

**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**

**ANDRES FELIPE JIMENEZ
JOSE LUIS JOYA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
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**

**ANDRES FELIPE JIMENEZ
JOSE LUIS JOYA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
ÁLVARO ENRIQUE RODRÍGUEZ PÁEZ
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

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

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

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.

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. Álvaro Enrique Rodríguez Páez

Asesor Metodológico
Ing. Richard Moreno Barreto

Jurado

Bogotá D.C., junio de 2015

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	10
1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION	11
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA	12
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. JUSTIFICACION	15
5. DELIMITACION	16
5.1 ALCANCES	16
5.2 LIMITACIONES	16
6. MARCO REFERENCIAL	17
6.1 MARCO CONCEPTUAL	17
6.2 MARCO TEÓRICO	18
6.3 OBJETIVOS Y ESTRATEGIAS	20
6.4 TIPOLOGÍAS	21
6.4.1 Cubiertas verdes	21
6.4.2 Pavimentos permeables	24
6.4.2.1 Asfalto porosos	25
6.4.2.2 Concreto Permeable	26
6.4.2.3 Unidades modulares	26
6.5 MODELACIÓN HIDRÁULICA	28
6.5.1 Epa SWMM	29
6.5.2 Aplicaciones	29
6.6 HERRAMIENTAS LID`S	30
6.7 PARÁMETROS DE LAS CAPAS QUE COMPONEN LOS SUDS	31
7. ZONA DE ESTUDIO	38
7.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS	38
7.1.1 Limites	38
7.1.2 Clima	38
7.1.3 Pluviosidad	38
7.1.4 Temperatura	39
7.1.5 Hidrología	39
7.2 DIVISIÓN POLÍTICA Y ADMINISTRATIVA	40
7.3 USOS DEL SUELO	40

	pág.	
7.4	LOCALIZACIÓN	42
7.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS	43
8.	METODOLOGIA	45
8.1	MODELACIÓN DE LA RED DE ALCANTARILLADO PLUVIAL EXISTENTE	45
8.2	MODELACIÓN DE CUBIERTA VERDE	49
8.3	MODELACIÓN PAVIMENTO PERMEABLE	51
9.	RESULTADOS DE LA MODELACION	54
9.1	MODELACIÓN RED EXISTENTE	54
9.2	MODELACIÓN RED EXISTENTE EMPLEANDO CUBIERTAS VERDES	56
9.3	MODELACIÓN RED EXISTENTE EMPLEANDO PAVIMENTO PERMEABLE	59
9.4	MODELACIÓN RED EXISTENTE EMPLEANDO CUBIERTAS VERDES Y PAVIMENTOS PERMEABLES	62
9.5	ANÁLISIS CUENCA NO. 70	66
9.6	ANÁLISIS CUANCA NO. 90	66
9.7	COMPARACIÓN DE LOS MODELOS EJECUTADOS	67
9.7.1	Tercera a decima hora	68
9.7.2	Decima a decima octava hora	69
9.7.3	Decima octava a vigésima cuarta hora	69
10.	CONCLUSIONES	70
	BIBLIOGRAFIA	71

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Combinación de capas por cada una de las Herramientas LID`s en SWMM	30
Tabla 2. Coeficiente de Manning para escorrentía superficial.	32
Tabla 3. Características del suelo.	35
Tabla 4. Valores típicos de almacenamiento.	47
Tabla 5. Comparación en la reducción de caudal con la implementación de SUDS.	68

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Inundación en la localidad de Usaquén por fuerte aguacero	12
Figura 2. Mapa Inundaciones de aguas lluvias Bogotá	13
Figura 3. Representación escorrentía superficial en un entorno rural y urbanizado	19
Figura 4. Diferencia entre el drenaje convencional y el sostenible 1	20
Figura 5. Diferencia entre el drenaje convencional y el sostenible 2	21
Figura 6. Cubiertas verdes o Green-Roof	22
Figura 7. Cubiertas verdes en ciudades	23
Figura 8. Desarrollo de bajo impacto	24
Figura 9. Estructura típica pavimento permeable	25
Figura 10. Asfalto poroso	25
Figura 11. Concreto permeable	26
Figura 12. Unidades modulares	26
Figura 13. Avenida Moctezuma, en Guadalajara	27
Figura 14. Concreto permeable en la plaza central de Soyaló, Chiapas	28
Figura 15. Diagrama conceptual de un área de biorretención LID	30
Figura 16. Parámetros capa de pavimento	34
Figura 17. Parámetros capa de suelo	35
Figura 18. Capa de suelo de almacenamiento	36
Figura 19. Definición lamina drenante	37
Figura 20. Curvas IDF Estación Observatorio Met. Nacional	39
Figura 21. Localización Zona de estudio	43
Figura 22. Red de alcantarillado existente trazado en EPA SWMM	45
Figura 23. Trazado de las Subcuencas de la zona de estudio	46
Figura 24. Parámetros para las Subcuencas	48
Figura 25. Selección LID-Cubierta verde	49
Figura 26. Parámetros para la Cubierta Verde	50
Figura 27. Asignación Cubierta Verde a las Subcuencas	51
Figura 28. Selección LID Pavimento Permeable	51
Figura 29. Parámetros para el Pavimento Permeable	52
Figura 30. Asignación Pavimento Permeable a las Subcuencas	53
Figura 31. Caudal tubería de desagüe modelación sin herramientas LID`s	54
Figura 32. Nodos inundados modelación sin herramientas LID`s	54
Figura 33. Lámina de agua nodos 598-435	55
Figura 34. Lámina de agua nodos 598-1130	55
Figura 35. Lámina de agua nodos 917-1027	56
Figura 36. Caudal tubería de desagüe empleando cubiertas verdes	57
Figura 37. Nodos inundados empleando cubiertas verdes	57
Figura 38. Lámina de agua nodos 598-436 con cubiertas verdes	58

	pág.
Figura 39. Lámina de agua nodos 435-1130 con cubiertas verdes	58
Figura 40. Lámina de agua nodos 917-1027 con cubiertas verdes	59
Figura 41. Caudal tubería de desagüe empleando un pavimento permeable	60
Figura 42. Nodos inundados empleando pavimentos permeables	60
Figura 43. Lámina de agua nodos 598-436 empleando pavimento permeable	61
Figura 44. Lámina de agua nodos 435-1130 empleando pavimento permeable	61
Figura 45. Lámina de agua nodos 917-1027 empleando pavimento permeable	62
Figura 46. Caudal en la tubería de desagüe empleando ambas herramientas LID's	63
Figura 47. Nodos inundados empleando ambas herramientas LID's	63
Figura 48. Lámina de agua nodos 598-435 empleando ambas herramientas LID's	64
Figura 49. Lámina de agua nodos 435-1130 empleando ambas herramientas LID's	64
Figura 50. Lámina de agua nodos 917-1027 empleando ambas herramientas LID's	65
Figura 51. Análisis de la cuenca No. 70 con herramientas LID's y sin LID's	66
Figura 52. Análisis de la cuenca No. 70 con herramientas LID's y sin LID's	67
Figura 53. Análisis de las cuatro (4) modelaciones realizadas	67

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al crecimiento exponencial de las ciudades, y al cambio de condiciones climáticas, se presentan cambios bruscos en las precipitaciones ocasionando inundaciones en los tiempos de invierno, y sequías devastadoras en los tiempos de verano, causando a sus habitantes consecuencias económicas y vitales.

Una ciudad como Bogotá, no es ajena a los fenómenos que suceden en la actualidad, como prueba de ello están los colectores saturados que luego desbordan el agua lluvia, presentando un fenómeno de inundación en vías urbanas, e incluso hogares, y por ende se presenta los SUDS como una alternativa para mitigar el riesgo que se produce al producirse este fenómeno.

El presente trabajo de investigación pretende demostrar la importancia de implementar tecnologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), en las ciudades en este caso en una zona específica en la ciudad de Bogotá, para mejorar la calidad de vida de sus habitantes y por otra parte evitar inundaciones futuras o tener un mejor manejo de las mismas.

1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Uno de los problemas medioambientales inherentes al crecimiento y expansión urbana es la progresiva impermeabilización del suelo. En donde los sistemas de drenaje que hacen parte del sistema de saneamiento de cualquier ciudad se han visto excedidos en la capacidad de mitigación en tiempos de lluvia debido principalmente al incremento en la cantidad de agua precipitada que dichos sistemas reciben de zonas urbanas impermeabilizadas.

Hasta hace pocos años, los proyectos de drenaje urbano estaban centrados únicamente en la “*cantidad*” de agua de escorrentía a evacuar, sin tener en cuenta la “*calidad*” del agua drenada que era vertida al medio.¹ Los sistemas de alcantarillado estaban diseñados con el objetivo de evitar inundaciones, sin considerar el potencial daño ambiental intrínseco al vertido al medio de un agua de escorrentía que arrastra una cantidad considerable de carga contaminante. Pero actualmente en varios países, se promueve una mejora en el proyección urbanística considerando unas nuevas técnicas de drenaje que gestionen de forma eficiente las aguas de escorrentía urbana, con lo que se busca imitar los procesos naturales previos a la urbanización para lo cual se proponen diferentes topologías y técnicas que permiten controlar y aminorar los picos de crecientes.

De forma general, se pueden sintetizar los SUDS en dos grandes objetivos, disminuir la cantidad de las escorrentías urbanas y mejorar la calidad de las mismas. De manera complementaria se distinguen otros beneficios:

- Disminuir los cambios hidrológicos generados por los procesos de urbanización.
- Promover la recarga de las aguas subterráneas.
- Tratamiento del agua in situ para usos no potables y/o para vertimiento final.
- Reducir los flujos de escorrentía asociados con el desarrollo urbano, aumentando los tiempos de detención locales y minimizando áreas impermeables.
- Disminuir los costos de infraestructura de drenaje urbano debido a la reducción de la escorrentía y los caudales máximos.

¹ABELLÁN, Ana. Situación de los SUDS. [En línea]. Bogotá [citado: 05, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeurbanosostenible.org/general/situacion-de-los-suds/>>

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las precipitaciones que han venido ocurriendo en los últimos años debido al inicio de los periodos de lluvias, ha causado el colapso de las principales calles y avenidas de importantes localidades en Bogotá, evidenciando así la necesidad de mejorar el sistema de drenaje en la ciudad. Por parte del distrito de la ciudad en Noviembre del 2014 el alcalde expidió el decreto 528 del 2014 que establece el sistema de drenaje pluvial sostenible y en el cual se prevé la formulación de un plan estratégico que transforme el actual sistema de drenaje de aguas lluvias con el fin, por ejemplo, de reducir riesgos, aprovechar el líquido y, en definitiva, contribuir a la adaptación de la ciudad al cambio climático. Por ejemplo en la calle 26 a la altura de la carrera 68. En el cruce con la avenida Boyacá los alcantarillados que hicieron los contratistas no tienen la capacidad para evacuar el volumen de aguas que cae en la zona. En el puente de la calle 100 con carrera 9ª, el problema es otro. Según los ingenieros del Acueducto, el drenaje del sector se conduce paralelamente a la avenida 9ª y va hacia los canales. En esta zona tiene incidencia la obra de la calle 94 Los encharcamientos que se registran en varios de los descensos y orejas de los puentes (como los de la avenida 68 con calle 26 y la calle 170 con autopista Norte) se deben a que los sumideros construidos son insuficientes.²

Figura 1. Inundación en la localidad de Usaquén por fuerte aguacero.



