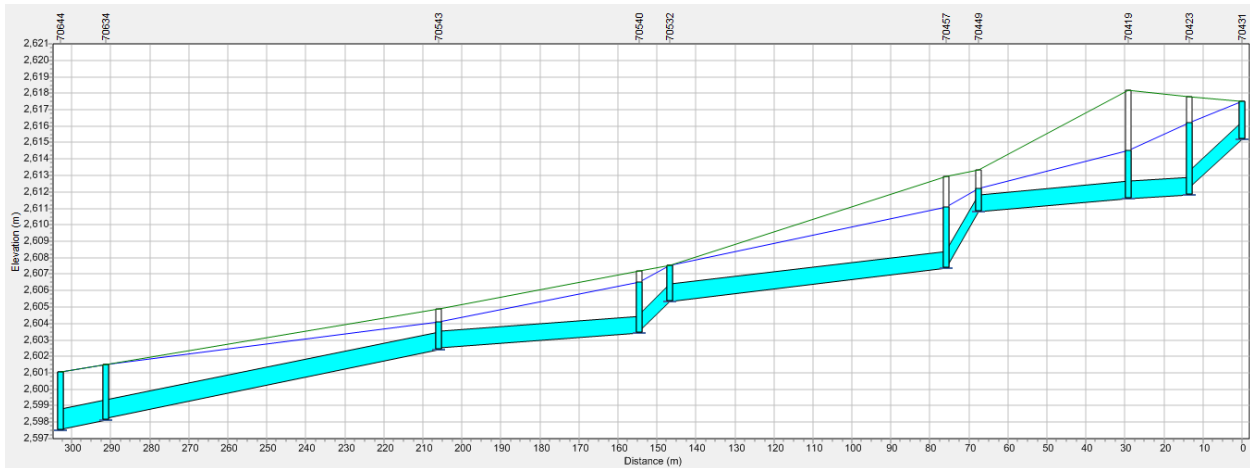
De lo anterior se puede deducir que el 34% de los tramos pertenecientes al sistema no cumplen con la condición de velocidad, pues excede el valor permitido por la norma y pone en riesgo la integridad de la tubería existente y la hidráulica de la misma.

## PERFILES

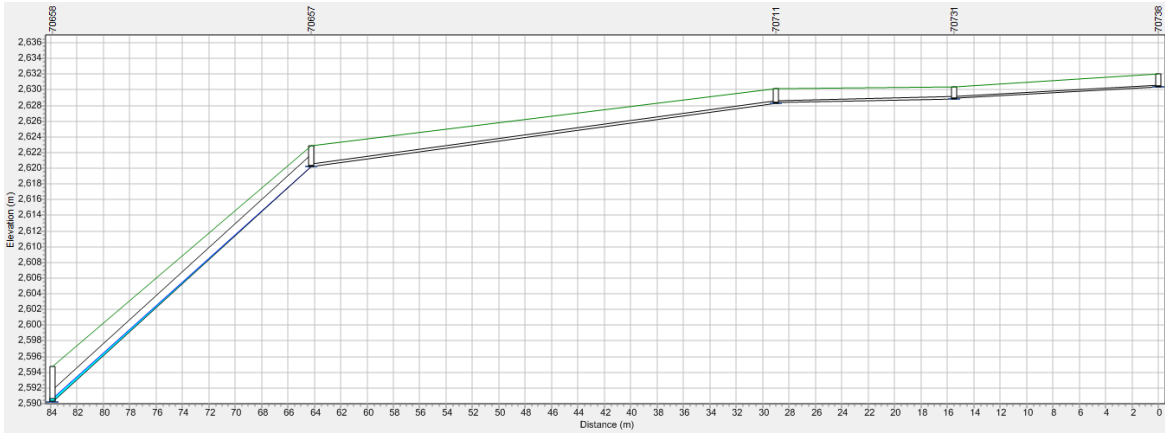
En las siguientes imágenes se muestran los perfiles para cada uno de los colectores pertenecientes al sistema de redes de alcantarillado combinado.



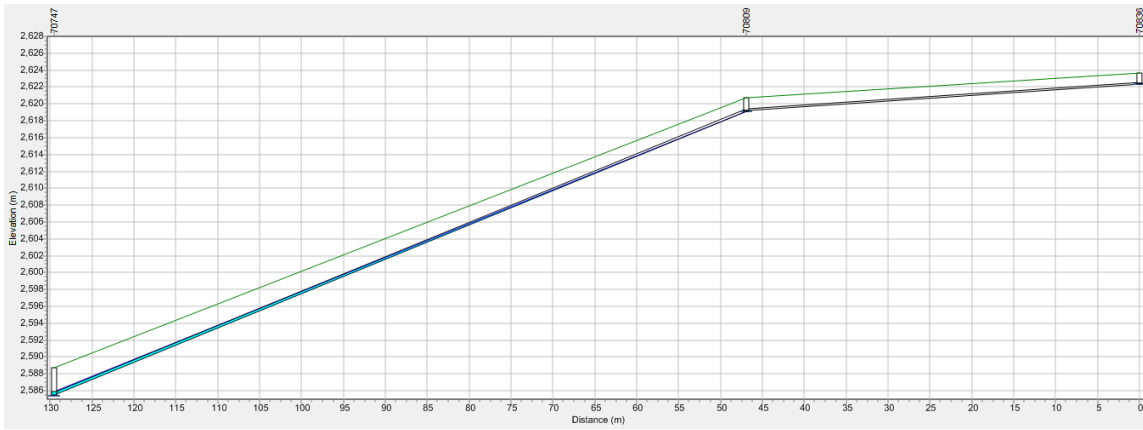
*Ilustración 5-8 Perfil Colector principal – La Vieja  
Fuente: Propia*



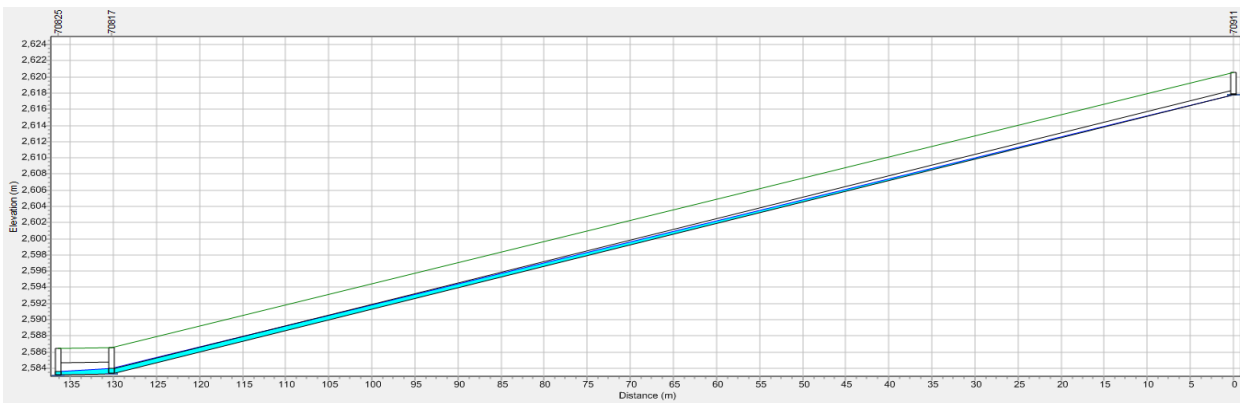
*Ilustración 5-9 Perfil Colector Los Rosales– Afluente colector La Vieja  
Fuente: Propia*



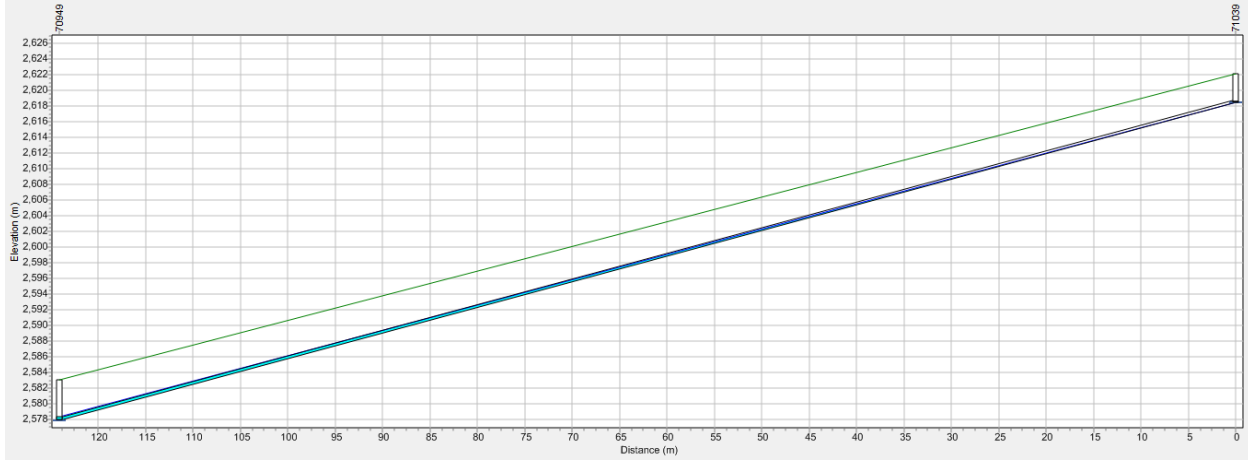
*Ilustración 5-10 Perfil- Afluyente 1 colector La Vieja  
Fuente: Propia*



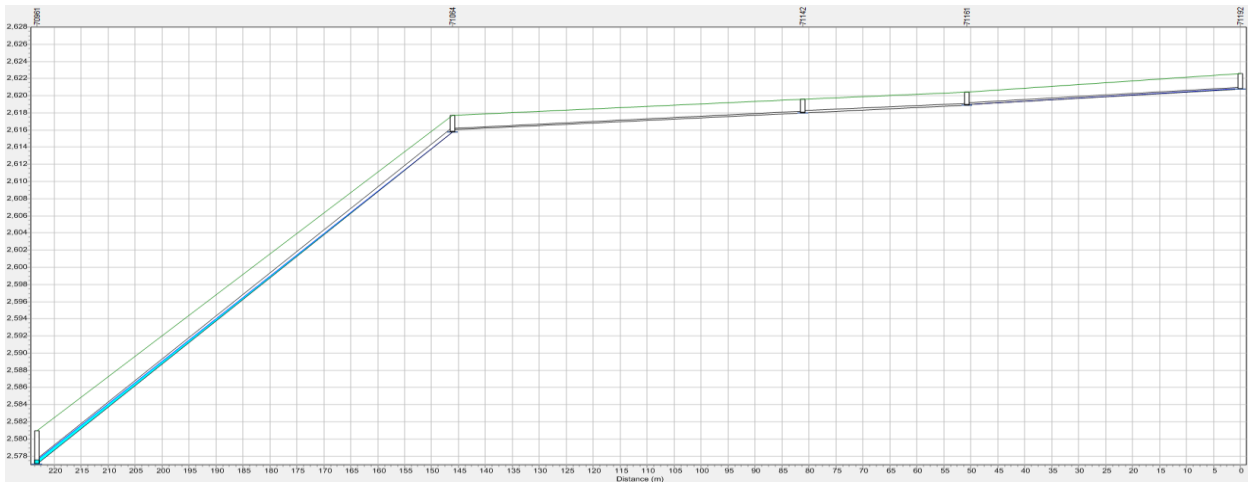
*Ilustración 5-11 Perfil- Afluyente 2 colector La Vieja  
Fuente: Propia*



*Ilustración 5-12 Perfil- Afluyente 3 colector La Vieja  
Fuente: Propia*



*Ilustración 5-13 Perfil- Afluyente 5 colector La Vieja  
Fuente: Propia*



*Ilustración 5-14 Perfil- Afluyente 6 colector La Vieja  
Fuente: Propia*

## **6 DISEÑO DE SUDS**

### **6.1 SELECCIÓN DE SUDS**

Las tipologías SUDS fueron seleccionadas bajo los parámetros recomendados por el documento selección de tipologías SUDS de la (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017) (ver Anexo 1 Selección de tipologías SUDS). Considerando que el sector se encuentra totalmente desarrollado, condiciones topográficas y demás factores del lugar, esto con el fin de generar el menor impacto urbanístico en la zona. Las tipologías seleccionadas para la zona de estudio corresponden a alcorques inundables y pavimentos permeables, que son las tipologías que más se ajustan a la zona de estudio, considerando que es un sector consolidado y su construcción se puede realizar en el espacio público de las vías existentes, en los andenes y/o separadores o en la calzada de vías con poco tráfico respectivamente. Las tipologías seleccionadas ambas tienen un enfoque de reducción del volumen de escorrentía y mejoramiento de la calidad.

### **6.2 TRENES DE TRATAMIENTO**

Los trenes de tratamiento se refieren a la disposición en serie de SUDS de mínimo dos estructuras de una o más tipologías, con la finalidad de incrementar los beneficios asociados a su implementación, y de esta manera influir en el volumen y calidad de la escorrentía que es infiltrada efectivamente, se aprovecha o descarga al sistema de drenaje convencional. La configuración de un tren de tratamiento debe cumplir para todas las tipologías incluidas en éste, las restricciones para su implementación y garantizar de esta forma su funcionalidad, su configuración final depende de los objetivos específicos que de reducción de caudal pico y/o volumen de escorrentía definidos previamente. Dentro de los objetivos que puede incluir un tren de tratamiento se puede encontrar promover la infiltración, almacenamiento o detención temporal, transporte, aprovechamiento para riego y lavado; la empresa de acueducto y alcantarillado realizará la evaluación de idoneidad de las tipologías y/o trenes de tratamiento seleccionados cumpliendo lo establecido en la NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).

### 6.3 DISEÑO HIDROLÓGICO

El diseño hidrológico de los SUDS seleccionados para implementar en la zona de estudio, se desarrolló siguiendo las recomendaciones de la normativa técnica NS-166. Las tipologías seleccionadas, que por sus características se ajustan a la zona de estudio son los alcorques inundables y los pavimentos permeables, para ambos casos su diseño se realiza a partir de un volumen de tratamiento o volumen de calidad ( $V_c$ ) y su funcionamiento está orientado a la reducción de volúmenes de escorrentía y cargas contaminantes (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018). A continuación se presenta el diseño hidrológico para las tipologías seleccionadas, y en el Apéndice 2 se presenta de forma detallada la justificación de los parámetros seleccionados.

Para el diseño de los alcorques y los pavimentos permeables el diseño establece como parámetro de partida, el volumen de tratamiento ( $V_c$ ), que es la cantidad de precipitación que puede tratar efectivamente cada una de las tipologías considerando que los picos de lluvia se presentan pocas veces y diseñar las estructuras para estos eventos, implica un sobredimensionamiento. El volumen de tratamiento se determina aplicando el método racional, por ser áreas de aporte pequeñas (menor a 10 hectáreas), con una profundidad de la lluvia de tratamiento ( $h_p$ ), un coeficiente de escorrentía en función de la cobertura del suelo y el área de aporte. Para la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta que la información de precipitaciones oficial, son las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF), para las diferentes estaciones localizadas en el perímetro urbano y sus alrededores, el diseño de las estructuras se realizará con ésta información para tener un grado de congruencia mínimo entre el diseño del SUDS y el sistema de alcantarillado al cual se conecta.