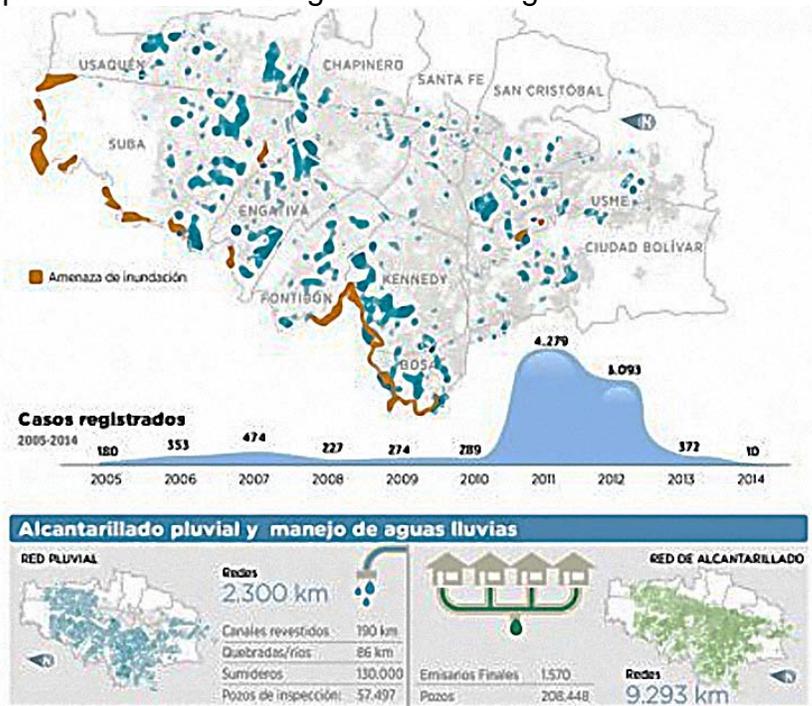
Fuente: EL ESPECTADOR. Petro decreta plan para evitar inundaciones en Bogotá. [En línea]. Bogotá 25 de Noviembre del 2014 [citado: 06, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.elspectador.com/noticias/bogota/petro-decreta-plan-evitar-inundaciones-bogota-articulo-529446>>

El último estudio que presentó el Idiger sobre un sistema de drenaje sostenible muestra que el occidente de la ciudad se clasifica como de amenaza alta y media por inundación. Por problemas como ocupaciones en la ronda del río Bogotá y la

²EL TIEMPO. ¿Por qué se inunda Bogotá cuando llueve? [En línea]. Bogotá [citado: 03, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.eltiempo.com/bogota/inundaciones-en-bogota/14861695>>

obstrucción de canales, 1'600.000 personas están expuestas al rebose de redes del sistema sanitario y pluvial. Por las inundaciones en Bosa y Kennedy en diciembre de 2011 resultaron afectadas 27.697 personas. El costo para el Distrito por estas emergencias ascendió a \$24 mil millones. Esto sucedió, a pesar de que la ciudad cuenta con 2.300 kilómetros de red pluvial, 86 km de quebradas y ríos (sin incluir el Bogotá) y 57.497 pozos de inspección.³

Figura 2. Mapa Inundaciones de aguas lluvias Bogotá.



Fuente: VALENZUELA, Santiago. Plan para mitigar inundaciones en Bogotá. [En línea]. Bogotá [citado: 03 de Febrero del 2015]. Disponible en Internet: <URL: www.elespectador.com/noticias/bogota/plan-mitigar-inundaciones-bogota-articulo-517838>

Teniendo en cuenta que, el propósito principal de un sistema de alcantarillado pluvial es permitir el rápido desalojo de las aguas de lluvia para evitar posibles molestias, e incluso daños materiales y humanos debido a su acumulación o escurrimiento superficial. ¿Es viable, basados en las tecnologías y conceptos de los SUDS, plantear una alternativa no convencional, para el control y regulación de las aguas lluvias de un sector de la ciudad de Bogotá?

³VALENZUELA, Santiago. Plan para mitigar inundaciones en Bogotá. [En línea]. Bogotá [citado: 03 de Febrero del 2015]. Disponible en Internet: <URL: www.elespectador.com/noticias/bogota/plan-mitigar-inundaciones-bogota-articulo-517838>

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Hacer un análisis comparativo entre la implementación de tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS, y el comportamiento de un sistema de drenaje convencional, a través de la modelación digital basada en el programa EPA SWMM.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar un área representativa en Bogotá y recopilar la información pertinente para caracterizar el estado del alcantarillado pluvial.
- Desarrollar un modelo digital que describa el funcionamiento del drenaje pluvial en su estado actual, e implementar una propuesta de un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS).
- Comparar el comportamiento actual del sistema de drenaje frente al funcionamiento con la implementación del SUDS, y evaluar sus ventajas.

4. JUSTIFICACIÓN

La expansión urbana de la ciudad y el cambio climático han influido en que Bogotá sea una ciudad que puede ser afectada por inundaciones. Los drásticos cambios y desequilibrios en las funciones del ciclo hidrológico, presentes en los últimos años, pueden tener consecuencias económicas, ambientales y de salud pública.

De este modo puede resultar más frecuente ver que los sistemas de drenaje se desborden en temporadas de lluvia. Este fenómeno debido principalmente a los grandes volúmenes de agua que se reciben rápidamente de las zonas impermeables y que en ocasiones exceden la capacidad de los colectores. Como consecuencia en los últimos años se han vuelto reiterativos, en cada temporada invernal, las inundaciones y empozamientos de agua en las vías y espacio público.

Ante este panorama se hace indispensable y pertinente sopesar la implementación de nuevas alternativas que permitan mitigar y minimizar los problemas asociados a la gestión y control de caudales de escorrentía que se producen en épocas de lluvia al tiempo que se conviertan en proyectos sustentables, económicos y socialmente viables y que permitan el desarrollo de nuevas áreas urbanizables.

5. DELIMITACIÓN

5.1 ALCANCES

El alcance estará enmarcado específicamente en la selección de un sector de Bogotá que sea representativo por la afectación de inundaciones debido a lluvia y escorrentía superficial, en donde se buscara proponer una serie de escenarios de optimización basados en la implementación de SUDS, por medio de una modelación hidráulica empleando las nuevas herramientas LID`s (*Low Impact Development*) del software EPA SWMM 5.1.

5.2 LIMITACIONES

- Con el propósito de proponer una posible alternativa de drenaje y desarrollar una metodología adaptable a las condiciones del lugar, se ha escogido un sector de Bogotá. Comprendido entre la Calle 127 y la Calle 151, entre la Autopista Norte y la Avenida Séptima.
- Solamente se va a trabajar con la información recopilada.
- No se realizarán visitas de campo.
- No se van a realizar estudios de suelos.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO CONCEPTUAL

- **Sostenibilidad.** Es la capacidad de permanecer. Cualidad por la que un elemento, sistema o proceso, se mantiene activo en el transcurso del tiempo. Capacidad por la que un elemento resiste, aguanta, permanece.
- **Sostenible.** Especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente. Desarrollo que cubre las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de generaciones futuras de cubrir sus necesidades.
- **Drenaje.** Concentración y evacuación de las aguas de una región a través del sistema fluvial, la función principal de un sistema de drenaje es la de permitir la retirada de las aguas que se acumulan en depresiones topográficas del terreno, causando inconvenientes ya sea a la agricultura o en áreas urbanizadas.
- **Escorrentía superficial.** La escorrentía superficial describe el flujo del agua, lluvia, nieve, u otras Fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua.
- **Medio ambiente.** El medio ambiente son los conjuntos de componentes físicos, químicos, biológicos, sociales, económicos y culturales capaces de causar efectos directos e indirectos, en un plazo corto o largo sobre los seres vivos. Desde el punto de vista humano, se refiere al entorno que afecta y condiciona especialmente las circunstancias de vida de las personas o de la sociedad en su conjunto.¹ Comprende el conjunto de valores naturales, sociales y culturales existentes en un lugar y en un momento determinado, que influyen en la vida del ser humano y en las generaciones futuras. Es decir, no se trata sólo del espacio en el que se desarrolla la vida, sino que también comprende seres vivos, objetos, agua, suelo, aire y las relaciones entre ellos, así como elementos tan intangibles como la cultura.
- **Precipitación.** cualquier producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra. Ocurre cuando la atmósfera se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y cae de la solución. El aire se satura a través de dos procesos. por enfriamiento y añadiendo humedad.
- **Infiltración del agua.** La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo. La tasa de infiltración, en la ciencia del

suelo, es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación o la irrigación. Se mide en pulgadas por hora o milímetros por hora.

- EPA. Agencia de Protección del Medio Ambiente.
- SWMM. Modelo de Gestión de Aguas Pluviales.
- Alcantarillado. Se denomina alcantarillado o red de alcantarillado al sistema de estructuras y tuberías usadas para el transporte de aguas residuales o servidas (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvia, (alcantarillado pluvial) desde el lugar donde se generan hasta el sitio en que se vierten a cauce o se tratan
- Superficie impermeable. Característica que tienen las superficies de rechazar el agua sin dejarse atravesar por ella. No debe confundirse con la estanquidad o hermeticidad al agua, que se debe a la ausencia de rendijas en las ventanillas y maleteros y no a la porosidad de las superficies.
- Inundación. Una inundación consiste en la invasión o cubrimiento de agua en áreas que en condiciones normales se mantienen secas. (Pérez Guillermo, Febrero 2014).

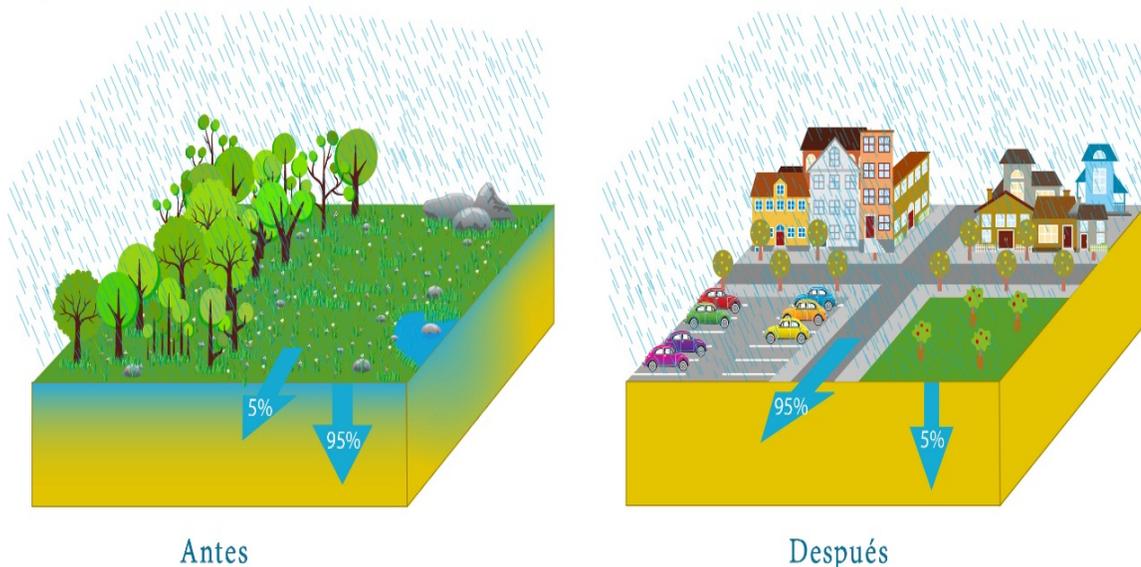
6.2 MARCO TEÓRICO

Al urbanizar un entorno natural, se impermeabiliza una parte importante de las superficies mediante edificaciones, vías, parqueaderos, etc. Impidiendo que la lluvia se infiltre en el terreno y recargue los acuíferos superficiales.

Las consecuencias de la urbanización intensiva sobre los procesos hidrológicos han demostrado la limitación de las soluciones tradicionales de drenaje urbano, para agravar o empeorar estos efectos.

Los sistemas tradicionales de drenaje son poco flexibles y adaptables a los cambios de uso de la tierra y a los intensos procesos de urbanización y crecimiento de las ciudades, exigiendo grandes costos de inversión en ampliación de infraestructura destinada a evacuar los caudales generados por las lluvias, convirtiéndose en muchos casos en soluciones puntuales que se ven rebasadas al transcurrir el tiempo, ante este panorama se hace necesario hacer una revisión minuciosa de la forma de concebir, planificar y enfrentar los nuevos desarrollos urbanos que se dan en todas las ciudades.

Figura 3. Representación escorrentía superficial en un entorno rural y urbanizado.



Fuente: H2O HIDROLOGÍA SOSTENIBLE. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. [En línea]. Bogotá [citado: 25 de Marzo de 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/>>

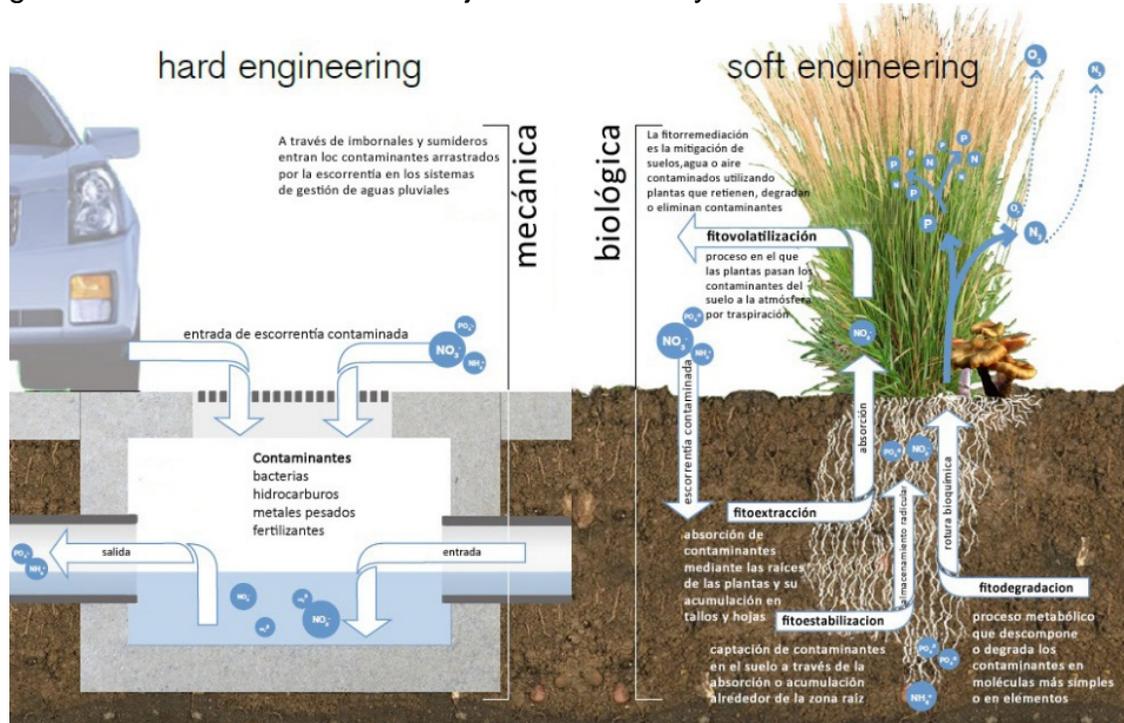
A estos inconvenientes hay que añadir la contaminación de esta agua. Al comienzo de la precipitación se da el proceso de “*primer lavado*”. En él una fracción significativa de los contaminantes acumulados en tiempo seco (período entre lluvias), es arrastrada por un pequeño volumen inicial de agua de escorrentía superficial. Por tanto, ese pequeño caudal inicial contiene la mayor parte de las partículas que se habían acumulado sobre las superficies impermeables de las áreas urbanizadas (polvo, arenas, metales pesados, sustancias tóxicas,...). Lo que hace que el *primer lavado* contenga elevadas concentraciones de contaminantes, las *deposiciones atmosféricas* y el consecuente lavado de sustancias son la principal Fuente de contaminación de las aguas de escorrentía urbana.⁴

Desde ya hace varios años se ha venido desarrollando un planteamiento alternativo para abordar estas problemáticas. Inicialmente, estas soluciones se orientaron en el control y el manejo del flujo a través estructuras de almacenamiento de agua pluvial, lo que resulta en la mitigación de las inundaciones o la infiltración del agua de lluvia, la reducción de los volúmenes escorrentía o combinado soluciones para el almacenamiento y la infiltración.

⁴ABELLÁN, Ana. Contaminantes en las aguas de escorrentía urbana. [En línea]. Bogotá [citado: 05, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeurbanosostenible.org/calidad/contaminantes-en-las-aguas-de-escorrentia-urbana/>>

Actualmente, existe una gran variedad de técnicas alternativas en el drenaje pluvial donde la mayoría se centran en procesos de almacenamiento e infiltración de las aguas pluviales. Sin embargo, también hay soluciones que fomentan intercepción y evapotranspiración, como techos verdes, y manejo de áreas verdes en las zonas urbanas.

Figura 4. Diferencia entre el drenaje convencional y el sostenible 1.

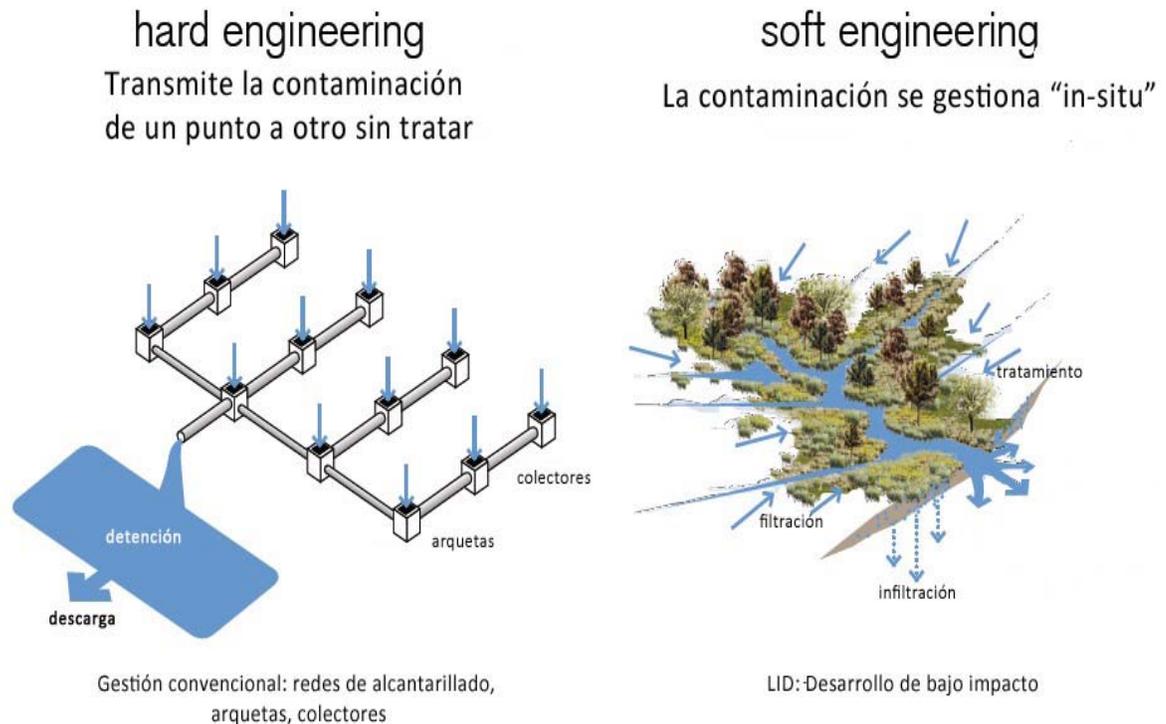


Fuente: ABELLÁN, Ana. Ingeniería “Hard” versus Ingeniería “Soft”. [En línea]. Bogotá [citado: 25 de Marzo del 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeurbanosostenible.org/general/ingenieria-hard-vs-ingenieria-soft/>>

6.3 OBJETIVOS Y ESTRATEGIAS

Una de las ideologías de los SUDS es intentar representar la condición existente previa a la urbanización. Esto en parte es favorecer la infiltración del agua en el suelo, algo que en las ciudades no se realiza por culpa de los altos niveles de impermeabilización. Este punto supone otra de las grandes diferencias con el drenaje convencional que lo que hace es transportar la escorrentía que se produce en un punto hasta otro punto lejano, sin promover en ningún caso que esa agua se infiltre. En cambio el drenaje sostenible promueve la atenuación de picos de crecientes, la infiltración del agua de escorrentía, es decir la **recarga de acuíferos**, lo que lleva asociado que ésta pase a ser considerada como un recurso hídrico disponible para ser reutilizado.

Figura 5. Diferencia entre el drenaje convencional y el sostenible 2.



Fuente: ABELLÁN, Ana. Ingeniería "Hard" versus Ingeniería "Soft". [En línea]. Bogotá [citado: 25 de Marzo del 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeurbanosostenible.org/general/ingenieria-hard-vs-ingenieria-soft/>>

6.4 TIPOLOGÍAS

Para este trabajo nos limitaremos a describir y trabajar sobre dos tipos de Sistemas de drenaje Sostenible.

6.4.1 Cubiertas verdes. Las cubiertas verdes (Green-roof) tienen como objeto interceptar y retener las aguas lluvias, reduciendo el volumen de escorrentía y aminorando el caudal pico. Estructuralmente son un sistema que consiste en una serie de capas colocadas sobre los tejados de los edificios a las cuales se favorece el crecimiento de vegetación. Este sistema, además retiene contaminantes, actúa como un aislante térmico en el edificio, entre otros

Las cubiertas verdes incluyen lo que son, terrazas, tejados, balcones tanto de uso público como privado y que pueden tener o no con acceso directo a ellas.

Figura 6. Cubiertas verdes o Green-Roof.



Fuente: THE OHIO STATE UNIVERSITY. Green Roof: Saving Money, Saving our Earth [En línea]. Bogotá [citado: 21 de, Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://u.osu.edu/crp2110/2015/04/22/green-roofs-saving-money-saving-our-earth/>>

El diseño de la cubierta verde definirá las clases de plantas que pueden ser implementadas, la posibilidad de acceso al público, las consideraciones estructurales, el mantenimiento requerido y por supuesto los costos.

Componentes de las cubiertas verdes. El desarrollo de las cubiertas verdes precisa de cuatro componentes:

- Barrera de raíces. Evita que las raíces puedan penetrar a través de la membrana impermeable dañándola.
- La capa de drenaje. Se usa para controlar el agua que se retiene de la cubierta. Puede estar compuesta de varios tipo materiales granulares, como arenas, gravas, material volcánico,... o elementos modulares/sistemas laminares.
- El sustrato (Suelo). Es el espacio físico, dotado de una estructura porosa, con nutrientes, composición química y propiedades de drenaje necesarios para el crecimiento de las plantas escogidas.
- La capa de vegetación. Habrá que escoger la especie más adecuada en función de la climatología y el sitio.

Figura 7. Cubiertas verdes en ciudades.