Para el área de estudio se utilizó la estación La Vieja, operada por el acueducto, y de la cual se tiene información de IDF, y cuyos parámetros se muestran a continuación en la Tabla 6-1.

*Tabla 6-1 Valores de coeficientes de las curvas IDF – estación La Vieja*  
*Fuente: (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017)*

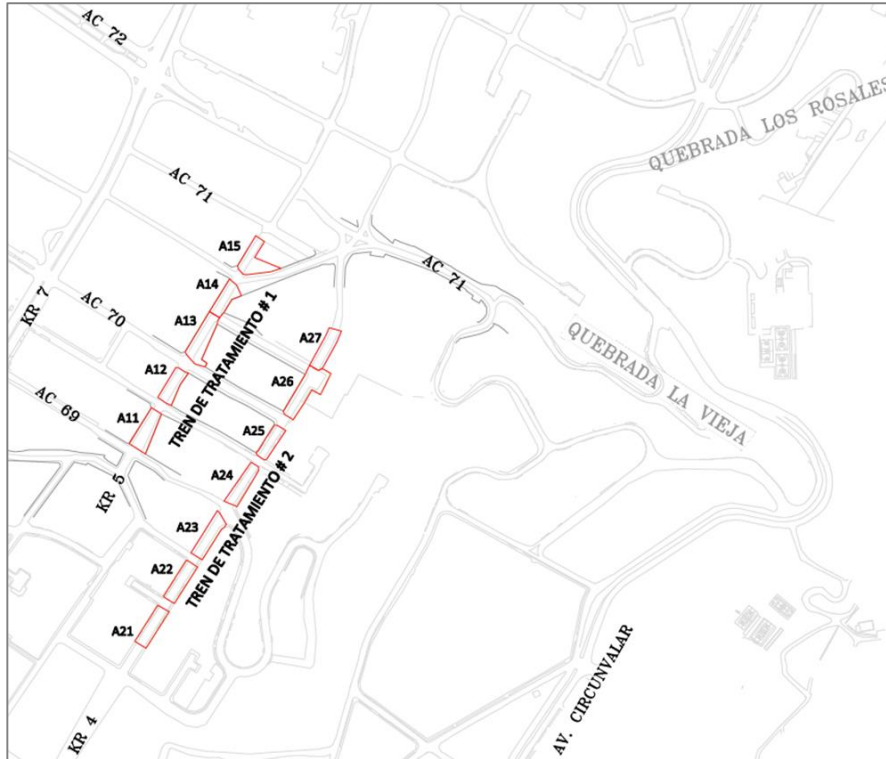
Nombre	Código	Coordenadas		Parámetros			
		Este	Norte	<i>c</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>m</i>
La Vieja	212006	1003822	1005710	1334.5	0.87	5.5	0.159

### 6.3.1 Áreas de aporte para los trenes de tratamiento

En la Ilustración 6-1, se presentan las áreas de drenaje para los trenes de tratamiento compuestos por alcorques o pavimentos permeables, las áreas determinadas para la intervención, se determinaron para las zonas de las vías y andenes en las cuales se cumplen las diferentes restricciones de pendiente para la localización de cada una de las tipologías, de forma que se puedan comparar los resultados obtenidos con su implementación. Se estimaron áreas de vías y andenes únicamente para la implementación de los SUDS, debido a que las edificaciones existentes se encuentran conectadas al sistema existente y su conexión a los trenes de tratamiento requiere una muy detallada investigación de la ubicación y condiciones de conexión actuales al sistema existente.

El tren de tratamiento número uno, se localiza sobre la carrera 5, entre calle 69 y 71 y el segundo tren se localiza sobre la carrera 4 entre calle 66 y 70a. El área total de los tres trenes de tratamiento alcanza en total 1.0 hectárea, la cual se encuentra impermeabilizada en un 86% compuesta por vías y andenes, y el 14% restante son zonas verdes localizadas en andenes y parques como se muestra en la Ilustración 6-1, a continuación.





*Ilustración 6-1 Área de drenaje para los SUDS  
Fuente: Propia*

### 6.3.2 Coeficientes de escorrentía

Los coeficientes de escorrentía para las áreas de drenaje de las diferentes tipologías de SUDS, se establecen según las recomendaciones de la norma técnica de servicio NS-085 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2017), como se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 6-2 Coeficiente de escorrentía  
Fuente: (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2017)*

<b>Tipo de superficie</b>	<b>C</b>
<b>Zonas Urbanizadas</b>	
Cubiertas	0.85
Superficies en asfalto	0.80
Superficies en concreto	0.85
Superficies adoquinadas	0.75
Vías no pavimentadas y superficies con suelos compactados	0.60
<b>Zonas verdes (Parques, Jardines, etc)</b>	

Tipo de superficie	C
Terreno plano (pendiente menor a 2%)	0.25
Terreno promedio (pendiente entre 2% y 7%)	0.35
Terreno de alta pendiente (Superior a 7%)	0.40

### 6.3.3 Volumen de tratamiento (Vc)

El procedimiento detallado se describe en el Apéndice 2, a continuación se describen los pasos a desarrollar para determinar el volumen de tratamiento (Vc) para el dimensionamiento de las estructuras.

1. Estimar  $h_{1.2,360}$  para la estación pluviográfica de la EAB más cercana al sitio de interés que cuente con curvas IDF, usar la siguiente ecuación con los parámetros  $c$ ,  $m$ ,  $e$  y  $f$  propios de la estación.

$$h_{1.2,360} = \left[ \frac{C * 1.2^m}{360^e + f} \right] \left[ \frac{360}{60} \right]$$

$$h_{1.2,360} = 47.65 \text{ mm}$$

Donde:

$h_{1.2,360}$  : Profundidad de la lluvia para un periodo de retorno y duración establecidos  
 $c$ ,  $m$ ,  $e$  y  $f$  : Coeficientes propios de cada estación pluviográfica

2. Transformar la lluvia esperada para un periodo de retorno de 1.2 años y una duración de 360 minutos ( $h_{1.2,360}$ ) a la profundidad de la lluvia de tratamiento ( $h_p$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$h_p = 10.19 * LN[h_{1.2,360}] - 16.785$$

$$h_p = 22.11$$

Donde:

hp : Profundidad de la lluvia (mm)

h 1.2 , 360 : Profundidad de lluvia con un periodo de retorno de 1,2 años y una duración de 360 minutos (mm)

3. Determinar el volumen de tratamiento  $V_c$ , aplicando la siguiente ecuación.

$$V_c = C * h_p * A$$

Donde:

$V_c$ : Volumen de tratamiento ( $m^3$ )

A: Área de drenaje ( $m^2$ )

hp: profundidad de la lluvia (m)

C: coeficiente de escorrentía (adimensional)

A continuación se presenta el volumen de tratamiento ( $V_c$ ) para cada uno de los trenes de SUDS a analizar en la zona de estudio.

*Tabla 6-1 Volumen de tratamiento ( $V_c$ ) para el tren de tratamiento 1*

*Fuente: Propia*

ID	AREA TOTAL		Ancho m	Largo m	VÍA m <sup>2</sup>	ANDEN m <sup>2</sup>	Z Verde m <sup>2</sup>	C Promedio	Vc m <sup>3</sup>
	m <sup>2</sup>	ha							
A11	885.83	0.089	17.72	50.00	565.6	230.23	90	0.73	14.32
A12	667.31	0.067	15.83	42.16	378	204.31	85	0.71	10.54
A13	1083.28	0.108	18.05	60.00	491.98	431.3	160	0.70	16.74
A14	678.81	0.068	16.07	42.25	348.3	230.51	100	0.70	10.54
A15	948.58	0.095	21.46	44.20	302.5	456.08	190	0.67	13.96
<b>TREN #1</b>	<b>4263.81</b>	<b>0.43</b>		<b>238.6</b>	<b>2086.4</b>	<b>1552.4</b>	<b>625</b>	<b>0.70</b>	<b>66.10</b>

*Tabla 6-2 Volumen de tratamiento ( $V_c$ ) para el tren de tratamiento 2*

*Fuente: Propia*

ID	AREA TOTAL		Ancho m	Largo m	VÍA m <sup>2</sup>	ANDEN m <sup>2</sup>	Z Verde m <sup>2</sup>	C Promedio	Vc m <sup>3</sup>
	m <sup>2</sup>	ha							
A21	755.65	0.076	15.11	50.00	487.6	147.05	121	0.70	11.73
A22	764.02	0.076	15.21	50.23	462.48	211.54	90	0.72	12.19
A23	848.49	0.085	15.58	54.45	506.34	242.15	100	0.72	13.52
A24	762.29	0.076	14.17	53.80	413.7	243.59	105	0.71	11.94
A25	594.14	0.059	14.19	41.87	308.13	201.01	85	0.70	9.25

ID	AREA TOTAL		Ancho	Largo	VÍA	ANDEN	Z Verde	C	Vc
	m <sup>2</sup>	ha	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	Promedio	m <sup>3</sup>
A26	1297.78	0.130	20.32	63.87	720.34	391.44	186	0.71	20.26
A27	746.47	0.075	14.64	50.99	451.95	179.52	115	0.70	11.61
<b>TREN #2</b>	<b>5768.84</b>	<b>0.58</b>		<b>365.21</b>	<b>3350.5</b>	<b>1616.3</b>	<b>802</b>	<b>0.71</b>	<b>90.50</b>

#### 6.4 DISEÑO DE TREN DE TRATAMIENTO CON ALCORQUES INUNDABLES

Los alcorques inundables son estructuras de apariencia similar a los árboles que se disponen en los andenes, sin embargo, mediante una serie de modificaciones lo hacen adecuado para el manejo de escorrentía, con características de almacenamiento temporal y mejora de calidad por la filtración producida en el suelo compuesto por material orgánico de sustento para el arbusto plantado y de gravas y arenas, para aumentar su porosidad que aumenta la posibilidad de almacenar agua. Un alcorque está compuesto de una caja para conformar las paredes laterales y mantener estable la estructura del suelo de tratamiento, el fondo puede ser revestido o no en función de permitir o no la infiltración, y un sistema de drenaje compuesto por tubería perforada en el fondo de la estructura para recolectar el agua que no es posible infiltrar y una tubería de rebose para el manejo excesos.

El dimensionamiento basados en una profundidad de la lluvia de tratamiento, obedece a un balance técnico y económico, para el cual la profundidad de la lluvia de tratamiento (hp), presenta las mejores relaciones entre el costo de la inversión y la cantidad de agua tratada por los alcorques. Al aumentar la profundidad de la lluvia de tratamiento (hp) los costos de las estructuras aumenta y la cantidad de tormentas con estas intensidades se reduce, así que lo que se busca es tratar las tormentas con periodos de retorno más cortos que son más recurrentes y brindar a las estructuras, mediante la implementación de una estructura de rebose la posibilidad de expulsar los excesos captados de lluvias con mayor intensidad.

#### 6.4.1 Localización de los alcorques

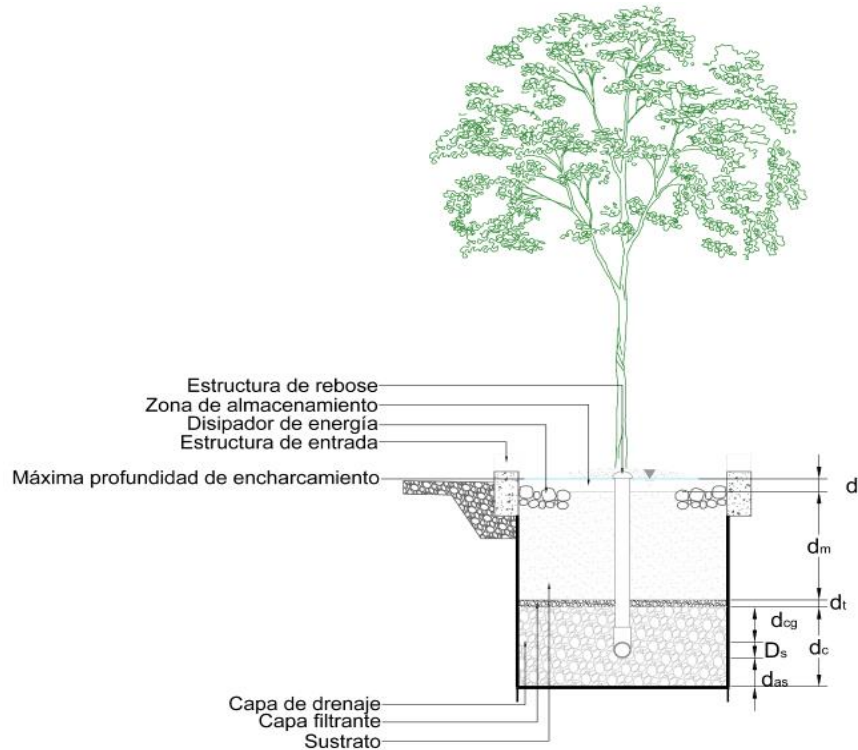
Los sistemas de alcorques inundables son adecuados para zonas altamente urbanizadas donde existen carencias de espacio para la instalación, aumentando su capacidad si son dispuestos en serie y tienen la ventaja de conectarse directamente con las áreas impermeables, por esta misma condición pueden ser usados como captación para trenes de tratamiento en conjunto con otras tipologías (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018). Se debe tener especial atención para su implantación en sectores con áreas muy extensas o pendientes longitudinales muy altas puesto que la velocidad y los grandes volúmenes de escorrentía pueden influir negativamente en la capacidad de captación e infiltración del alcorque, en la Tabla 6-3 se presentan las principales recomendaciones de las restricciones para localizar los alcorques.

*Tabla 6-3 Restricciones para localización de alcorques NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).*

<b>Restricción</b>	<b>Valor</b>
Pendiente longitudinal	Menor a 10%
Distancia al nivel freático	Mayor a 1.0 m
Distancia a cimientos	Mayor a 2.0 m

#### 6.4.2 Dimensionamiento

Los alcorques se diseñan a partir de un volumen de tratamiento y su funcionamiento principalmente está focalizado en la reducción del volumen de escorrentía y cargas contaminantes, mediante la captación, filtración y acumulación temporal de un volumen de agua precipitada. La capacidad de cada estructura depende de su tamaño, propiedades del medio filtrante interno y capacidad de infiltración del suelo sobre el cual se sitúan. En la Ilustración 6-2, se presenta el corte esquemático de un alcorque y se identifican los principales componentes



*Ilustración 6-2 Esquema de alcorque inundable NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).*

#### 6.4.2.1 Parámetros de diseño

En la Tabla 6-4, se presentan los valores recomendados para los diferentes parámetros de diseño recomendados para los alcorques por la NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).