Fuente: CÁSALE, Jorge. Buenos Aires: legislación sobre techos verdes. [En línea]. Bogotá [citado: 25, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.redsustentable.org/buenos-aires-legislacion-sobre-techos-verdes>>

Ventajas:

- Imitan el estado hidrológico inicial antes de la impermeabilización asociada al desarrollo urbanístico.
- Tienen una alta capacidad de eliminación de los contaminantes atmosféricos urbanos depositados, así que mejoran la calidad del aire.
- Pueden ayudar en el control de la contaminación acústica (la vegetación absorbe el ruido).
- Suponen una mejora estética del edificio.
- Puede ser usados como espacios verdes.
- Aíslan térmicamente los edificios frente a temperaturas extremas.

Desventajas:

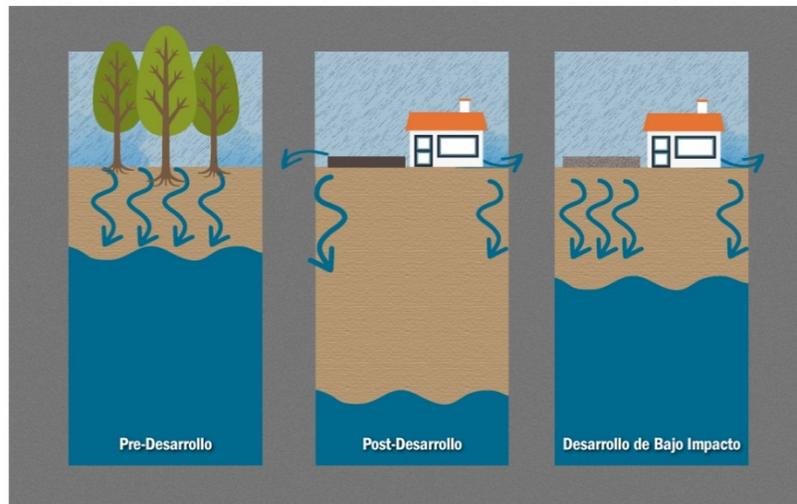
- Caro en comparación con los tejados convencionales
- No es apropiado en tejados inclinados.
- La estructura de la azotea puede limitar la adaptación de las cubiertas verdes.
- Se requiere de un mantenimiento de la vegetación.
- En climas mediterráneos requiere de un mayor cuidado y de un aporte adicional de agua.

6.4.2 Pavimentos permeables. Los pavimentos son una pieza fundamental para el desarrollo urbano, sin embargo son los principales generadores en el aumento de caudales debido a su capa impermeable, que normalmente vienen contaminados con metales pesados e hidrocarburos. Estos excesos de caudal y de contaminantes se pueden evidenciar con mayor impacto, aguas abajo o en ecosistemas naturales ya que se recibe la mayor cantidad de agua y las propiedades que presenta⁵. Debido a esta acumulación de aguas contaminadas se debe buscar técnicas alternativas al drenaje urbano que logren filtrar y evitar la acumulación de aguas y contaminantes.

Los pavimentos permeables o porosos, son sistemas continuos o modulares, que dejan pasar el agua a su través. Permitiendo que ésta se infiltre por el terreno o sea captada y retenida en capas de tipo subsuperficial para su posterior reutilización o evacuación. El agua atraviesa la superficie permeable, que actúa a modo de filtro, hasta la capa inferior que sirve de reserva, atenuando de esta forma las puntas del flujo de escorrentía superficial. El agua que permanece en esa reserva puede ser transportada a otro lugar o infiltrada, si el terreno lo permite.

En la actualidad los pavimentos permeables son usados primordialmente en parques, senderos, andenes, vías de tráfico liviano, parqueaderos, calles de urbanizaciones, etc.

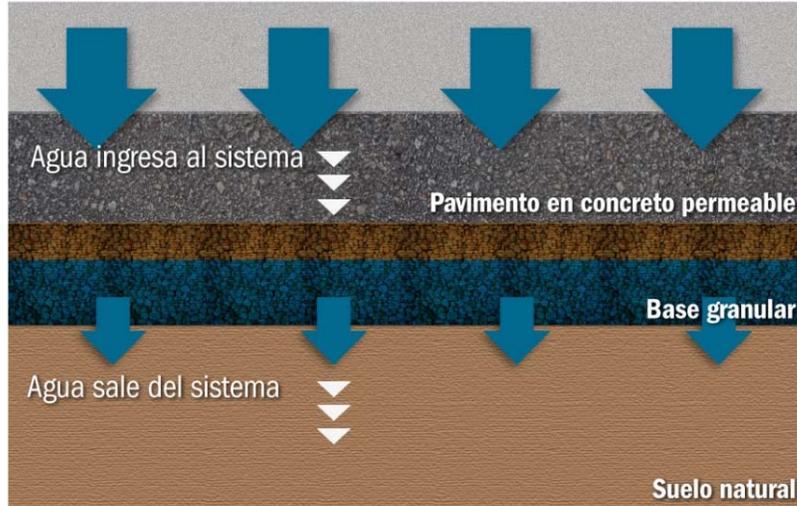
Figura 8. Desarrollo de bajo impacto.



Fuente: ARANGO, Samuel. Concreto permeable: desarrollo de bajo impacto. [En línea]. Bogotá [citado: 13, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>>

⁵LUCKE, Terry., BEECHAM, Simon., BOOGAARD, Floris., & MYERS, Baden. Are Infiltration Capacities of Clogged Permeable Pavements Still Acceptable? En: Novatech. 2013, p. 3.

Figura 9. Estructura típica pavimento permeable.



Fuente: ARANGO, Samuel. Concreto permeable: desarrollo de bajo impacto. [En línea]. Bogotá [citado: 13, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>>

Existen diversos tipos de superficies permeables, entre ellas están:

6.4.2.1 Asfalto porosos. Utilizados principalmente en los parqueaderos, permiten que el agua drene a través de la superficie del pavimento y se infiltre en el subsuelo.

Figura 10. Asfalto poroso.



Fuente: ABELLÁN, Ana. Tipos de superficies permeables. [En línea]. Bogotá [citado: 28 de, Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeurbanosostenible.org/pavimentos-permeables/tipos-superficies-permeables/>>

6.4.2.2 Concreto Permeable. Este pavimento elimina la necesidad de estanques de retención y de otras técnicas de bajo impacto, disminuyendo los costos del proyecto.

Figura 11. Concreto permeable.



Fuente: ECHEVERRY, Verónica. Recorriendo latitudes. [En línea]. Bogotá [citado: 13, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/recorriendo-latitudes-con-concreto-permeable/>>

6.4.2.3 Unidades modulares. Las unidades modulares de concreto prefabricado, de piedra natural o de ladrillo, permiten que el agua percole a su alrededor o a través de sus superficies.

Figura 12. Unidades modulares.



Fuente: ABELLÁN, Ana. Tipos de superficies permeables. [En línea]. Bogotá [citado: 28 de, Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeurbanosostenible.org/pavimentos-permeables/tipos-superficies-permeables/>>

Ventajas/beneficios:

- Aminorar los picos de caudal disminuyendo el riesgo de inundación aguas abajo.
- Disminuye los efectos de contaminación en el agua de escorrentía.
- Gran variedad en diseño y tipos.
- Se pueden usar como parte de un sistema en línea en aquellos lugares donde la infiltración del agua puede conllevar problemas.
- Reducen o eliminan la presencia de sumideros y colectores.
- Eliminan el enpozamiento superficial del agua.

Desventajas y limitaciones:

- No pueden utilizarse donde haya arrastre superficial de grandes cargas de sedimentos.
- Por ahora no se usan en carreteras con tráfico elevado.
- A largo plazo, si no hay mantenimiento, existe riesgo de crecimiento de malas hierbas y de obstrucciones.

Algunos ejemplos se observan en las siguientes figuras.

Figura 13. Avenida Moctezuma, en Guadalajara.



Fuente: ECHEVERRY, Verónica. Recorriendo latitudes. [En línea]. Bogotá [citado: 13, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/recorriendo-latitudes-con-concreto-permeable/>>

Figura 14. Concreto permeable en la plaza central de Soyaló, Chiapas.



Fuente: ECHEVERRY, Verónica. Recorriendo latitudes. [En línea]. Bogotá [citado: 13, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/recorriendo-latitudes-con-concreto-permeable/>>

6.5 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Los métodos matemáticos proponen soluciones con modelos matemáticos, lo que posibilita simplificaciones importantes, que a su vez causan efectos que deben ser aforados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida. En hidráulica, un modelo corresponde a un sistema que simula un elemento real denominado prototipo, mediante la entrada de información se procesa y se presenta adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería. Un modelo físico a escala reducida es una representación a escala del prototipo, y cumple ciertas condiciones definidas. Hoy en día se cuenta con técnicas avanzadas de modelación física de fenómenos hidráulicos que, unidas al adelanto en instrumentos de medición y equipos generadores de fenómenos a escala, propician predecir con alto grado de certidumbre lo que pueda ocurrir en el prototipo y, por tanto, se alcanzan óptimos resultados en los aspectos de funcionalidad, estabilidad y economía. El empleo de un modelo hidráulico conlleva a establecer un programa de investigación experimental sobre todas las variables que influyen. Lo anterior se hace para poder verificar en su caso la validez de soluciones analíticas de un problema dado, o determinar las leyes de relación entre las diferentes variables que, extrapoladas al prototipo, permitan optimizar la eficiencia de cada uno de los elementos del sistema modelo-prototipo. En ciertas etapas del programa y cuando el problema se puede

describir con suficiente detalle utilizando modelos matemáticos, éstos se emplean complementariamente con resultados satisfactorios.⁶

6.5.1 Epa SWMM. El modelo de gestión de aguas pluviales (Stormwater Management Model) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en período extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía.

El módulo de transporte o hidráulico de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Así mismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal durante la simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.⁷

6.5.2 Aplicaciones. EPASWMM es un programa de gran referencia a nivel mundial en el análisis de redes de drenaje, debido a que es un programa gratuito y de cálculo abierto, además su algoritmo de cálculo es muy potente y permite generar análisis hidráulicos en periodos cortos de tiempo. Este programa nos permite clasificar las capacidades de modelización en dos grandes grupos:

- Capacidades hidrológicas.
 - La precipitación se puede considerar variable en el tiempo y en el espacio.
 - La cuenca en estudio puede ser dividida en varias subcuencas.
 - Es posible tener en cuenta diferentes procesos de pérdidas de precipitación en la cuenta: evaporación, acumulación superficial e infiltración.
 - La escorrentía superficial de la cuenta se considera variable, tanto en el tiempo como en el espacio.

- Capacidades hidráulicas.
 - Se puede modelar redes de cualquier tamaño y forma, además, se pueden incluir estructuras de alivio o vertido, entre otros tipos de estructuras.