*Tabla 6-4 Parámetros de diseño de alcorques NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).*

Parámetros	Valor	Unidades
Profundidad del sustrato ( $d_m$ )	$0.60 < d_m < 1.00$	m
Tiempo de vaciado del filtro ( $T_f$ )	$< 12$	horas
Permeabilidad del sustrato ( $k$ )	$60 - 70$	mm/h
Porosidad efectiva del sustrato ( $n_m$ )	$0.4$	-
Máxima profundidad de encharcamiento ( $d$ )	$0.15 < d < 0.30$	m
Diámetro de tubería perforada ( $D_s$ )	$0.10 < d_s < 0.15$	m
Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería perforada ( $d_{cg}$ )	$> 0.15$	m
Profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería Perforada ( $d_{as}$ )	$> 0.08$	m

Parámetros	Valor	Unidades
Profundidad de la capa de drenaje ( $d_c$ )	$0.33 < d_c < 0.38$	m
Profundidad de la capa filtrante ( $d_t$ )	$> 0.05$	m
Porosidad efectiva de la capa de grava ( $n_g$ )	0.4	-

#### 6.4.2.2 Dimensionamiento del alcorque

A continuación, se explica en forma detallada el dimensionamiento de la estructura de los alcorques inundables, con la metodología recomendada en la norma técnica NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018). El diseño presentado corresponde a una estructura típica, de sección rectangular, considerando infiltración parcial en el terreno dadas las condiciones de permeabilidad del suelo sobre el cual se localizan las estructuras y su cercanía con las construcciones existentes. Las áreas de encharcamiento y área de sustrato son iguales por la geometría seleccionada para la caja del alcorque; el primer paso para el cálculo corresponde al volumen tratado, que se obtiene con la siguiente ecuación (DNREC - State of Delaware, 2014).

$$V = A_{sm}(d_m * n_m + d_c * n_g) + \frac{A_f + A_s}{2} * d + V_{pt}$$

V: Volumen tratado ( $m^3$ )

$A_{sm}$ : Área superficial de la parte superior del sustrato ( $m^2$ )

$d_m$ : profundidad del sustrato (m)

$n_m$ : porosidad efectiva del sustrato (%)

$d_c$ : profundidad de la capa de drenaje y almacenamiento de grava (m)

$n_g$ : porosidad efectiva de la capa de grava (%)

$A_s$ : Área superficial de la parte más baja del área de encharcamiento ( $m^2$ )

$A_f$ : Área superficial a la máxima profundidad de encharcamiento ( $m^2$ )

$d$ : máxima profundidad de encharcamiento (m)

$V_{pt}$ : volumen de pretratamiento.

Para este caso de aplicación, los alcorques funcionaran directamente con captación y no tendrán un volumen de pretratamiento, como se indicó previamente, las áreas de encharcamiento y sustrato son iguales, por tanto el cálculo del volumen se puede expresar como:

$$V = A_{sm}(d_m * n_m + d_c * n_g) + A_s * d$$

Se procede a calcular la profundidad de la capa de drenaje, mediante la siguiente expresión:

$$d_c = d_{cg} + d_{as} + D_s$$

dc: Profundidad de la capa de drenaje y almacenamiento de grava (m)  
 dcg: Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería de saliva (m).  
 das: profundidad de la capa de drenaje bajo de tubería de drenaje (m).  
 D<sub>s</sub>: diámetro de la tubería perforada.

Posteriormente se calcula el volumen infiltrado, que hace referencia a la cantidad de agua que se puede infiltrar efectivamente al terreno, en función de sus características, para éste caso se presenta el cálculo para alcorques con tubería de drenaje (infiltración parcial).

$$V_{inf} = A_{sm} * \text{minimo}(d_{as} * n_g ; \frac{1}{2} * f * 0.024$$

V<sub>inf</sub>: Volumen infiltrado (m<sup>3</sup>)  
 A<sub>sm</sub>: Área superficial de la parte superior del sustrato (m<sup>2</sup>)  
 das: profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería (m)  
 n<sub>g</sub>: porosidad efectiva de la capa de drenaje (%)  
 f: tasa de infiltración (mm/h)  
 V: Volumen tratado (m<sup>3</sup>)

El volumen filtrado corresponde al volumen de escorrentía que regresa al sistema de alcantarillado por la tubería de rebose, se calcula con la siguiente ecuación.

$$V_f = V - V_{inf}$$

V<sub>f</sub>: Volumen filtrado (m<sup>3</sup>)  
 V: Volumen tratado (m<sup>3</sup>)  
 V<sub>inf</sub>: Volumen infiltrado (m<sup>3</sup>)

Por último se calcula el volumen de encharcamiento, que corresponde al volumen almacenado sobre la capa del sustrato hasta el nivel de entrada o captación, se requiere en los casos donde las intensidades de precipitación son altas, para maximizar la capacidad de los alcorques, y se estima con la siguiente ecuación:



$$V_{en} = \frac{A_f + A_s}{2} * d + V_{pt}$$

V<sub>en</sub>: Volumen de encharcamiento (m<sup>3</sup>)

A<sub>s</sub>: Área superficial de la parte más baja del área de encharcamiento (m<sup>2</sup>)

A<sub>f</sub>: Área superficial a la máxima profundidad de encharcamiento (m<sup>2</sup>)

d: máxima profundidad de encharcamiento (m)

V<sub>pt</sub>: volumen de pretratamiento.

#### 6.4.2.3 Comprobación de diseño

La comprobación de diseño se realiza se realiza mediante la siguiente ecuación

$$A_s \leq A_{smin}$$

$$A_{smin} = \frac{V * d_m}{T_d * k * \left(\frac{d}{2} + d_m\right)}$$

A<sub>sm</sub>: área superficial de la capa más baja del área de encharcamiento (m<sup>2</sup>)

A<sub>smin</sub>: Área superficial mínima de la parte superior del medio filtrante (m<sup>2</sup>)

V: Volumen total a tratar (m<sup>3</sup>)

d<sub>m</sub>: Profundidad del sustrato (m)

T<sub>d</sub>: Tiempo de vaciado del filtro (h)

k: Permeabilidad del medio filtrante (mm/h)

d: Máxima profundidad de encharcamiento (m)

Con los parámetros calculados para un alcorque tipo, se procede a determinar la cantidad de alcorques requeridos para tratar el volumen de calidad (V<sub>c</sub>) definido para cada una de las áreas de drenaje, dividiendo el volumen de calidad (V<sub>c</sub>) sobre el volumen tratado por un alcorque (V).

En la Tabla 6-3, se presenta el dimensionamiento de un alcorque tipo, con un ancho de 1.40m y una longitud en el sentido de la vía de 2.00m, con profundidad de sustrato de tratamiento de 0.80m y una profundidad total hasta el fondo de la estructura de 1.50m, con lo cual tiene la capacidad cada estructura de tratar un total de 2.04m<sup>3</sup>, que serán tratados y regresados al sistema de alcantarillado en un tiempo máximo de 12 horas.

*Tabla 6-3 Diseño de alcorque tipo*  
*Fuente: Propia*

Parámetro	Valor	Recomendación
B del alcorque	1.40 m	-
L del alcorque	2.00 m	-
Área superficial (Asm)	2.8 m <sup>2</sup>	-
Profundidad (dm)	0.80 m	0.60 < dm < 1.00
Tiempo de vaciado del filtro (Td)	12 horas	Máximo de 12 horas
Permeabilidad del sustrato (k)	70 mm/h	Asumida como 70 mm/h
Porosidad efectiva del sustrato (nm)	50%	Típicamente asumida como 40%
Asm = As = Af	2.80m	
Máx. profundidad de encharcamiento (d)	0.25 m	0.15 < d < 0.30
Capa filtrante (dt)	0.05 m	mín 0.05m
<b>Capa de drenaje</b>		
Diámetro de tubería perforada (Ds)	0.10 m	0.10 < Ds < 0.15m
Profundidad de la capa de drenaje sobre la tubería (d <sub>cg</sub> )	0.15 m	Mín 0.15 m
Porosidad efectiva de la capa de grava (n <sub>g</sub> )	50%	Mín 40%
Profundidad de la capa de drenaje bajo la tubería (d <sub>as</sub> )	0.15 m	Mín 0.08 m
Profundidad de capa de drenaje (dc)	0.40 m	
<b>Capa de drenaje</b>		
Tasa de infiltración del suelo (f)	70 mm/h	
Volumen infiltrado (V <sub>inf</sub> )	0.17 m <sup>3</sup>	
Volumen filtrado (V <sub>f</sub> )	1.88 m <sup>3</sup>	
Volumen de encharcamiento (V <sub>en</sub> )	0.70 m <sup>3</sup>	
Volumen total a tratar (V)	2.04 m <sup>3</sup>	
<b>Comprobación de diseño</b>		
Área superficial mínima (As <sub>min</sub> )	2.1 m <sup>2</sup>	As <sub>min</sub> < Asm

Con el tamaño del alcorque tipo definido, se procede a calcular la cantidad mínima de alcorques a implementar en cada tramo de vía que conforma el tren de tratamiento. La cantidad de alcorques a instalar en cada tramo corresponde a la relación entre el volumen de calidad y el volumen tratado por la estructura tipo. Se determinó que se requieren 36 unidades para tratar el volumen de calidad establecido para el tren número uno y 46 unidades para el tren número dos, como se detalla en la Tabla 6-4, para cada tramo de vía la cantidad de alcorques a instalar hasta completar el total requerido por cada tren, en total para el área de estudio se requiere la construcción y operación de 82 alcorques tipo de 1.40m de ancho y 2.00m de longitud.

Tabla 6-4 Cantidad Mínima de alcorques a instalar  
Fuente: Propia

TREN DE TRATAMIENTO # 1				TREN DE TRATAMIENTO # 2			
ID	AREA TOTAL	Vc	Número de alcorques minimo	ID	AREA TOTAL	Vc	Número de alcorques minimo
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>			m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	
A11	885.83	14.32	8	A21	755.65	11.73	6
A12	667.31	10.54	6	A22	764.02	12.19	6
A13	1083.28	16.74	9	A23	848.49	13.52	7
A14	678.81	10.54	6	A24	762.29	11.94	6
A15	948.58	13.96	7	A25	594.14	9.25	5
				A26	1297.78	20.26	10
				A27	746.47	11.61	6
<b>TREN #1</b>	<b>4263.81</b>	<b>66.10</b>	<b>36</b>	<b>TREN #2</b>	<b>5768.84</b>	<b>90.50</b>	<b>46</b>

En la Ilustración 6-3, se presenta un corte típico de un tramo de vía, con la sección de calzada en el sitio donde se propone la localización de dos alcorques (uno en cada costado de la vía), así como las dimensiones para la calzada.

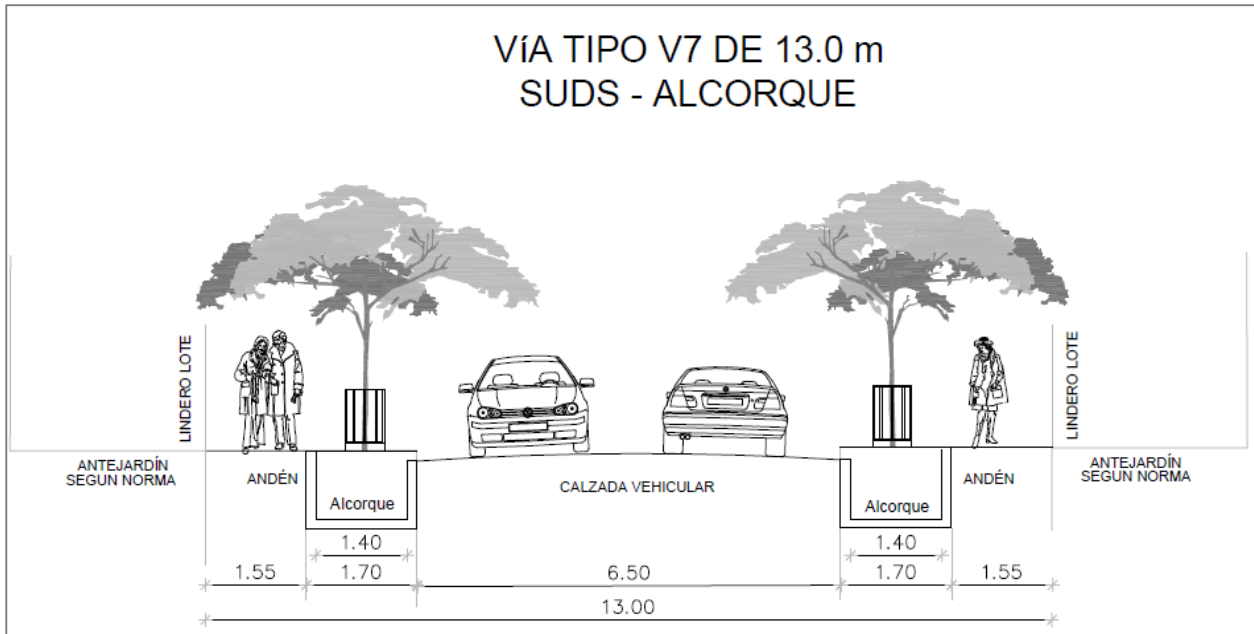


Ilustración 6-3 Sección típica de vía con implementación de Alcorques  
Fuente: Propia

#### 6.4.2.4 *Sustrato*

El sustrato debe permitir el almacenamiento y filtración de la escorrentía captada, así como permitir el crecimiento de las raíces del árbol plantado, se recomienda un porosidad del orden de 40% o superior, para lo cual debe establecerse una mezcla de suelo con las características especificadas en la Tabla 6-5, antes de la fase constructiva se requiere realizar pruebas para verificar que cumpla los parámetros mínimos de permeabilidad y porosidad establecidos, a continuación se presentan la composición recomendada del sustrato.

*Tabla 6-5 Composición del sustrato  
NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).*

<b>Componente</b>	<b>Contenido (%)</b>
Arena	60 - 70
Compost	15 - 25
Tierra vegetal	10 - 20
Contenido orgánico	0 - 12
pH	5.5 a 7.5
Porosidad	> 40

#### 6.4.2.5 *Sistema de drenaje*

La capa filtrante que separa el sustrato y la capa de drenaje (dt), debe ser de un espesor mínimo de 0.05m conformada por partículas de tamaño menor a 12.5 mm. La capa de drenaje debe tener una profundidad total entre 0.33 y 0.38 m, distribuidas con mínimo 0.15m sobre la tubería de drenaje y mínimo 0.08m en la parte inferior más la tubería perforada de diámetro de 0.10 m a 0.15m, en polietileno o pvc perforada

#### 6.4.2.6 *Cobertura vegetal asociada*

Los arboles empleados en los alcorques inundables debe presentar características en cuanto al control de aguas lluvias y ser tolerantes a contaminantes propios de la escorrentía urbana además de contar el sitio de implantación con el espacio vital requerido para su desarrollo mínimo como se indica en la Tabla 6-6 espacio requerido para el desarrollo del árbol plantado, algunas características son:

- Larga expectativa de vida
- Tasas rápidas de crecimiento
- Altas tolerancias a periodos secos
- Resistencia a contaminación en agua y aire
- Sistema radicular extenso.
- Estructura de ramificación vertical
- Corteza áspera
- Tolerancia suelos saturados
- Follaje denso

*Tabla 6-6 espacio requerido para el desarrollo del árbol plantado*

<b>Porte del árbol</b>	<b>Espacio vital</b>
Bajo	1.0 m
Medio	2.0 m
Alto	3.0 m

Para el área de estudio, considerando que se encuentra en una zona muy próxima a los cerros orientales donde la precipitación es mayor, se recomienda una especie con resistencia y adaptabilidad a cualquier condición de humedad y un porte de árbol bajo o medio, tal como el Holly espinoso (*Pyracantha coccinera*), sin embargo pueden seleccionarse otras especies vegetales que se ajusten a las recomendaciones del anexo B de la NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018).

## **6.5 DISEÑO DE TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES**

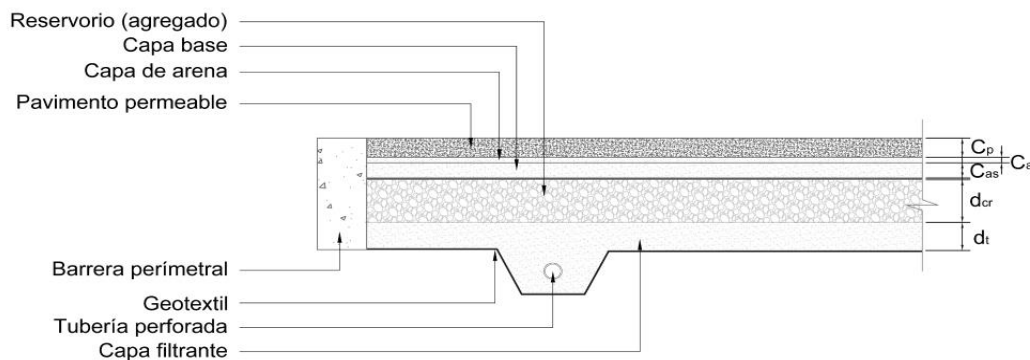
El diseño de tren de pavimentos permeables se fundamenta en la metodología recomendada por la EAB, desarrollado en Denver («Urban Drainage and Flood Control District, Denver», 2010). Los pavimentos permeables se diseñan de acuerdo al volumen de calidad del agua  $V_c$  y están basados en 3 parámetros, como se describe en la Tabla 6-7, a continuación.

*Tabla 6-7 Variables hidrológicas requeridas para el diseño de pavimentos permeables  
Fuente: (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017)*

Variable	Definición
Área tributaria (Ad)	Área que aporta escorrentía a los pavimentos permeables
Coefficiente de escorrentía (C)	Coefficiente (de 0 a 1) que representa la permeabilidad de la superficie
Profundidad de lluvia (hp)	Profundidad de precipitación de diseño específica para el sitio de implementación

### 6.5.1 Dimensionamiento

*Es importante determinar qué tipo de estructura utilizaremos ya que el diseño de los pavimentos permeables depende del tipo de infiltración seleccionada, en el caso de estudio recomendaremos la utilización de un pavimento con infiltración parcial el cual se detalla en la Ilustración 6-4, a continuación.*



*Ilustración 6-4 Perfil esquemático de un pavimento poroso con infiltración parcial  
Fuente: (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017)*

### 6.5.2 Volumen de almacenamiento requerido

En primer lugar se determina el área total de la cuenca (Ad) y el área que será usada para la instalación del pavimento permeable (As), luego se calcula la relación de impermeabilidad del área total, para lo cual (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017) recomienda que el área que la estructura ocupe sea menor al 5% del área

total de drenaje, de igual forma relaciona la forma en como debe ser calculada la relación tributaria impermeable (Rt) que se puede determinar así:

$$Rim = \frac{\sum_{i=1}^n Ai * Ci}{Ad}$$

$$Rt = \frac{(Ad - As) * Rim}{As}$$

Donde:

As = Área del pavimento permeable (m2)

Ad = Área total (m2)

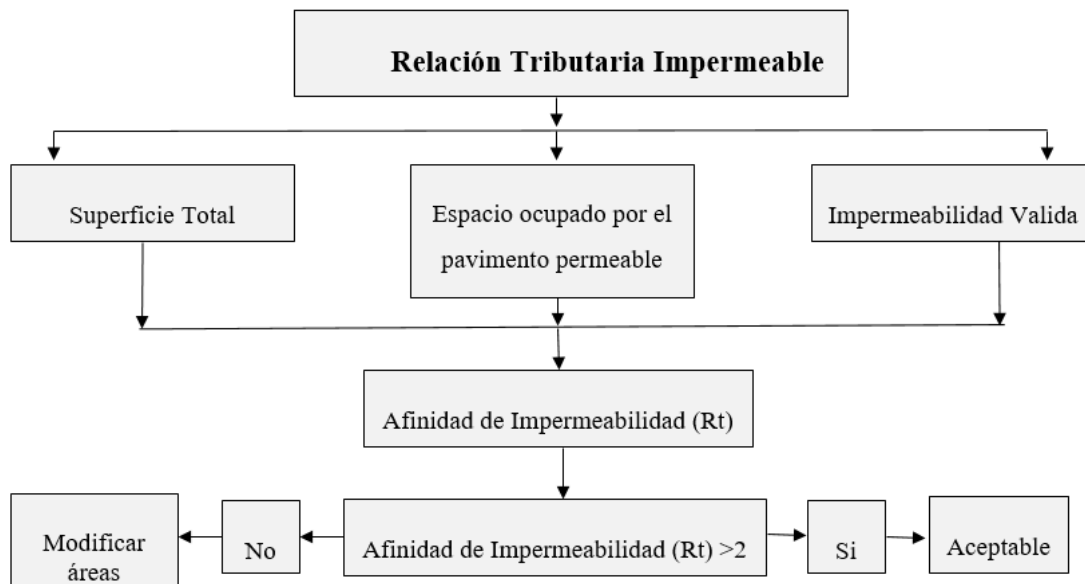
Rim = Relación de la impermeabilidad del área total

Ai = Área de drenaje sub i

Ci = Coeficiente de escorrentía sub i

Rt = Relación tributaria impermeable

Nota: Es importante saber que la relación de impermeabilidad debe ser <2, de lo contrario se debe cambiar el área total y/o área del pavimento permeable



*Ilustración 6-5 Método para determinar la Relación tributaria Impermeable  
Fuente: Propia*

### 6.5.3 Distancia entre barreras laterales

Inicialmente se debe fijar unas longitudes entre barreras laterales, las cuales su principal función es la de servir como obstáculo que permitan almacenar el agua y garantizar que este volumen de agua no regrese a la superficie, la (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017), recomienda que la distancia entre barreras laterales debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$Lbd = \frac{2Vc}{Sf * As * ncr}$$

Donde:

$Lbd$  = Longitud entre barreras laterales (m)

$Sf$  = Pendiente del reservorio (m/m)

$Vc$  = Volumen de diseño ( $m^3$ )

$As$  = Área del pavimento ( $m^2$ )

$ncr$  = Porosidad del reservorio (%).

Por otra parte, se recomienda una profundidad mínima del reservorio de 15 cm; se debe determinar la porosidad teniendo en cuenta las propiedades del material que se elija para la capa de rodadura de nuestro pavimento permeable. Así pues, se calcula el volumen provisto a partir del reservorio por medio de la siguiente ecuación, es importante acotar que el volumen provisto a partir del reservorio debe ser mayor al volumen que se desea tratar.

$$V = ncr * (dcr * \frac{Sf * Lbd}{2} - dl) * As$$

Donde:

$V$  = Volumen provisto a partir del reservorio ( $m^3$ )

$Sf$  = Pendiente del reservorio (m/m)

$Lbd$  = Longitud entre barreras de flujo lateral (m)

$dcr$  = Profundidad del reservorio (m)

$As$  = Área del pavimento ( $m^2$ )

$dL$  = Profundidad del borde libre (m) = 0,0254

$ncr$  = Porosidad del reservorio



#### 6.5.4 Salida

Para pavimentos con infiltración parcial o sin infiltración, se calcula el diámetro de una tubería perteneciente a una sección de salida o un vertedero de excesos. Éste se obtiene para un tiempo de drenaje igual a 12 horas. Aunque la metodología no incluye el cálculo de la profundidad de la capa filtrante, es importante resaltar que esta profundidad depende de condiciones específicas de la zona y debe establecerse de acuerdo con las cargas sobre el pavimento. No obstante, según el material que conforme la capa filtrante, existen algunas profundidades recomendadas, por ejemplo, para una capa de arena se utilizan aproximadamente 15 cm, para arena de peña lavada hasta 20 cm de profundidad y para piedra triturada basta con una capa de 5 cm. Por otra parte, con respecto a la capa de drenaje en la que se ubican las tuberías perforadas, es recomendable utilizar 8 cm debajo de la tubería y 15 cm arriba de ésta, para favorecer la estabilidad de la tubería. (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017)

#### 6.5.5 Dimensionamiento del tren de tratamiento

El dimensionamiento corresponde al pavimento permeable propuesto para la zona de estudio y la principal función de este pavimento es el infiltrar la escorrentía del área de interés y así reducir los picos de escorrentía, esto se logra almacenado de manera temporal una cantidad de agua dentro de la estructura, gracias a sus cualidades permeables, como ya se había definido anteriormente la estructura propuesta posee una infiltración parcial ya que es una vía el lugar donde se recomienda instalarse. Según la topografía del lugar y mediciones de campo se determinan las pendientes, de igual forma se pretende garantizar que el volumen almacenado por el pavimento sea superior al volumen de calidad  $V_c$

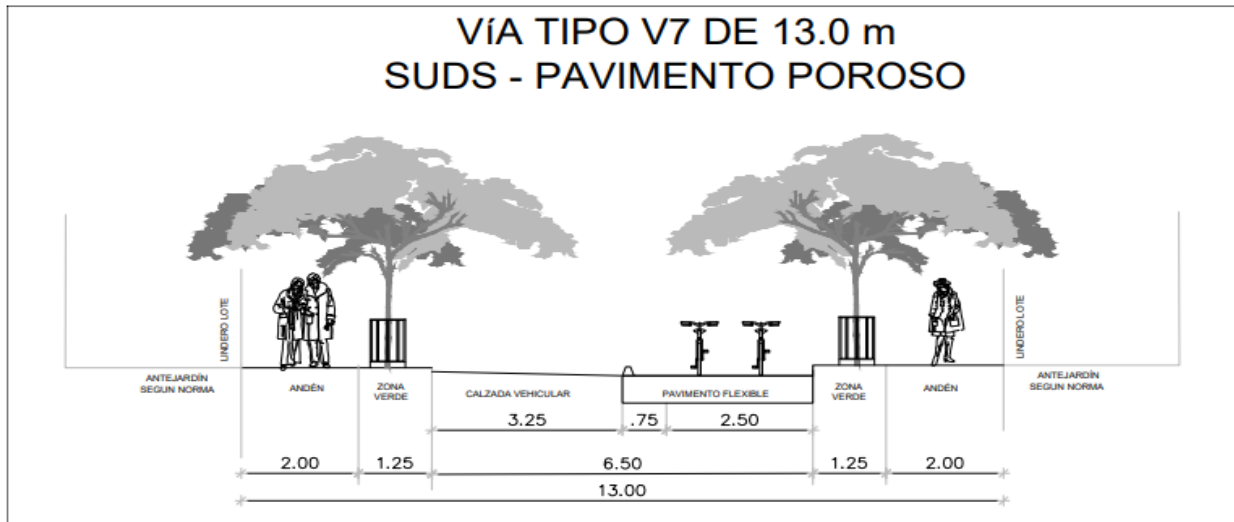
#### 6.5.6 Parámetros de diseño

Los parámetros más relevantes al momento del dimensionamiento del pavimento poroso fueron el área del pavimento, la profundidad y porosidad del reservorio.

## 6.6 TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES PARA LA ZONA DE ESTUDIO

### 6.6.1 Perfil Vial propuesto para la zona de estudio

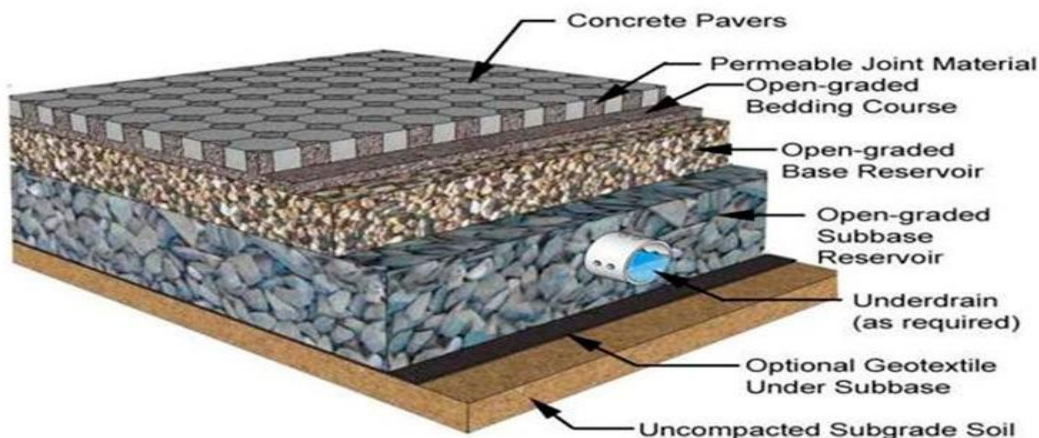
En la Ilustración 6-6, se presenta el perfil vial propuesto para la zona de estudio, el cual corresponde al reemplazo de uno de los carriles de tráfico mixto existente en el sector por un bici carril, de forma que se promueva la pacificación del tráfico y la movilidad sostenible en el sector.



*Ilustración 6-6 Perfil vial propuesto para la implementación del Pavimento Poroso  
Fuente: Propia*

### 6.6.2 Esquema ilustrativo de la sección de análisis

En la Ilustración 6-7 se presenta un esquema típico del pavimento permeable propuesto para el área de estudio, donde se ilustran los principales componentes de la estructura y el drenaje para garantizar la evacuación del volumen almacenado.