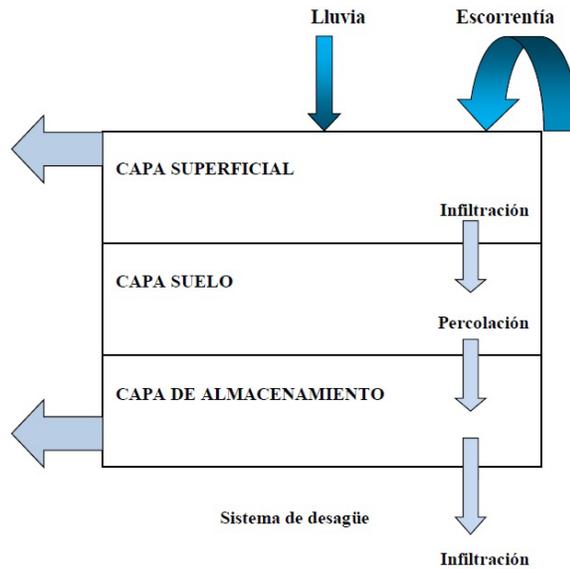
⁶RESTREPO, Julián. Modelos hidráulicos. [En línea]. Bogotá [citado: 08, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/modelacionhidraulica/modelacion_hidraulica.html>

⁷SWMM. Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5vE. Manual del Usuario. Traducción Grupo Multidisciplinario de Modelación de Fluidos. [En línea]. Bogotá. [citado: 14, Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: http://www.instagua.upv.es/swmm/descargas/Manual_SWMM5vE.pdf>

6.6 HERRAMIENTAS LID`S

Los controles LID están representados por una combinación de capas verticales cuyas propiedades se definen sobre una base por unidad de área. Esto permite que una herramienta LID con el mismo diseño pero con una área de cobertura diversas, se puedan colocar fácilmente dentro de las diferentes subcuencas en un área de estudio. Durante la simulación, **SWMM** realiza un balance de la humedad manteniendo un registro de la cantidad de agua que se mueve y/o almacena entre estas diferentes capas:

Figura 15. Diagrama conceptual de un área de biorretención LID.



Fuente: ABELLÁN, Ana. Representación de los TDUS en SWMM. [En línea]. Bogotá [citado: 30, mar., 2015], Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeyurbanosostenible.org/general/representacion-de-las-tdus-en-swmm/>>

La siguiente tabla indica cual es la combinación de capas que se ha de aplicar a cada tipo de LID o técnica de drenaje urbano sostenible, en ella **X** indica que es una capa necesaria, **0** significa que es opcional.

Tabla 1. Combinación de capas por cada una de las Herramientas LID`s en SWMM

Capas/SUDS	Superficie	Pavimento	Suelo	Almacenamiento	Desagüe inferior	Tapiz drenante
Cubiertas verdes	X		X			X
Pavimentos porosos	X	X		X	0	

Fuente: ABELLÁN, Ana. Representación de los TDUS en SWMM. [En línea]. Bogotá [citado: 30, mar., 2015], Disponible en Internet: <URL: <http://drenajeyurbanosostenible.org/general/representacion-de-las-tdus-en-swmm/>>

6.7 PARÁMETROS DE LAS CAPAS QUE COMPONEN LOS SUDS

La herramienta *LID Control Editor* sirve para establecer las características de diseño de cada una de las capas que constituyen las técnicas de drenaje sostenible (tales como el grosor, volumen de huecos de vacíos, la conductividad hidráulica, las características de desagüe inferior, etc.). El diseño del control se hace sobre una base por unidad de área de manera que se puede colocar en cualquier número de subcuencas en diferentes tamaños o número de repeticiones.

- Nombre de control. Un nombre utilizado para identificar el control de LID en particular.
- Tipo de capa. El tipo genérico de LID que se está definiendo (celda de bio-retención, jardín de lluvia, cubiertas verde, zanjas de infiltración, pavimentos permeables, depósitos de lluvia).
- Capas de Proceso. Es aquella ventana que contiene una serie de pestañas, la cual presenta una serie de campos para ingresar la información requerida, para las capas verticales y la estera que hace parte del drenaje inferior para el control del LID, Estos campos varían de acuerdo al tipo de LID seleccionado.
- Superficie.
 - Altura de las bermas. Para el caso en que haya bermas, es la profundidad máxima a la que el agua puede estancarse por encima de la superficie antes de que se produzca un desbordamiento. Asumimos una altura de 50mm para la cubierta verde y de 200mm para el pavimento permeable.
 - Fracción de volumen de la vegetación. Es la fracción de volumen de vegetación que ocupa la profundidad de almacenamiento. Es el volumen ocupado por tallos y hojas, no la superficie de cobertura vegetal, en ocasiones que el crecimiento vegetativo es muy denso, puede llegar a ser tan alto como 0.1, 0.2. Asumimos 0.1 para la cubierta verde y de 0.0 para el pavimento permeable.
 - Rugosidad de la superficie. Es el coeficiente de Mannig, y se utiliza para la implementación de la tecnología SUDS de pavimentos porosos y las cunetas verdes. Asumimos $n=0.24$ para la cubierta verde y de $n=0.011$ para el pavimento permeable.⁸

⁸MCCUEN, R. Hydrology, FHWA-SA-96-067. Washington: Federal Highway Administration. 1996. p. 50.

Tabla 2. Coeficiente de Manning para escorrentía superficial.

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para el flujo superficial	
Tipo de superficie	n
Asfalto liso	0.011
Hormigón liso	0.012
Revestimiento ordinario de hormigón	0.013
Madera	0.014
Ladrillo con mortero	0.014
Arcilla	0.015
Hierro fundido	0.015
Tuberías metal corrugadas	0.024
Superficie con escombros de cemento	0.024
Suelos en barbecho (sin residuos)	0.05
Suelos cultivados	
Residuos en cobertura <20%	0.06
Residuos en cobertura >20%	0.17
Pasto natural	0.13
Césped	
Pradera hoja corta	0.15
Denso	0.24
Gramma común	0.41
Bosques	
Maleza ligera	0.4
Maleza densa	0.8

Fuente: MCCUEN, R. Hydrology, FHWA-SA-96-067. Washington: Federal Highway Administration. 1996. p. 50.

- Pendiente de la superficie: Es la pendiente del pavimento poroso y el de la cubierta verde. Asumimos una pendiente de 0% por ser una cubierta plana.
- Pavimento.
- Espesor de la capa de pavimento: los valores típicos se encuentran entre 100 y 150 mm. Para este caso se asumió un espesor de 15cm de pavimento permeable.

- Relación de espacios vacíos: es el volumen de espacios vacíos en relación con el volumen de sólidos en el suelo para sistemas continuos o con el material de relleno utilizado. Se utilizó un valor de 0.18 para pavimentos porosos.⁹
- Fracción de la superficie impermeable: es la relación de material de pavimento impermeable con la superficie total. Asumimos un valor de 0 por ser un sistema de pavimento poroso continuo.
- Permeabilidad: Es la permeabilidad del hormigón o del asfalto que se utiliza en sistemas continuos o la conductividad hidráulica del material de relleno (grava o arena) que se utiliza en los sistemas modulares (mm/hora). Las superficies del pavimento deben tener una permeabilidad de 203.2 mm/h (8 pg/h) o más para conducir el agua a la sub-base rápidamente.¹⁰
- Factor de colmatación: es el valor que obstruye completamente el pavimento, es función de la escorrentía tratada y del índice de huecos. La colmatación reduce progresivamente la permeabilidad del pavimento en proporción directa con el volumen acumulado de la escorrentía tratado. El factor de colmatación puede calcularse:

$$Y_{clog} = \frac{P_a * CR * (1 + VR) * (1 - ISF)}{(T * VR)}$$

Donde:

P_a : Es la cantidad anual de lluvia que cae sobre la zona. $P_a=1085\text{mm}^{11}$

CR : es el ratio de captura del pavimento (área que contribuye a la escorrentía del pavimento dividido por el área propia de la acera). $CR=1,4$.

VR : es Relación de vacío (Void Ratio). $VR=0.18^{12}$

ISF : es la fracción de la superficie impermeable $ISF=88.86\%=0.89$.

T : es el espesor de la capa de pavimento $T=0.15\text{m}$

Por lo cual obtenemos:

$$Y_{clog} = 5.2$$

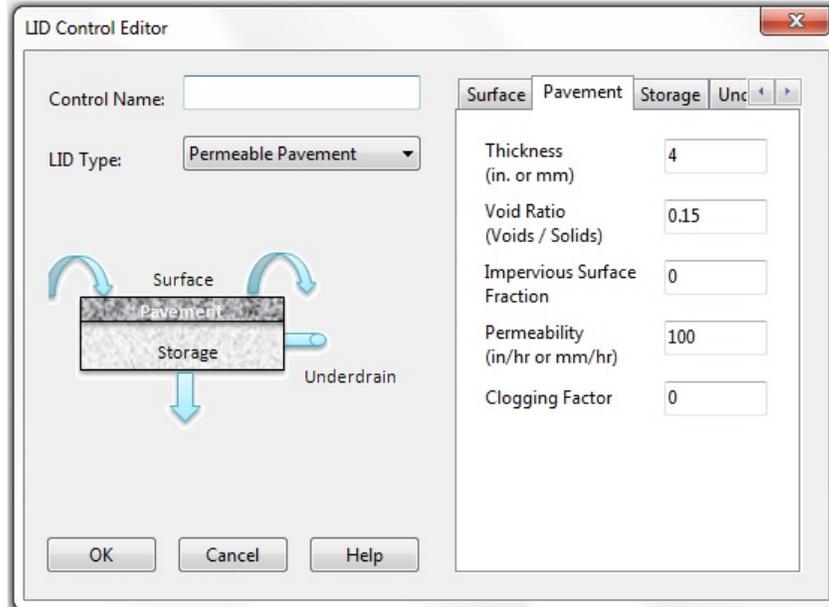
⁹GÓMEZ GONZÁLEZ, G.A., RODRÍGUEZ BENAVIDES A.F., TORRES, A. Durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido., Punta del Este XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 21-25 Nov. 2010. p. 4.

¹⁰TRUJILLO LÓPEZ, Alejandra; QUIROZ, Diana Paola. Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano. [En línea]. Bogotá [citado: Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/11174/1/TrujilloLopezAlejandra2013.pdf>>

¹¹OBSERVATORIO AMBIENTAL DE BOGOTÁ. Precipitación anual. [En línea]. Bogotá [citado: Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=156&v=1>>

¹²Gómez González G.A., Rodríguez Benavides A.F., Torres A. Op. Cit., p. 4.

Figura 16. Parámetros capa de pavimento.



Fuente: Autores.

- Suelo.

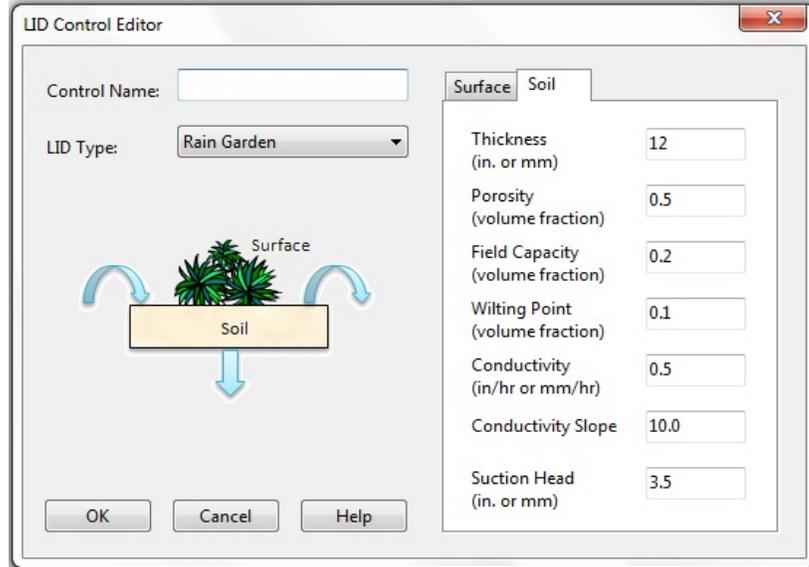
- Espesor de la capa de suelo: Valores típicos están en el rango de los 450 a 900 mm para áreas localizadas en calles o sobre el suelo directamente y sólo 75 a 150 mm para cubiertas verdes. Asumimos un valor de 12cm para la cubierta verde.