*Ilustración 6-7 Sección tipo de 3.25 m x 10 m*  
*Fuente: (solestudios, Ingeniería de consulta, 2014)*

*Tabla 6-8 Parámetros de diseño para el Tren de Pavimentos Permeables N° 1*  
*Fuente: Propia*

VARIABLE	UNIDADES	VALOR
Área Total (Ad)	m <sup>2</sup>	4263.81
Altura de la lluvia (hp)	mm	22.10
Volumen de Calidad (Vc)	m <sup>3</sup>	66.10
Tipo de Infiltración	-	Parcial
Tipo de capa de rodadura	-	Concreto Permeable
Área del Pavimento permeable (As)		32.5
Profundidad del reservorio (dcr)	m	0.30
Porosidad (ncr)	-	0.4
Pendiente del terreno (Sp)	m/m	0.03
Pendiente en la base del reservorio (Sf)	m/m	0.03
Longitud entre las barreras de flujo lateral (Lbd)	m	10
Distancia de la elevación más baja al volumen de almacenamiento (dct)	m	0.1

*Tabla 6-9 Resultados para el Tren de Pavimentos Permeables N° 1*  
*Fuente: Propia*

VARIABLE	UNIDADES	VALOR
Impermeabilidad efectiva (Im <sub>e</sub> )	-	70.12
Relación de impermeabilidad del area total (R <sub>im</sub> )	-	0.70
Relación tributaria impermeable (R <sub>t</sub> )	-	91.29
Condición de porosidad	-	Cumple
Condición longitud entre barreras	-	Cumple
Longitud máxima entre barreras (Lb <sub>max</sub> )	m	103
Diámetro del orificio para un tiempo de drenaje de 12 horas (Do)	in	0.97
Volumen provisto a partir del reservorio (V)	m <sup>3</sup>	<b>1.62</b>

### 6.6.3 Resultados de diseño de los pavimentos permeables

Para el diseño de los pavimentos permeables se utilizó la hoja de cálculo de la (Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogotá D.C, 2017) (ver Anexo 2), como resultado de la implementación de esta hoja de cálculo, bajo los parámetros establecidos según la zona de estudio relacionados en la Tabla 6-8, se obtuvo que para un pavimento permeable de sección típica de 3.25 m de ancho y 10.00 m de longitud, el volumen de tratamiento para cada reservorio (v) de 1.62 m<sup>3</sup>, con base en este resultado se puede determinar que para el tren de pavimentos permeables N° 1 se requieren 40.8 estructuras tipo como la citada en la Ilustración 6-7 Sección tipo de 3.25 m x 10 m, y para el tren de pavimentos N° 2 el cual tiene un (Vc) de 90.50 m<sup>3</sup> es necesario la implementación de 55.9 estructuras de pavimento permeable como la citada en la Ilustración 6-7 Sección tipo de 3.25 m x 10 m

Como no es posible instalar las estructuras requeridas para tratar todo el volumen de calidad, esto debido a que la longitud de vía no es la suficiente para cumplir este requerimiento, por lo cual en la Tabla 6-10 se describe el volumen tratado con base en la longitud de vía disponible.

*Tabla 6-10 Volumen tratado*  
*Fuente: Propia*

<b>TREN DE SUDS</b>	<b>VOLUMEN DE CALIDAD (Vc)</b>	<b>LONGITUD DE VIA DISPONIBLE</b>	<b>VOLUMEN TRATADO</b>	<b>% TRATADO</b>
TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES N° 1	66.10 m <sup>3</sup>	238.6 m	38.65 m <sup>3</sup>	<b>58.4%</b>
TREN DE PAVIMENTOS PERMEABLES N° 2	90.50 m <sup>3</sup>	365,21 m	59.3 m <sup>3</sup>	<b>65.5%</b>

## **6.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS TIPOLOGÍAS SUDS**

En la Tabla 6-11 se presentan los resultados obtenidos para los alcorques inundables, y en la Tabla 6-12 los resultados de los pavimentos permeables para cada uno de los trenes de tratamiento analizados, donde se muestra el número de estructuras a instalar en el área de estudio teniendo en

cuenta el espacio disponible, así como la relación entre el volumen tratado y el volumen de calidad requerido (% de tratamiento).

*Tabla 6-11 Resumen de diseño de los alcorques inundables*

*Fuente: Propia*

ID	Alcorques inundables						
	AREA TOTAL	Long. Total	Vc	# estructuras	Área superficial	Volumen tratado	% de tratamiento
	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>		m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	
TREN #1	4264	238.61	66.10	36	100.80	73.44	111%
TREN #2	5769	365.21	90.50	46	128.80	93.84	104%

*Tabla 6-12 Resumen de diseño de los pavimentos permeables*

*Fuente: Propia*

ID	Pavimentos permeables						
	AREA TOTAL	Long. Total	Vc	# estructuras	Área superficial	Volumen tratado	% de tratamiento
	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>		m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	
TREN #1	4264	238.61	66.10	24	775.48	38.65	58.5%
TREN #2	5769	365.21	90.50	37	1186.93	59.30	65.5%

La tipología que presenta mejores características para su implementación en el área de estudio corresponde a los alcorques inundables, su selección se fundamentó en que el área disponible para la construcción de los pavimentos permeables no posee la capacidad para tratar el volumen de calidad establecido. Adicionalmente por ser un área consolidada es importante mantener la menor afectación a la estructura existente, ítem en el cual los alcorques requieren un máximo de intervención de 2.4% del área a tratar, mientras que los pavimentos requieren intervenir cerca del 20% del área a tratar con los SUDS, como se muestra en la Tabla 6-13.

*Tabla 6-13 Comparación Alcorques – Pavimentos permeables*

*Fuente: Propia*

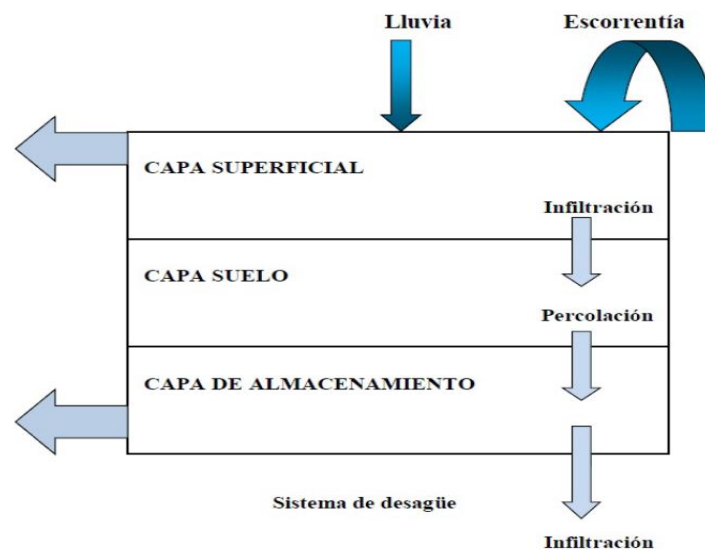
ID	AREA TOTAL	% de tratamiento	Área superficial	% del área total	% de tratamiento	Área superficial	% del área total
	m <sup>2</sup>		m <sup>2</sup>			m <sup>2</sup>	
TREN #1	4264	111%	100.80	2.4%	58.5%	775.48	18.2%
TREN #2	5769	104%	128.80	2.2%	65.5%	1186.93	20.6%

## 7 MODELACIÓN DE LOS SUDS

La modelación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) se realizó en el programa Storm Water Management Model (SWMM) versión 5.1 (US EPA, 2014), con el modulo LID (Low impact development) con el objetivo de establecer el grado de impacto de cada una de las tipologías diseñadas previamente, siguiendo los lineamientos de la NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018), para diseño de los alcorques inundables y pavimentos permeables, a implementar en el área de estudio.

### 7.1 HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN LID

Las herramientas de modelación de estructuras LID (Low impact development), se incluyeron en la versión 5 del programa SWMM, y corresponden a una combinación de capas verticales con propiedades especiales, que permiten simular el comportamiento hidráulico de diferentes tipologías de SUDS, el esquema típico de los LID'S se presenta en la Ilustración 7-1, donde se muestra las tres capas principales en las que se ha dividido esquemáticamente para la modelación, sin embargo en función de la tipología, una o más pueden no requerirse para su representación en el modelo matemático.



*Ilustración 7-1 Diagrama conceptual de las estructuras LID*

*Fuente: (Jiménez & Joya, 2015)*

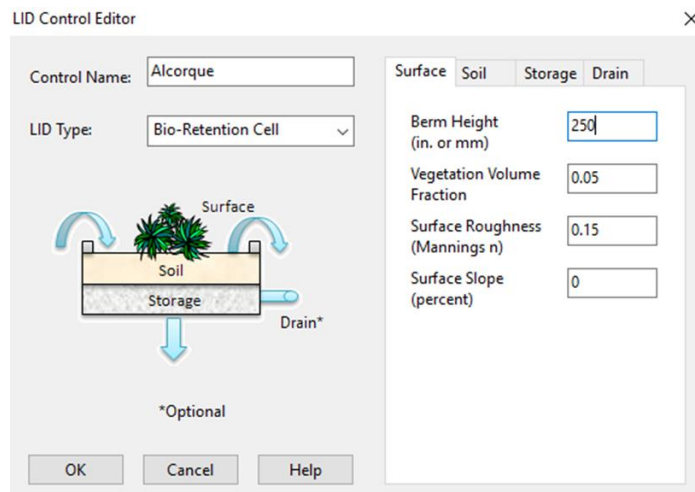
### 7.1.1 Parámetros para modelación LID

Para la modelación de las estructuras LID, dentro del programa SWM, se requiere dos fases. La primera es la definición de la estructura LID, dentro de la cual se asigna la tipología que se desea modelar y las propiedades de cada una de las capas verticales que la conforman, se pueden tener varias tipologías en un mismo modelo y asignadas a una misma cuenca; la segunda fase corresponde a la asignación de cada una de las tipologías a las cuencas de drenaje, se pueden asignar varias tipologías en función del porcentaje del área que se espera cada tipología trate efectivamente.

El primer paso para modelar los LID's, es definir su estructura típica (capas verticales) para un área unitaria, definiendo de éste modo el comportamiento hidráulico de la estructura. A continuación se explica el proceso y las características incluidas al modelo para representar los alcorques inundables y los pavimentos permeables. Para definir cada una de las tipologías a modelar se ingresa por la herramienta "LID controls" en la sección de hidrología, y se definen las características requeridas por cada tipo de estructura LID.

#### ***7.1.1.1 Alcorques***

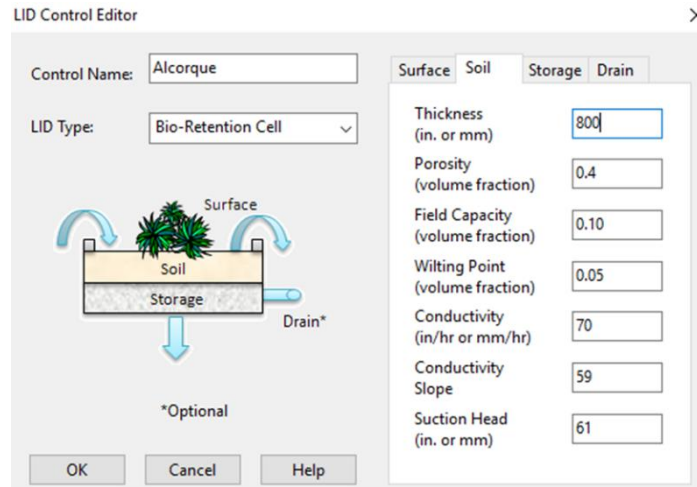
Los alcorques inundables se modelan como celdas de bío-retención (Bio-retention cell) y requieren información de la superficie, capa de suelo, almacenamiento y sistema de drenaje. Las unidades para la modelación dependen del sistema de unidades global del proyecto, para sistema inglés se ingresarán datos en pulgadas y para sistema internacional (LPS) se ingresarán las dimensiones en milímetros. Para la capa que define la superficie del alcorque, se requiere la máxima profundidad de encharcamiento, la fracción de volumen ocupada por la capa vegetal, la rugosidad y la pendiente superficial, como se muestra en la Ilustración 7-2. Para modelar los alcorques inundables, se estableció previamente el dimensionamiento de la estructura tipo a implementar en el área de estudio, que establece una profundidad de encharcamiento máxima de 250 milímetros (mm), la rugosidad y fracción de volumen ocupada por la vegetación se establece según las recomendaciones del programa SWMM (US EPA, 2014).



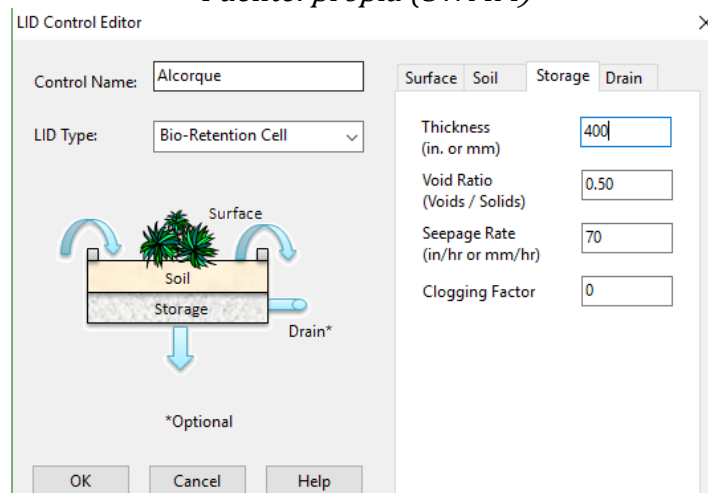
*Ilustración 7-2 Parámetros LID, Superficie de los alcorques.  
Fuente: propia (SWMM)*

La siguiente capa a definir corresponde a la representación del sustrato del alcorque, que es la mezcla de materiales que permite filtrar el volumen de tratamiento, y conducirlo hasta la capa de inferior de almacenamiento y drenaje. Ésta capa se diseñó con un espesor de 800 mm, porosidad mínima de 40% y una conductividad mínima de 70 mm/hora, siguiendo las recomendaciones de la NS-166 (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2018). Los valores para conductivity slope y suction head, se tomaron como referencia del manual de SWMM (US EPA, 2014), el primero se encuentra en un rango entre 30 y 60 u se puede definir en función del tamaño de grano de la capa de suelo como  $0.48(\% \text{ de arena}) + 0.85 (\% \text{ de finos})$  y para el segundo, establece un valor típico de 2.4 pulgadas para la arena arcillosa (61 mm), los parámetros para la modelación se muestran en la Ilustración 7-3, a continuación.





*Ilustración 7-3 Parámetros LID, Sustrato del alcorque.  
Fuente: propia (SWMM)*



*Ilustración 7-4 Parámetros LID, capa de almacenamiento del alcorque.  
Fuente: propia (SWMM)*

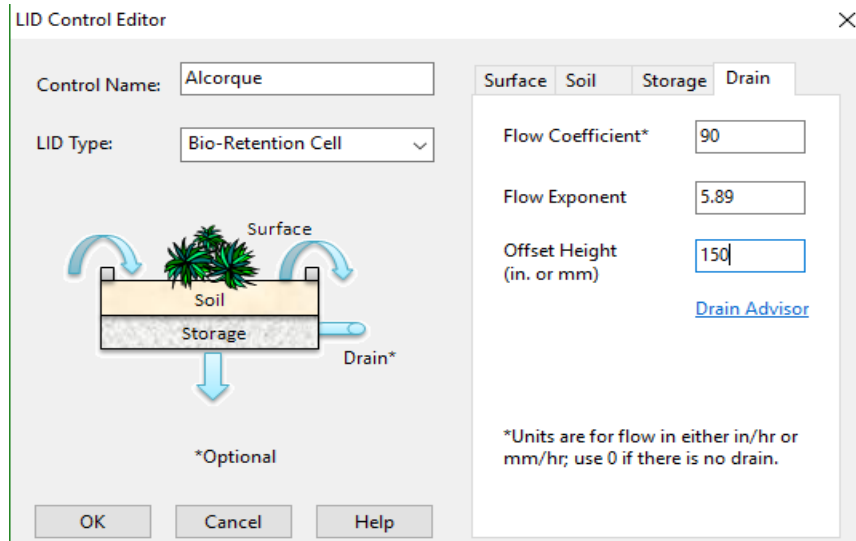
La tercera capa para modelar el comportamiento de los alcorques corresponde a la capa de almacenamiento, para la cual se estableció en el diseño, previamente, una profundidad total de 400mm, con un porcentaje de vacíos de 50%, y una tasa de infiltración de 70 mm/h, como se muestra en Ilustración 7-4. El factor de colmatación (clogging factor) permite conocer la pérdida de capacidad con el tiempo de la capa de almacenamiento, y es útil para establecer rutinas de mantenimiento, sin embargo éste análisis no se encuentra enmarcado en el alcance de la modelación, razón por la cual se estableció como cero.

Los parámetros de drenaje para el alcorque se establecieron según las recomendaciones dadas por el manual de SWMM (US EPA, 2014), el coeficiente de flujo establece el porcentaje máximo de agua captada por el alcorque que se espera sea drenado al sistema de descarga (el restante será infiltrado), el exponente de flujo se puede definir como 0.5 para un orificio de descarga, o calculado con la siguiente expresión en función del tiempo de drenaje y la profundidad máxima de la lámina de agua sobre la tubería de drenaje del alcorque.

$$\text{Flow exponent} = \frac{2 * (\text{Prof. máxima [mm]})^{1/2}}{\text{Tiempo de drenaje [horas]}}$$

$$\text{Flow exponent} = \frac{2 * (1250\text{mm})^{1/2}}{12 \text{ horas}} = 5.89$$

Y el parámetro offset height corresponde a la altura desde el fondo a la cual se localiza en drenaje, que siguiendo lo establecido en el diseño es de 150 mm, como se indica en la Ilustración 7-5, a continuación.



*Ilustración 7-5 Parámetros LID, drenaje del alcorque.  
Fuente: propia (SWMM)*

### 7.1.1.2 Pavimentos porosos

Las estructuras de los pavimentos permeables se definen de la misma forma que los alcorques, mediante la opción “LID Control Editor”, allí se selecciona el tipo pavimento permeable, que está conformado por cinco capas: superficie, pavimento, suelo (capa opcional), almacenamiento y drenaje. La capa de superficie requiere la altura de la berma, definida como 150mm, la fracción ocupada por la vegetación, el coeficiente de rugosidad del pavimento poroso y la pendiente del terreno, como se muestra en la Ilustración 7-6. La segunda capa para definir la estructura, corresponde a la capa de pavimento con un espesor típico entre 100 y 150mm, una relación de vacíos que oscila entre el 12% y el 21%; se define que porción de la superficie del pavimento es impermeable, la permeabilidad de la capa y el factor de factor de capacidad de carga, las características de la capa de pavimento se muestran en la Ilustración 7-7. La siguiente capa corresponde a la capa de suelo, sin embargo ésta capa es opcional o depende del diseño específico del pavimento permeable, el caso de estudio la estructura de pavimento típica no contempla una capa de suelo intermedia, la forma de no considerarla es asignando a la capa una altura de cero.

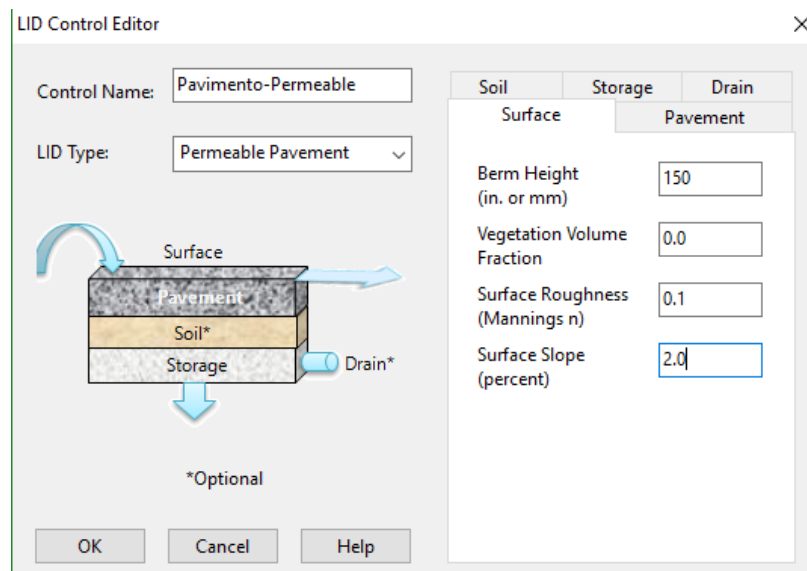
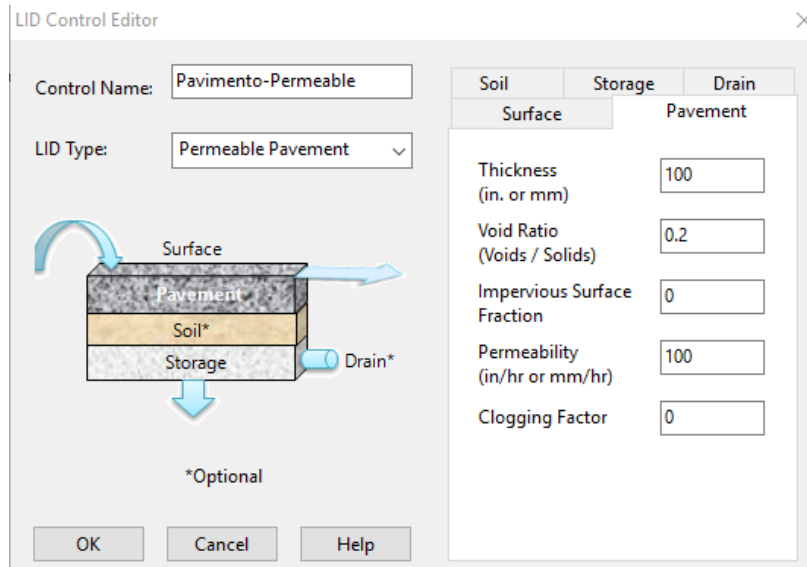
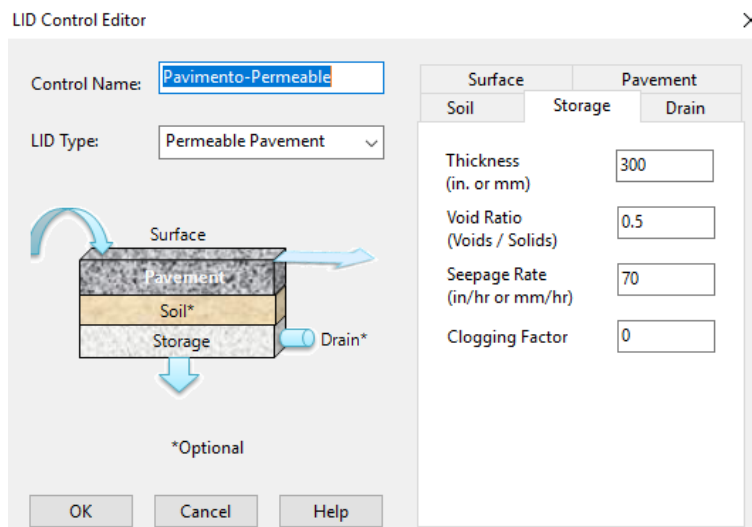


Ilustración 7-6 Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso  
Fuente: propia (SWMM)



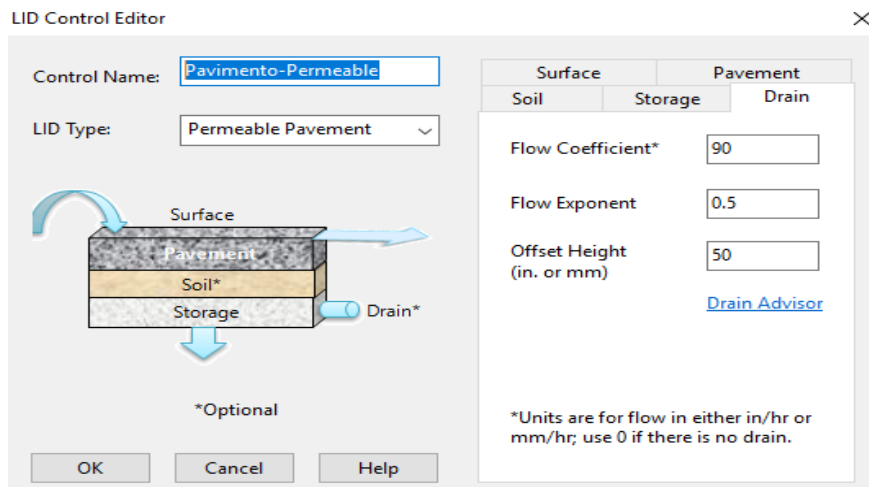
*Ilustración 7-7 Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso  
Fuente: propia (SWMM)*

La capa de almacenamiento corresponde al volumen de material poroso, tipo grava, arena o similar dispuesto en la parte baja del pavimento para almacenar el volumen de tratamiento. Para el cual se definió una altura total de 300mm según las restricciones de la NS-166, una relación de vacíos de 50% una tasas de infiltración de 70 mm/h y un factor de obstrucción de cero, como se indica en la Ilustración 7-8, a continuación.



*Ilustración 7-8 Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso  
Fuente: propia (SWMM)*

El coeficiente de flujo establece el porcentaje máximo de agua captada por el pavimento que se espera sea drenado al sistema de descarga (el restante será infiltrado), el exponente de flujo se puede definir como 0.5 para un orificio de descarga, como es el la salida de la estructura de pavimento, y el parámetro offset height corresponde a la altura desde el fondo a la cual se localiza en drenaje, que siguiendo lo establecido en el diseño es de 50 mm, como se indica en la Ilustración 7-9, a continuación.

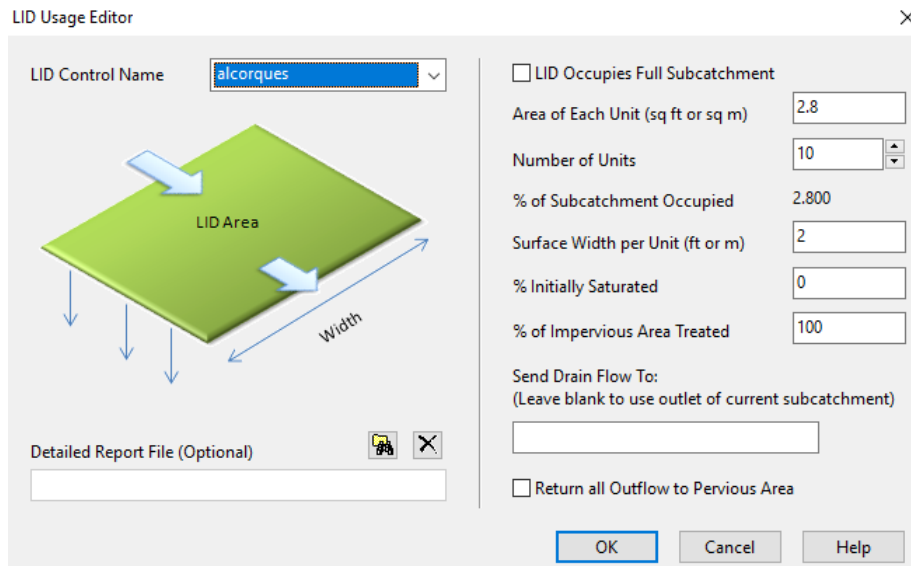


*Ilustración 7-9 Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso  
Fuente: propia (SWMM)*

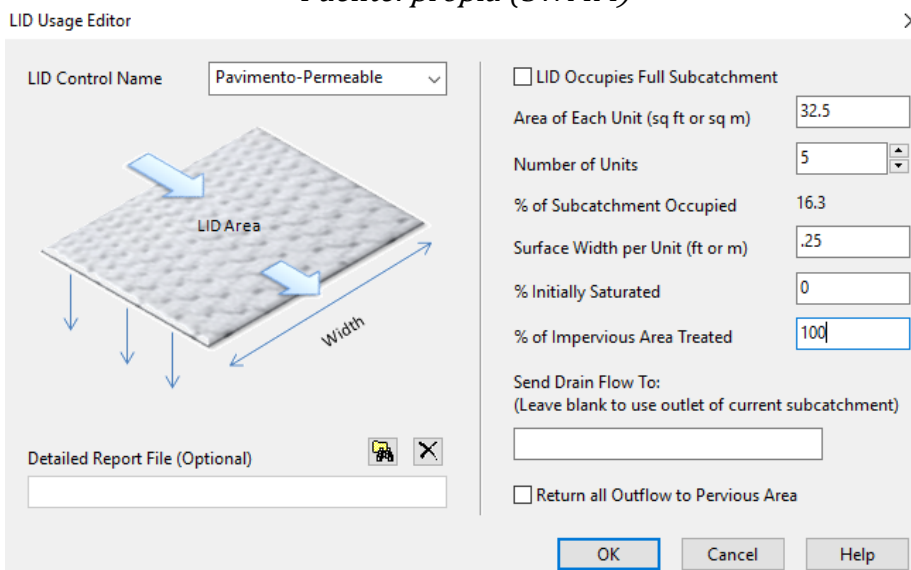
### 7.1.2 Asignación de las estructuras LID's a las cuencas de drenaje

La asignación de las estructuras LID a las cuencas de drenaje se realiza en las propiedades de cada una de las cuencas en las que se localizan, asignándolas en la propiedad "LID controls". En función de la conformación de diseño de cada tipología de estructuras, se puede definir una estructura típica y la cantidad de éstas que se distribuirán por la cuenca de drenaje, o indicar que la totalidad de la cuenca está compuesta por una estructura LID; para las estructuras típicas, se establece un ancho de superficie, una saturación inicial y el porcentaje del área impermeable que se está tratando, así como definir el punto de descarga de la estructura, que puede ser el mismo definido para la cuenca, regresar al área permeable o un nodo diferente al definido para la cuenca, la configuración típica para los alcorques se muestra en la Ilustración 7-10 y para los pavimentos porosos en la Ilustración 7-11. Se repite el proceso para todas las cuencas donde se instalan

estructuras de SUDS, que se van a incluir en la modelación, variando la cantidad alcorques a instalar para el caso de los alcorques en función de la cantidad requerida para tratar el volumen de calidad; y para el caso de los pavimentos permeables, la restricción física de la longitud de la calle en la cual se implantará, representa la limitante para establecer el número de unidades.