- Porosidad: Fracción de espacios vacíos presentes en el suelo. Valor asumido igual a 0.453 (Ver Tabla 3)

- Capacidad de campo: cuando un suelo está saturado, el agua tiende a moverse por gravedad hacia el subsuelo, hasta llegar a un punto en que el drenaje es tan pequeño que el contenido de agua del suelo se estabiliza. Cuando se alcanza este punto se dice que el suelo está a la Capacidad de Campo (C.C.). Valor asumido igual a 0.19 (Ver Tabla 3)

- Punto de marchitez: Buena parte del agua retenida a la Capacidad de Campo puede ser utilizada por las plantas, pero a medida que el agua disminuye se llega a un punto en que la planta no puede absorberla. En este estado se dice que el suelo está en el punto de marchitez. Valor asumido igual a 0.085 (Ver Tabla 3)

Figura 17. Parámetros capa de suelo.



Fuente: Autores.

Tabla 3. Características del suelo.

Características del suelo					
Textura del suelo	Conductividad hidráulica(mm/h)	Altura succión (mm)	Porosidad	Capacidad de campo	Punto de marchitez
Arena	120.40	49	0.437	0.062	0.024
Arena margosa	29.97	61	0.437	0.105	0.047
Marga Arenosa	10.92	110	0.453	0.19	0.085
Marga	3.30	89	0.463	0.232	0.116
Sedimentos de marga	6.60	170	0.501	0.284	0.135
Marga areno-arcillosa	1.52	220	0.398	0.244	0.136
Marga arcillosa	1.02	210	0.464	0.310	0.187
Sedimentos de marga arcillosa	1.02	270	0.471	0.342	0.210
Arcilla arenosa	0.51	240	0.430	0.321	0.221
Sedimentos de arcilla	0.51	290	0.479	0.371	0.251
Arcilla	0.25	320	0.475	0.378	0.265

Fuente: RAWLS, W. ASCE Journal Of Hydraulic Engineering, New York: ACSE, 1983, 1316 p.

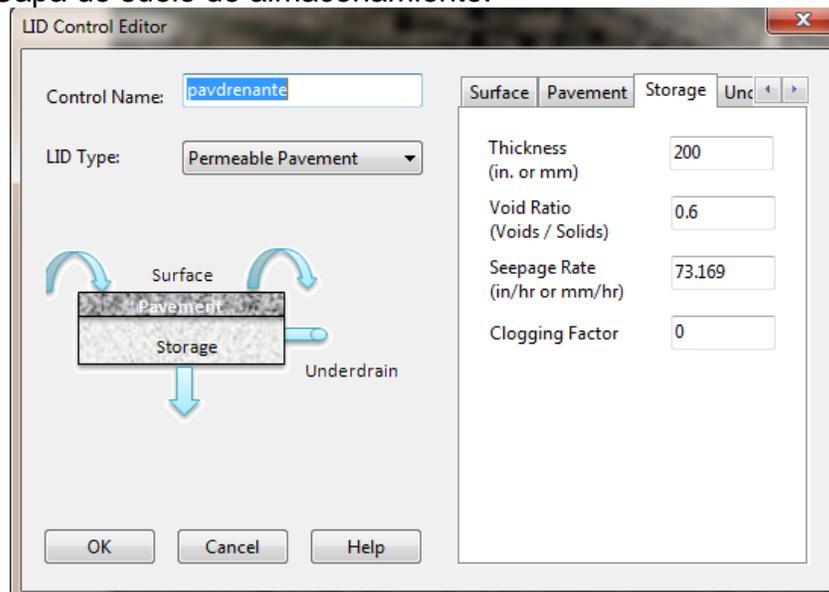
- Almacenamiento. La aplicación de la capa Almacenamiento sirve para describir las propiedades de la grava utilizada en los pavimentos porosos, como fondo de almacenamiento y/o capa de drenaje. De igual forma se utiliza para especificar la altura de un depósito de lluvia.

➤ Altura: Esto es la altura de un depósito pluvial o el grosor de una capa de grava. La piedra triturada y las capas de grava tienen típicamente un espesor de 150 a 450 mm. Asumimos una altura de 20cm.

➤ Relación de vacíos: Volumen de espacios vacíos en relación con el volumen de sólidos en la capa. Valores típicos para lechos de gravas oscilan desde 0,5 a 0,75. . Asumimos un valor de 0,6.

➤ Tasa de infiltración: Es la velocidad a la que el agua se infiltra en el suelo original por debajo de la capa de almacenamiento. Normalmente, esto equivale a la conductividad hidráulica saturada de la cuenca circundante si se está utilizando el método de infiltración Green-Ampt o a la tasa de infiltración mínima para el caso de la infiltración de Horton. tasa de infiltración igual a 73,169mm/h.¹³

Figura 18. Capa de suelo de almacenamiento.



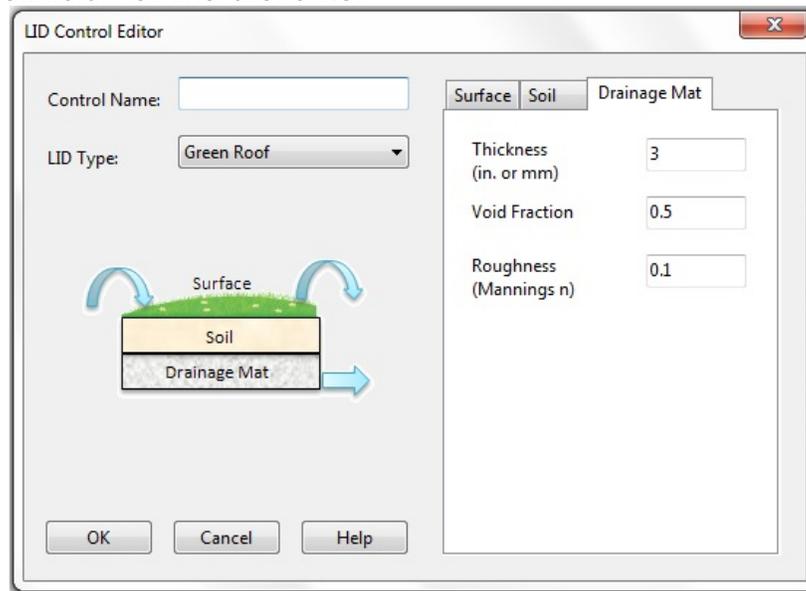
Fuente: Autores.

- Lamina drenante. Esta capa se utiliza para definir la lámina que hay entre el suelo de la cubierta verde y la superficie de la azotea. Su finalidad es drenar el agua que se infiltra a través de la cubierta vegetada.

¹³TRUJILLO LÓPEZ, Alejandra; QUIROZ, Diana Paola. Op., Cit.

- Espesor: Los valores típicos del espesor de esta capa se encuentran entre los 2,5 y los 5 centímetros. Asumimos un espesor de 5,0cm.
- Fracción de vacío: Es el cociente del volumen vacío respecto al volumen total de la capa. El rango típico va de 0,5 a 0,6. Asumimos un valor de 5,0.
- Rugosidad: Constante n de Manning empleada para calcular la tasa de flujo horizontal del agua drenada a través de la capa. Asumimos $n=0.15$ ¹⁴

Figura 19. Definición lamina drenante.



Fuente: Autores.

¹⁴MCCUEN, R. Op. Cit., p. 100.

7. ZONA DE ESTUDIO

7.1 ASPECTOS GEOGRÁFICOS

La zona de estudio hace parte de la localidad de Usaquén la cual está ubicada en el extremo nororiental del distrito capital, es una localidad límite de Bogotá. Usaquén sobresale con elementos importantes de la estructura ecológica principal de Bogotá, entre ellos los cerros orientales y el humedal de Torca, además de múltiples quebradas y ríos que hacen parte del sistema hídrico local y distrital.

7.1.1 Límites. Esta localidad limita al occidente con la Autopista Norte, que la separa de la localidad de Suba; al sur con la calle 100, que la separa de la localidad de Chapinero; al norte con los municipios de Chía y Sopo; y al oriente con el municipio de La Calera.

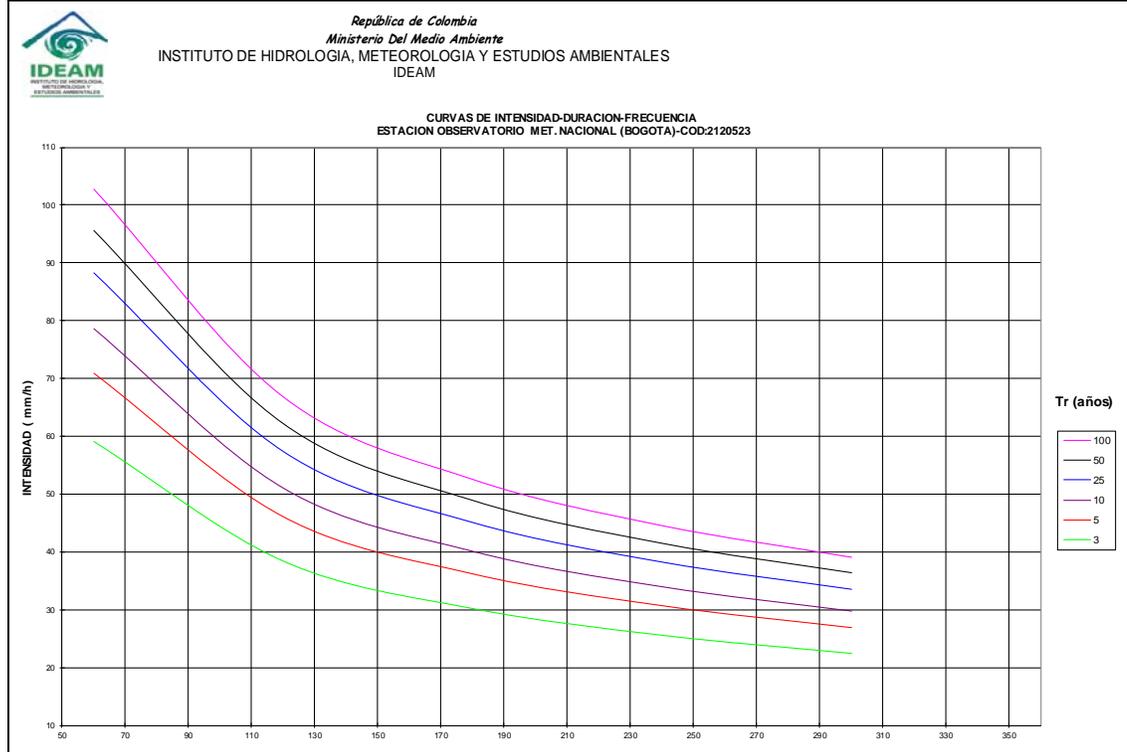
7.1.2 Clima. Como se ha presenciado Bogotá no ha sido ajena al cambio climático global, ya que en los últimos años se han presentado alteraciones climáticas, como aguaceros muy fuertes, que causan inundaciones y granizadas inesperadas en algunas partes de la ciudad. Igualmente se han presentado fenómenos de vientos inusuales que levantan tejados y generan pérdidas económicas. Es de anotar que el área urbana puede presentar entre dos y tres grados más de temperatura que las zonas rurales, debido a la gran masa construida de la ciudad y materiales como concreto y el vidrio que refleja buena parte de la energía solar recibida.

7.1.3 Pluviosidad. Bogotá, situada en el altiplano cundiboyacense, cuenta con lluvia menos de 200 días al año presentando grandes contrastes climáticos entre sitios relativamente cercanos. En Bogotá, por ejemplo, caen alrededor de 1.500 mm anuales de precipitación en las estribaciones de los cerros orientales, mientras que en el sector suroccidental del altiplano caen cerca de 500 mm al año.¹⁵ Los meses de enero y febrero son los más secos y octubre y noviembre los más lluviosos

Con la finalidad de realizar la modelación fue necesario obtener información pluviométrica correspondiente, por parte del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), el cual nos suministró las curvas de intensidad – duración – frecuencia (IDF), de la Estación Observatorio Met. Nacional (Bogotá)-COD. 2120523, para modelar el alcantarillado existente en la zona de estudio de la ciudad de Bogotá.

¹⁵ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Agenda ambiental localidad Usaquén. Bogotá: Alcaldía Mayor De Bogotá, 2009, p. 10.

Figura 20. Curvas IDF Estación Observatorio Met. Nacional



Fuente. IDEAM. Curvas de intensidad-duración-frecuencia estación observatorio meteorológico nacional. Bogotá: IDEAM, 2010.

7.1.4 Temperatura. La Sabana tiene una temperatura promedio de 14°C, que puede oscilar entre los 9 y 22 °C. La temperatura en los meses de diciembre, enero y marzo es alta, siendo normal que en estos meses predominen días secos y soleados, aunque por el cielo despejado se puedan presentar bajas temperaturas en las noches y heladas en las madrugadas. Durante abril y octubre las temperaturas promedio son bajas con variaciones menores. El clima de Usaquén es frío, subhúmedo, con tendencia a la sequía a medida que se avanza en sentido sur y suroeste. La localidad Usaquén tiene una precipitación media anual en un rango próximo de 790 mm; con una humedad relativa en tiempo seco de 68% - 74% una velocidad de viento clasificada como baja de 22 m/seg con variaciones de 1 – 3,9 m/seg.¹⁶

7.1.5 Hidrología. Una de las riquezas de la localidad Usaquén es su potencial hidrológico representado en las zonas de acumulación y regulación hídrica en el área de los páramos hasta el humedal de Torca. Además de la formación de corrientes, estas áreas se encuentran provistas de la biodiversidad relacionada y protectora, esto a su vez hace de suma importancia el manejo y conservación de los ojos o nacederos de agua, su trayecto y su desembocadura, tal como lo resalta

¹⁶ Ibíd., p. 11.

la comunidad. La red de corrientes superficiales hace parte de la cuenca media del río Bogotá, cuenta entre sus límites con:

- El humedal de Torca
- Quebradas de Torca, San Juan, Patino y Aguas Calientes que llegan al humedal de Torca
- Quebrada Soratama que drena al canal río Serrezuela de la calle 170
- Quebradas Arauquita, San Cristóbal y El Cerro que desembocan en el río San Cristóbal

Los anteriores canales, junto con el Canal San Antonio y las quebradas El Cedro y Bosque los Pinos, desembocan en el canal río Torca Las quebradas Contador y Bosque Medina y el río del Norte que llegan al canal río Contador, el cual a su vez descarga al canal río Callejas de la calle 127 junto con las quebradas Callejas, Santa Bárbara y Trujillo. Quebradas Chorrera, Chicó y Pozo Claro que llegan al canal río Molinos. Los canales ríos Callejas y Molinos drenan al humedal Córdoba en la localidad de Suba.¹⁷

7.2 DIVISIÓN POLÍTICA Y ADMINISTRATIVA

La localidad Usaquén fue creada mediante el Acuerdo 26 de 1972, que creó 16 Alcaldías Menores del Distrito Especial de Bogotá. Usaquén tiene una extensión total de 6.531,6 ha, de las cuales 3.525,1 ha se clasifican en suelo urbano, 9,5 ha en suelo de expansión y 2.996,9 ha como suelo rural de protección, que equivalen al 45.88% del total de la superficie de la localidad. Usaquén es la quinta localidad con mayor extensión del Distrito.¹⁰ Está conformada por nueve Unidades de Planeación Zonal (UPZ)

- UPZ 1. Paseo los libertadores
- UPZ 9. Verbenal
- UPZ 10. La Uribe
- UPZ 11. San Cristóbal Norte
- UPZ 12. Toberin
- UPZ 13. Los Cedros
- UPZ 14. Usaquén
- UPZ 15. Country Club
- UPZ 16. Santa Bárbara

7.3 USOS DEL SUELO

El Plan de Ordenamiento Territorial clasifica de manera general el suelo del Distrito Capital en: suelo urbano, suelo urbanizado, por desarrollar y áreas

¹⁷Ibíd., p. 11.

protegidas urbanas, suelos de expansión urbana y suelo rural, áreas protegidas rurales y áreas productivas. En 1994 los usos del suelo se dividieron en dos, por un lado la zona occidental residencial y comercial destinado para venta de servicios y elementos de consumo básico, y por otro lado la zona propuesta para actividades agrícolas a partir de la calle 200.

El suelo urbano del territorio distrital lo constituyen las áreas que, por contar con infraestructura vial, redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, hacen posible la urbanización o edificación". Comprende un total de 3.525,10 ha, de las cuales hay 276,99 ha de áreas protegidas; en este suelo urbano se localizan 533,99 ha de áreas por desarrollar, que son terrenos que no han sido urbanizados. De las nueve UPZ de la localidad, ocho ya fueron reglamentados por el departamento administrativo de planeación distrital:

- UPZ 9. Verbenal. Está conformada por asentamientos humanos de origen ilegal, con uso residencial predominante de estratos 1 y 2, con serias deficiencias de infraestructura, accesibilidad, equipamientos y espacio público.
- UPZ 10. La Uribe. Concentra equipamientos, principalmente educativos, sobre la Avenida San Juan Bosco (Calle 170) y la Avenida Alberto Lleras Camargo (Carrera 7), con baja ocupación. Su potencial paisajístico se conjuga con elementos de la estructura ecológica principal y con las áreas de reserva forestal de los cerros orientales
- UPZ 11. San Cristóbal Norte. Se rige por el tratamiento de mejoramiento integral, aplicable a los asentamientos de origen informal; en esta UPZ se debe apoyar los procesos de producción ecológica que satisfagan necesidades biológicas y contribuyan a su desarrollo sostenible especialmente en los nacimientos de cuerpos de agua y en las zonas declaradas como de alto riesgo no mitigable y/o de amenaza alta del sector oriental, y contribuir al mantenimiento, protección, preservación y consolidación de la zona de manejo y preservación ambiental de la ronda hidráulica de las quebradas, Soratama, Arauquita, San Cristóbal y el Cerro. Además, adelantar acciones para recuperar geomorfológicamente los predios sujetos a desarrollo, adelantar los procesos de reasentamiento requeridos, adecuar y proteger las zonas de riesgo, mantenimiento y generación de parques de escala vecinal y de bolsillo, haciendo énfasis en el Parque Zonal PZ 49 Alta Blanca y el corredor ecológico del canal El Cerro y recuperar como espacio público las rondas y zonas de manejo y protección de los cuerpos de agua privatizados.
- UPZ 12. Toberin. Sector comercial, de estratos 2, 3 y 4. Gira en torno a la centralidad urbana de Unicentro - Santa Bárbara, que está apoyada por núcleos comerciales y de servicios cualificados con características propias de espacio

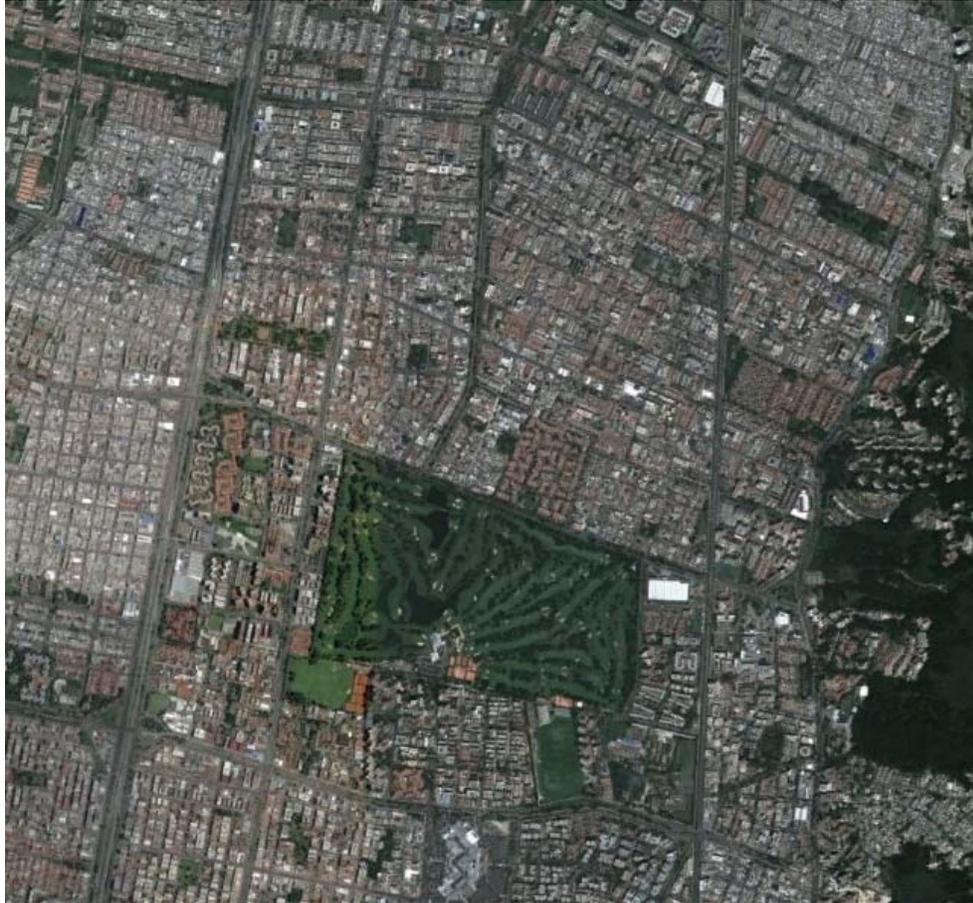
público y con un grado de especialización de sus edificaciones, los usos residenciales predominantes en la zona.

- UPZ 12. Los Cedros. Sector residencial de estratos 4, 5 y 6, con marcado contraste entre el suelo urbano y la zona de reserva de los cerros orientales. Por influencia de la centralidad de Usaquen – Santa Bárbara, requiere ordenar las actividades complementarias al uso de la vivienda y encauzar la densificación de la vivienda sin superar las capacidades de su infraestructura, así como mejorar las condiciones de habitabilidad, mediante la cualificación del espacio público. También se debe preservar y restaurar los elementos del sistema hídrico e incrementar la oferta de espacios arborizados como transformación positiva del territorio.
- UPZ 14. Usaquen. Sector con centralidad urbana, de estratos 5 y 6. Contiene un sector de interés cultural, núcleo fundacional de Usaquen e inmuebles de interés cultural, requiere promover la consolidación urbanística de la centralidad de Usaquen y de su entorno, mejorar los barrios de desarrollo incompleto, conservar las condiciones y calidad de vida de las áreas residenciales y en el núcleo fundacional de Usaquen desarrollar proyectos de recuperación del espacio público, en especial de la plaza, el trazado fundacional y sus calles aledañas, para que soporten las actividades que allí se desarrollen.
- UPZ 15. Country Club. Sector predominantemente dotacional, de estratos 5 y 6, que contiene una zona recreativa deportiva de más de 100 hectáreas (Country Club), que requiere un manejo especial para complementar la centralidad de Unicentro y crear una nueva estructura de espacio público. Debe equilibrar la intensa dinámica comercial de algunos ejes viales.
- UPZ 16. Santa Bárbara. Sector de estratos 5 y 6. Está influenciada por la centralidad Usaquen - Santa Bárbara. Las zonas donde se pueden desarrollar algunos usos comerciales y de servicios de bajo impacto se localizan sobre ejes viales del sector o manzanas comerciales o centros cívicos y no pueden ocupar más del 30% de área del sector normativo.