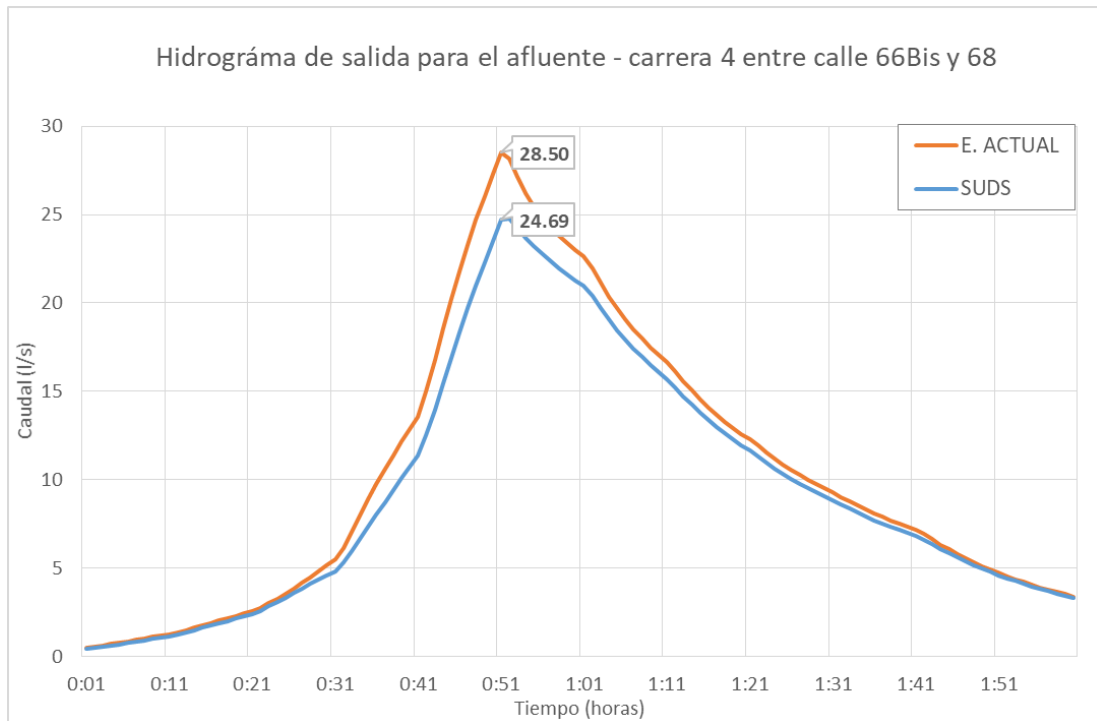
*Ilustración 7-10 Asignación de LID a la cuenca - alcorques*  
Fuente: propia (SWMM)



*Ilustración 7-11 Asignación de LID a la cuenca – Pavimentos permeables*  
Fuente: propia (SWMM)

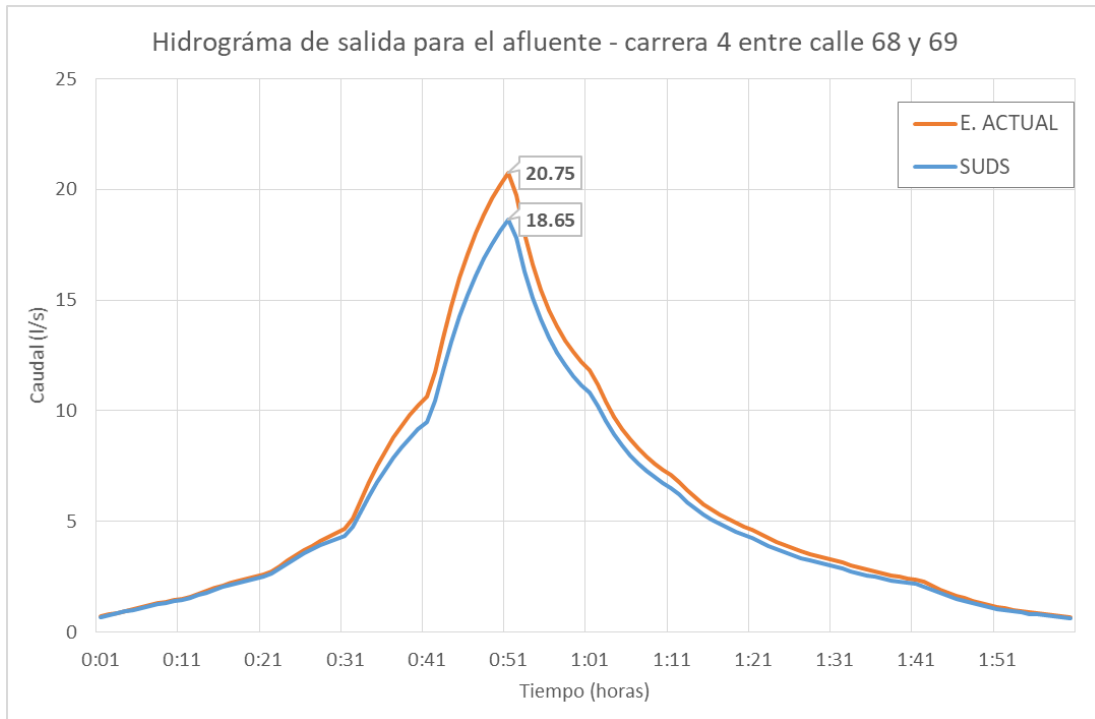
## 7.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

La modelación de las estructuras LID en el programa SWMM, evaluando los colectores inmediatamente después del descole de cada área de tratamiento al sistema de alcantarillado existente, arrojan una reducción en el caudal pico de escorrentía, como se muestra en las Ilustración 7-12 a Ilustración 7-17, en las cuales se presentan los hidrográmas de salida de cada uno de los afluentes al sistema principal. Se evidencia una reducción de caudal que varía entre el 3% y 17% del caudal pico, siendo el porcentaje más importante de reducción el que se da en las cuencas con áreas afluentes más pequeñas, donde el porcentaje de área intervenida con relación a la microcuenca de aporte es más significativo. El porcentaje de reducción más importante de caudal punta, se evidencia en la Ilustración 7-15, donde la disminución efectiva es de 4.62 l/s, lo que representa el 17.6% del total generado por el área de aporte de 8360 m<sup>2</sup>.

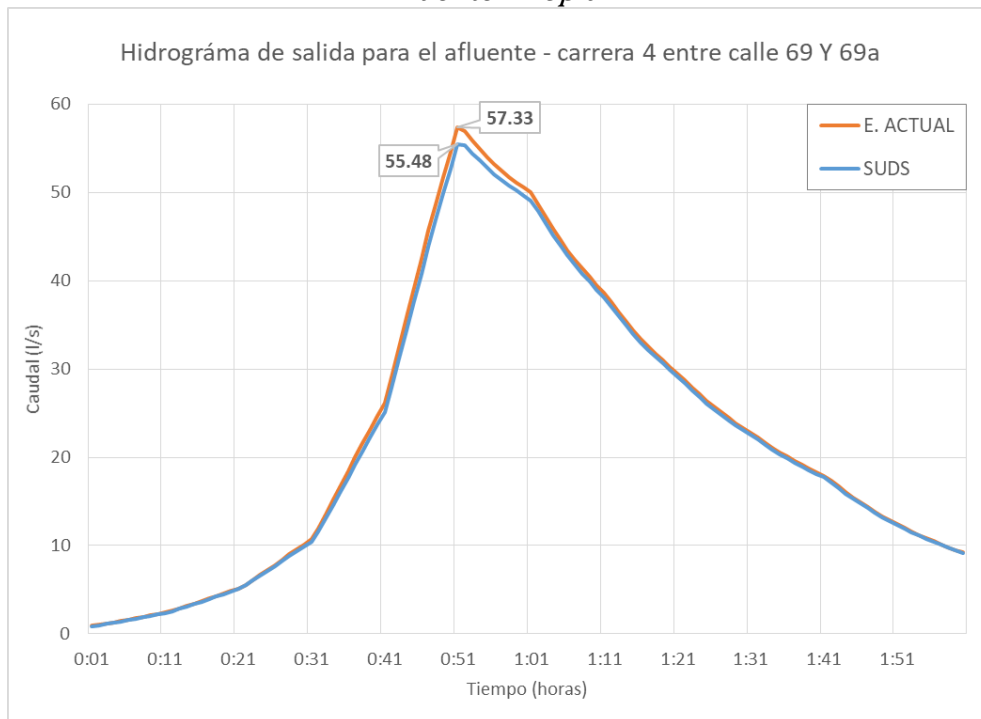


*Ilustración 7-12 comparación caudal pico SUDS vs Estado actual*

*Fuente: Propia*

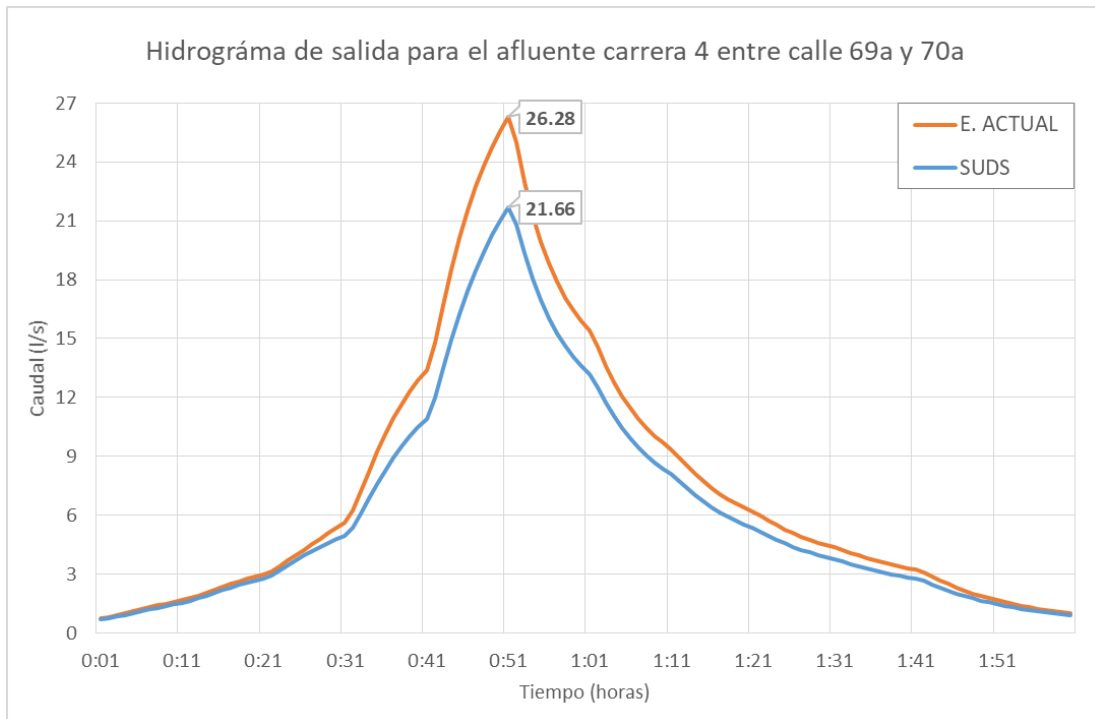


*Ilustración 7-13 comparación caudal pico SUDS vs Estado actual*  
*Fuente: Propia*

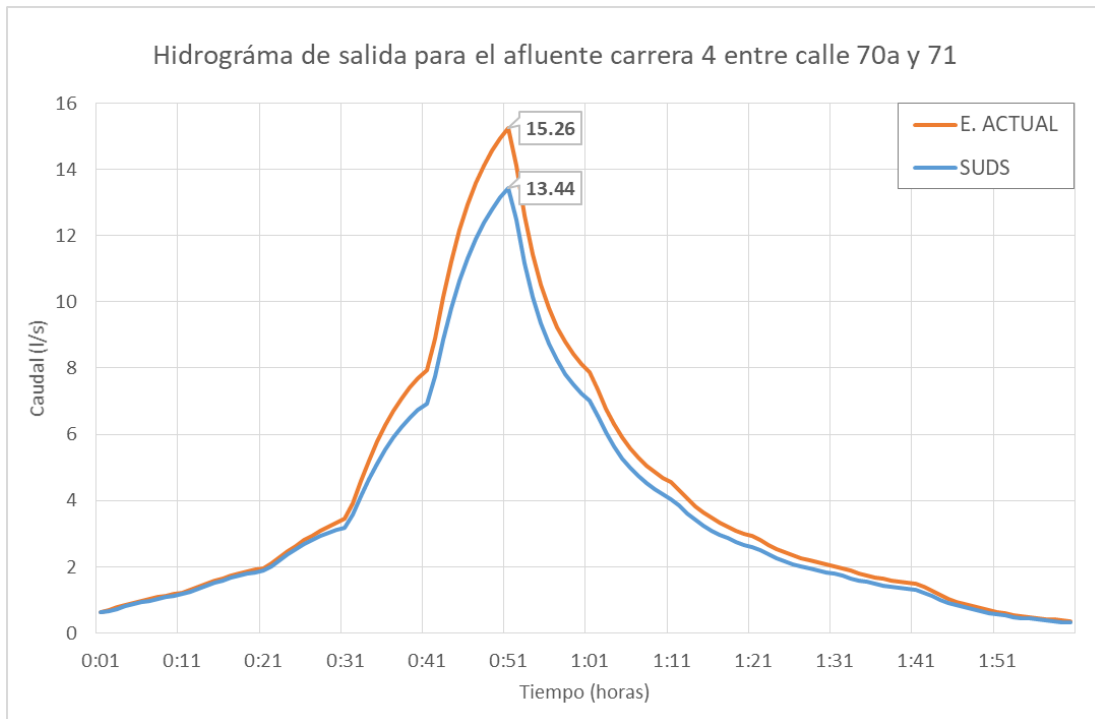


*Ilustración 7-14 comparación caudal pico SUDS vs Estado actual*  
*Fuente: Propia*



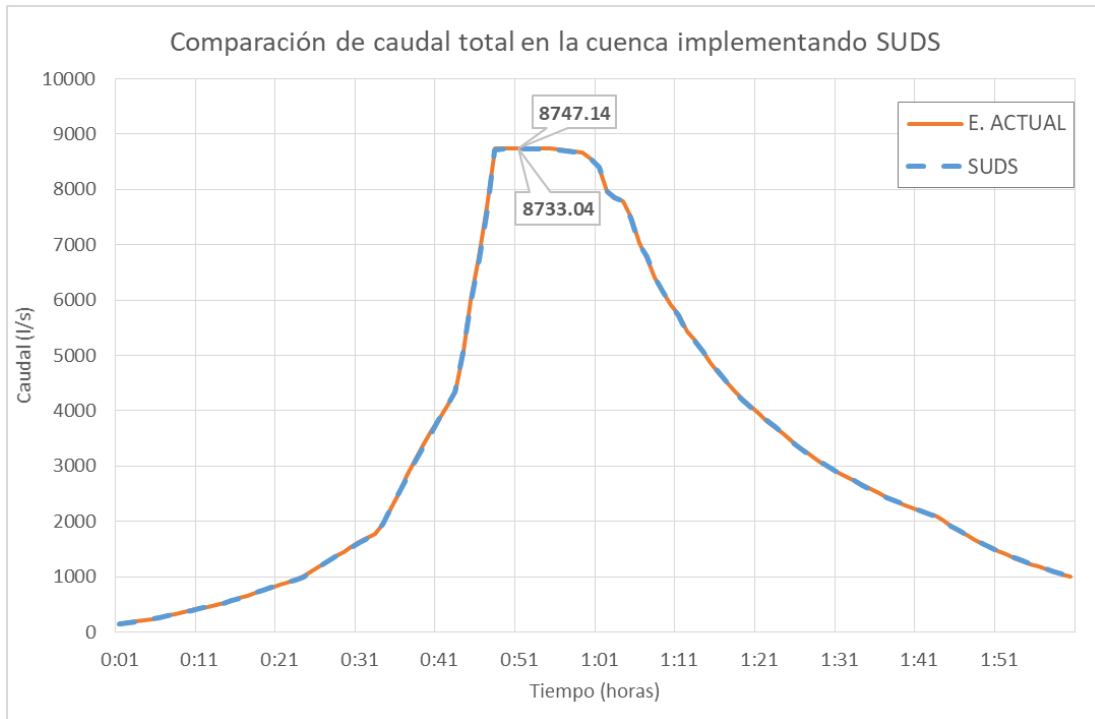


*Ilustración 7-15 comparación caudal pico SUDS vs Estado actual*  
*Fuente: Propia*



*Ilustración 7-16 comparación caudal pico SUDS vs Estado actual*  
*Fuente: Propia*

El análisis del porcentaje de reducción del caudal pico para el área total de la cuenca, da como resultado una disminución de 0.2% del caudal total (ver Ilustración 7-17), sin embargo es importante acotar que el área de la cuenca de drenaje del colector en el punto de descarga de las estructuras tipo SUDS, tiene conectadas aguas arriba la quebrada La Vieja y la quebrada Rosales, que combinadas alcanzan un área de aporte de 410 hectáreas, generando un caudal combinado de 8.75 m<sup>3</sup>/s, mientras que el área en la cual se implantaron las tipologías de SUDS tiene un área total de 1 hectárea.



*Ilustración 7-17 comparación caudal pico SUDS vs Estado actual*  
*Fuente: Propia*

Para mayor detalle de la modelación hidráulica, se presenta en el Apéndice 3 Modelación de los SUDS, con los modelos EPA SWMM, según los lineamientos para modelación de la EAB.

## 8 CONCLUSIONES

Durante la primera fase del proyecto perteneciente a la recopilación de la información, se obtuvieron los shapes pertenecientes al sistema de redes de alcantarillado sanitario y alcantarillado pluvial de la EAB de toda Bogotá, con los cuales fue posible construir la topología y realizar el diagnóstico del sistema de redes combinadas las cuales pertenecerían a los puntos de descoles de los trenes de SUDS (Alcorques y pavimentos porosos), bajo las anteriores condiciones se realizó el modelo hidráulico de las redes teniendo en cuenta a hidrología de las cuencas quebrada La Vieja y quebrada Los Rosales, las cuales aportan el 70% del caudal al colector principal.

Teniendo en cuenta los anterior , la red de alcantarillado objeto de estudio pertenece a un sistema de redes combinado compuesto en su totalidad por tubería en mampostería cuyo diámetro viario entre 0.20 m y 1.7m, teniendo en cuenta la modelación hidráulica realizada, se puede deducir que el 61% de los tramos pertenecientes al sistema no cumplen con la condición de capacidad de llenado, pues excede el valor permitido por la norma y pone en riesgo la integridad de la tubería existente y la hidráulica de la misma, hay que tener en cuenta que la modelación de la red se realizó en aproximadamente 2 km de red y los tramos con déficit de capacidad son aguas abajo del sistema hecho que da pie a considerar que el sistema en su totalidad está funcionando a tubo totalmente lleno por lo que necesita o aumentar la capacidad o implementar estructuras que permitan reducir el caudal en el sistema convencional y mejorar el comportamiento en el sistema. Adicionalmente, se encuentra que el 34% de los tramos pertenecientes al sistema no cumplen con la condición de velocidad, pues alguno de los tramos tiene rango de velocidades entre 5.44m/s y 8.91m/s superando los valores permitidos por la norma estas velocidades radican en el hecho de que las pendientes de la vía donde se encuentran los afluentes son altas y ninguno de los pozos posee cámaras de caída que permitan disminuir la pendiente y aumentar la capacidad de los mismos

Los SUDS conforman un grupo de nuevas tecnologías que buscan adelantarse a la aparición de problemas de inundaciones, con el fin de que sean mitigadas desde su origen, empleando procesos de infiltración, almacenamiento y conducción, disminuyendo los caudales pico generados por los procesos de urbanización tradicional en la que se impermeabiliza la gran mayoría del área disponible, y se requiere de estructuras de gran envergadura para su conducción mediante sistemas de alcantarillado tradicional.

En el aspecto hidráulico los SUDS tipo alcorques inundables y pavimentos porosos tiene un funcionamiento similar: captación directa de la escorrentía superficial, capa de tratamiento y o almacenamiento temporal y un sistema de descarga que puede ser mediante infiltración, retorno al sistema de alcantarillado o una combinación, sin embargo, según las restricciones de construcción, se requiere de una infraestructura de mayor tamaño para realizar el tratamiento con pavimentos porosos que con alcorques, y su funcionalidad se ve muy limitada por las pendientes del terreno y las grandes áreas de aporte. Para el caso de estudio, se determinó que es más adecuada la implementación de alcorques inundables, debido principalmente a que los pavimentos porosos instalados en la totalidad de un carril del área de estudio, no alcanza la suficiente capacidad para tratar el volumen de calidad mínimo establecido.

Las características de amenidad con el entorno es un factor importantes a considerar en zonas consolidadas como el caso de Chapinero, aun cuando las estructuras de pavimento permeable, una vez instaladas sirven como zona de tránsito para ciclo rutas o peatonales, su implementación requiere la intervención de una calzada en la totalidad de la longitud disponible, para construir la estructura del pavimento permeable, ésta intervención mucho más extensiva que los alcorques, que se localizan en los andenes reemplazando las zonas verdes existentes o lugares con andenes sin otro uso específico, tales como accesos, y genera mucho menos traumatismo para la amenidad del sector, durante su fase constructiva.

De igual forma en el desarrollo del presente trabajo se pudo determinar que los sistemas convencionales de alcantarillado son deficientes ante la demanda urbanística de la ciudad, lo que

conlleva a buscar nuevas alternativas que brinden solución a la problemática de inundaciones y los SUDS son una herramienta eficaz que conlleva a brindar una solución duradera, la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en una ciudad como Bogotá D, C es una excelente propuesta en cuanto a manejo de esorrentía y adicionalmente como alternativa que aumenta el valor del entorno paisajístico, sin embargo como una desventaja, para las tipologías SUDS como los alcorques inundables y los pavimentos permeables, son los costos asociados a instalación y mantenimiento, que se requiere que sea constante y efectivo para mantener las estructuras operacionales.

En las grandes urbes y como es el caso del ejemplo la ciudad de Bogotá D.C no tiene aún políticas claras que dicten normas y determinen un plan claro que incentive a la implementación de nuevas tecnologías como son los SUDS, sobre todo en obras publicas tales como vías, andenes o alamedas, que son grandes generadores de áreas impermeables, y la normativa establecida para los SUDS, prioriza las acciones en áreas en desarrollo, donde se dispone del área para su implementación, dejando de lado la gran zona urbanizada que tenemos. El desarrollo de este trabajo nos llevó a corroborar que para la implementación de tipologías SUDS no es necesario grandes superficies, ya que pueden ser instaladas en forma de trenes o por secciones, además que permiten mejorar la calidad de las aguas esorrentías urbanas, favoreciendo los procesos naturales de depuración e impidiendo que las cargas contaminantes lleguen a los cuerpos hídricos que son utilizados para el consumo.

Es importante aclarar que para obtener un resultado favorable en la implementación de SUDS se deben instalar a gran escala, ya que la idea de los sistemas urbanos de drenaje sostenible es devolverle las características que tenía la cuenca antes de que sufriera cambios a causa de la urbanización

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J. A. M. (2017). Metodología para determinar el potencial de implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en áreas residenciales, a partir de análisis de sistemas de información geográfica (SIG): caso de estudio Bogotá, Colombia. Uniandes.
- Alcaldía Local de Chapinero. (2017). Plan Ambiental Local Chapinero Mejor para todos 2017 – 2020. Recuperado de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/plan-ambiental-local-chapinero-mejor-para-todos-br-2017-2020>
- Alejandra Trujillo Lopez y Diana Paola Quiroz Lasprilla. (2013). Pavimentos Porosos Utilizados como Alternativos al Drenaje Urbano. Pontificia Universidad Javeriana, BOGOTA D.C.
- Ángela Maria Polanco Andrade y Angela Maria Sanchez Vega. (2012). DISEÑO HIDRÁULICO DE LOSAS EN PAVIMENTO POROSO RÍGIDO COMO ESTRUCTURAS COMPLEMENTARIAS AL DRENAJE PLUVIAL DE BOGOTÁ. Pontificia Universidad Javeriana, BOGOTA D.C.
- Aranda, D. F. C. (1984). Procesos del ciclo hidrológico. UASLP.
- Bayon, J. R., Hernández, J. R., Fuente, E. G.-U., & Fresno, D. C. (s. f.). SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE. SUDS, 25.
- Benassi, A. (2012). El paisaje de la cultura, fundamentos ecológicos en el diseño paisajista. Nacional de la Plata, Ciudad de la plata - Argentina.

DNREC - State of Delaware. (2014). Bioretention - BMP Standards and specifications. Recuperado de

[http://www.dnrec.delaware.gov/swc/Drainage/Documents/Sediment%20and%20Stormwater%20Program/Technical%20Document/Tech%20Doc%20Updates%202014/Article%203.06.2.2.%20Bioretention\\_Rev%202014-05.pdf](http://www.dnrec.delaware.gov/swc/Drainage/Documents/Sediment%20and%20Stormwater%20Program/Technical%20Document/Tech%20Doc%20Updates%202014/Article%203.06.2.2.%20Bioretention_Rev%202014-05.pdf)

EAB-ESP. (s. f.). Sistema de Información Geográfico EAB. Recuperado 9 de mayo de 2018, de <http://www.acueducto.com.co/wassigue1/VisorBaseEAB/>

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2017, diciembre 6). NS-085 Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado. Recuperado de [https://www.acueducto.com.co/webdomino/sistec/consultas.nsf/9f360681749225e805256a22006a465e/05256d89005e772c85256a11006c9078?OpenDocument&ExpandSection=1.5&Highlight=0,085#\\_Section1.5](https://www.acueducto.com.co/webdomino/sistec/consultas.nsf/9f360681749225e805256a22006a465e/05256d89005e772c85256a11006c9078?OpenDocument&ExpandSection=1.5&Highlight=0,085#_Section1.5)

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2018, febrero 9). NS-166 Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS. Recuperado de [https://www.acueducto.com.co/webdomino/sistec/consultas.nsf/9f360681749225e805256a22006a465e/05256d89005e772c052581d400704eb4?OpenDocument&ExpandSection=1.5&Highlight=0,166#\\_Section1.5](https://www.acueducto.com.co/webdomino/sistec/consultas.nsf/9f360681749225e805256a22006a465e/05256d89005e772c052581d400704eb4?OpenDocument&ExpandSection=1.5&Highlight=0,166#_Section1.5)

Filtterra. (2016). Contech Engineered Solutions.



García, Á. L., & Thomas, A. P. (2014). INTEGRACIÓN DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE EN LA REHABILITACIÓN DEL ESPACIO URBANO, (2014), 23.

Garcia, D. S. S., Dantas, M. B., Claudia, M., & Antunes, S. (s. f.). GOVERNANÇA TRANSNACIONAL E SUSTENTABILIDADE, 588.

Jimenez, A. F., & Joya, J. L. (2015). SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) COMO GESTIÓN INTEGRAL EN LA REGULACIÓN Y CONTROL DE AGUAS LLUVIAS; CASO DE ESTUDIO SECTOR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2406/1/SISTEMAS%20URBANOS%20DE%20DRENAJE%20SOSTENIBLE%20%28SUDS%29%20COMO%20GESTI%C3%93N%20INTEGRAL%20EN%20LA%20REGULACI%C3%93N%20Y%20CONTROL%20DE.pdf>

Jose Alejandro Martinez Acosta. (2017). METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN ÁREAS RESIDENCIALES, A PARTIR DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG). CASO DE ESTUDIO BOGOTÁ D.C., COLOMBIA. LOS ANDES - COLOMBIA, BOGOTA D.C.

Lucke, Beecham, Boogaard, & Myers. (2013). Are Infiltration Capacities of Clogged Permeable Pavements Still Acceptable?

Mario Leandro Castro Espinosa. (2011). PAVIMENTOS PERMEABLES COMO ALTERNATIVA DE DRENAJE URBANO. Pontificia Universidad Javeriana, BOGOTA D.C.

Meteorología Colombiana. (2002), 10.

MOMPARLER, S. P., & ANDRÉS-DOMÉNECH, I. (s. f.). LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE: UNA ALTERNATIVA A LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA., 16.

Reyes, F., & Torres, A. (2002). Concreto poroso: Tecnología e investigación para su uso en pavimentos.

Secretaria Distrital de Ambiente. (2011). Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible, 86.

Secretaria Distrital de planeación. (2016). Proyecciones poblacionales por localidades Bogotá 2016-2020. Recuperado de <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/Bogot%E1%20Ciudad%20de%20Estad%EDsticas/2014/Bolet%EDn69.pdf>

Sequera, S. C., Vera, L. C., Correa, J. E., & Mendieta, C. S. (2015). CONCRETO POROSO: CONSTITUCIÓN, VARIABLES INFLUYENTES Y PROTOCOLOS PARA SU CARACTERIZACIÓN. REVISTA CIENTÍFICA, 6.

solestudios , Ingeniería de consulta. (2014). Estructura de pavimentos permeables.

Universidad de los Andes, Secretaria Distrital de Ambiente y Acueducto de Bogota D.C. (2017).  
investigacion de las tipologias y/o tecnologias de Ssistemas Urbanos de Drenaje Sostenible  
(SUDS) que mas se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogota D.C.

Urban Drainage and Flood Control District, Denver. (2010).

US EPA, O. (2014, mayo 21). Storm Water Management Model (SWMM) [Data and Tools].  
Recuperado 23 de noviembre de 2018, de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

## **10 APÉNDICES**

Apéndice 1 Hidrología de las cuencas para la quebrada la Vieja y Rosales

Apéndice 2 Hidrología y volumen de tratamiento para los SUDS

Apéndice 3 Modelación de los SUDS

## **11 ANEXOS**

Anexo 1 Selección de tipologías SUDS

Anexo 2 Diseño de tipologías SUDS (Alcorques Inundables y Pavimentos Permeables)