7.4 LOCALIZACIÓN

El área de trabajo está ubicada está comprendida entre las calles 151 y 127, entre carreras 7 y 45 (autopista norte). Incluyendo así las unidades de planeación zonal los Cedros (UPZ 12), Country Club (UPZ 15) y parte de Usaquen (UPZ 14), como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Localización Zona de estudio.



Fuente: GOOGLE EARTH. Localidad de Usaquen. [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.google.com.co/maps/place/Usaqu%C3%A9n,+Bogotá/@4.7449875,-74.0287975,12z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x8e3f8f805d4e5beb:0x853611c42477c6f>>.

7.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS

La zona de estudio presenta en su mayoría una zona impermeable, debido a que en su mayoría es una zona residencial, la cual presenta un porcentaje mayor al 70% lo que equivale a zonas impermeables, las cuales están representadas por pavimentos flexibles con asfaltos impermeables y pavimentos rígidos construidos por concretos hidráulicos igualmente impermeables que presentan una pendiente para el bombeo del agua que escurre sobre dichas estructuras, se componen por edificaciones que no contienen terrazas ni fachadas verdes para la retención de agua, lo cual indica que están diseñadas únicamente para transportar el agua lluvia que cae sobre estas estructuras a los desagües de agua pluvial para estas a su vez sean transportadas al alcantarillado pluvial, por último el área de estudio

cuenta con parqueaderos que al igual que un pavimento son impermeables y drenan el agua lluvia a sus sistemas de desagües. Por otro lado la zona de estudio tiene áreas impermeables a las cuales le corresponden a parques construidos entre los conjuntos residenciales, cuenta con sardineles que se ubican en la mayoría de las calles del sector aunque su proporción con la zona impermeable no es significativa.

8. METODOLOGÍA

8.1 MODELACIÓN DE LA RED DE ALCANTARILLADO PLUVIAL EXISTENTE

Para realizar la modelación del alcantarillado existente en la zona de estudio, se decidió utilizar el programa de computo EPA SWMM.

Para la realización de la modelación del área de estudio fue necesario obtener información de la red de alcantarillado a simular, con la finalidad de tener como base las condiciones y las especificaciones que tiene el sistema de alcantarillado. De acuerdo a lo mencionado con anterioridad se decidió obtener la información, por medio del sistema de información geográfico unificado empresarial SIGUE de la empresa de acueducto de Bogotá el cual fue utilizado como medio para obtener información geográfica y obtener la asesoría básica para realizar el trazado de la red del alcantarillado de la zona de estudio como lo fue: diámetros de las tuberías, longitud y altura de las mismas, su ubicación, alturas de los posos y finalmente los vertimientos de la red de la zona de investigación.

Figura 22. Red de alcantarillado existente trazado en EPA SWMM.



Fuente: Autores.

El procedimiento realizado para comenzar la simulación inicio con el trazado de las subcuencas (teniendo en cuenta la red de alcantarillado previamente estudiada

con la herramienta del SIGUE de la empresa de acueducto de Bogotá), que hacen parte del sistema de alcantarillado actual, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Trazado de las Subcuencas de la zona de estudio.



Fuente: Autores.

Posteriormente de haber trazado las subcuencas, se procedió a ingresar los datos correspondientes a cada una de las subcuencas de la zona de estudio del alcantarillado en el programa de EPA SWMM, la información que se tuvo en cuenta para las subcuencas fue la siguiente:

- Pluviómetro: El cual contiene la información de la precipitación correspondiente a la Estación Observatorio Met. Nacional (Bogotá).
- Descarga: Es el pozo al cual llega la escorrentía de la subcuenta. Para este caso en la modelación fue el desagüe 1130 (Outfall 1130).
- Área: hace referencia al área de la cuenca dibujada por la cual va escurrir el agua hacia su descarga expresada en hectáreas He, determinada por medio de las herramientas de medición de Google Earth.
- Ancho: tiene en cuenta la longitud medida en metros perpendicular a la dirección por la cual el agua drena hacia su descarga, determinada por medio de las herramientas de medición geográfica de Google Earth.

- Pendiente: es la que se tiene en cuenta como caída del terreno hacia el conducto, determinada por medio de las herramientas de medición del SIGUE de la Empresa De Acueducto De Bogotá.
- Porcentaje de impermeabilidad: el área en porcentaje (%) la cual corresponde a las zonas no verdes como vías, parqueaderos y edificaciones.
- N-imperv: es el número de maning que se tuvo en cuenta para las zonas impermeables que se escogió como $n=0.011$. (Ver Tabla No.2)
- N-perv: hace referencia al número de maning que se tuvo en cuenta para el flujo de la subcuenca en su área permeable. $n=0.15$. (Ver Tabla No.2)
- Las alturas de almacenamiento sobre las áreas permeables e impermeables se obtuvieron de los valores típicos sugeridos.

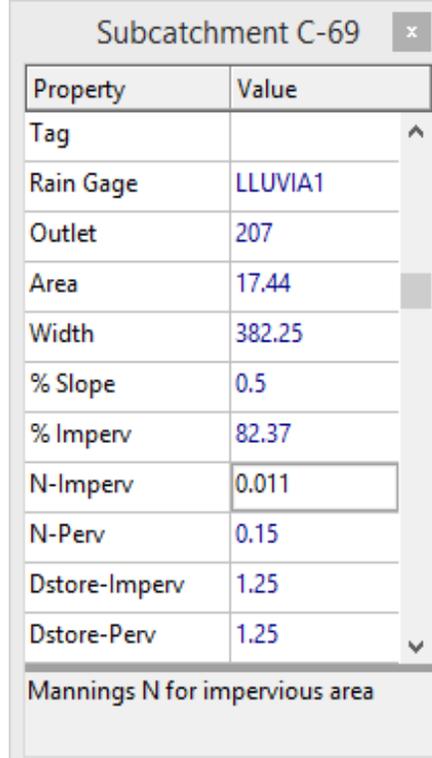
Tabla 4. Valores típicos de almacenamiento.

Valores típicos de Almacenamiento en depresión	
Superficie impermeable	1.25-2.5 mm
Césped o Hierba	2.5-5.0 mm
Pastos y prados	= 5.0 mm
Lecho forestal	= 7.5 mm

Fuente: ACSE. Design & Construction of Urban Stormwater Management System. New York: ACSE, 1992, 45 p.

- Flujo entre sub áreas: se asumió que ambas áreas (permeable e impermeable), aportan directamente a la descarga.
- Porcentaje de flujo: se asumió que la esorrentía entre la subareas de la subcuenca es del 100%.
- Infiltración: se decidido tener en cuenta como método de infiltración el de HORTON.
- Los demás ítems para la subcuenca no aplican para esta zona de estudio.

Figura 24. Parámetros para las Subcuencas.



Property	Value
Tag	
Rain Gage	LLUVIA1
Outlet	207
Area	17.44
Width	382.25
% Slope	0.5
% Imperv	82.37
N-Imperv	0.011
N-Perv	0.15
Dstore-Imperv	1.25
Dstore-Perv	1.25

Mannings N for impervious area

Fuente: Autores.

En el proceso de la modelación digital en el programa EPA SWMM del alcantarillado actual de la zona de estudio, se realizó con la finalidad de verificar las condiciones hidráulicas en las que se encuentra el sector y de esta manera proponer las posibles soluciones, con la tecnología de los SUDS.

De acuerdo al alcantarillado existente diagramado en el programa junto con cada uno de sus elementos definidos, se realizó la modelación y de esta manera poder evaluar las condiciones hidráulicas en la que está trabajando la red de alcantarillado vigente del área de estudio, teniendo en cuenta los datos de precipitación ingresados y de esta forma poder simular una inundación en los pozos de esta zona.

En el momento previo de correr la simulación se verifico que todos los datos introducidos estuvieran correctos y se verifico cuantos elementos se utilizaron para realizar la modelación en lo que se encontró:

- Rain Gages (1 unidad).
- Subcuencas (93 unidades).
- Posos (394 unidades).

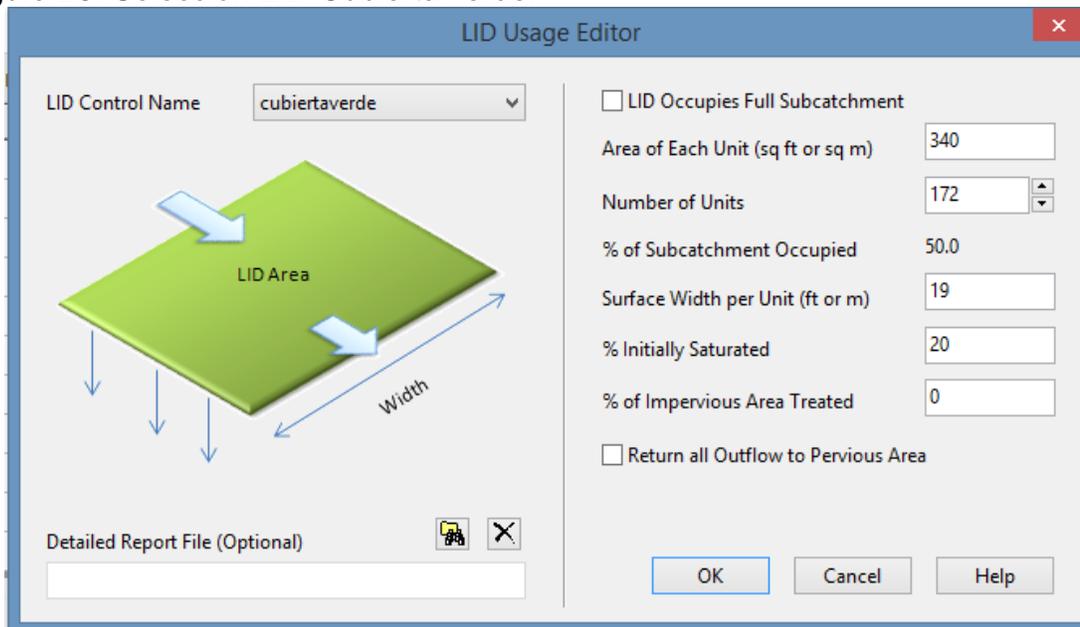
- Outfalls (2 unidades).
- Tuberías (426 unidades).

8.2 MODELACIÓN DE CUBIERTA VERDE

Para realizar la modelación del LID “cubiertas verdes” se realizaron los siguientes pasos:

Seleccionar el tipo de Lid a crear.

Figura 25. Selección LID-Cubierta verde.



Fuente: Autores.

Ingresar los valores correspondientes, para realizar la caracterización de la cubierta verde como lo son:

- Características de la superficie.
- Características del suelo.
- Características de la base drenante.

Figura 26. Parámetros para la Cubierta Verde.

Surface	Soil	Drainage Mat
Berm Height (in. or mm)		50
Vegetation Volume Fraction		0.1
Surface Roughness (Mannings n)		0.24
Surface Slope (percent)		0

Surface	Soil	Drainage Mat
Thickness (in. or mm)		120
Porosity (volume fraction)		0.453
Field Capacity (volume fraction)		0.19
Wilting Point (volume fraction)		0.085
Conductivity (in/hr or mm/hr)		10.92
Conductivity Slope		10.0
Suction Head (in. or mm)		110

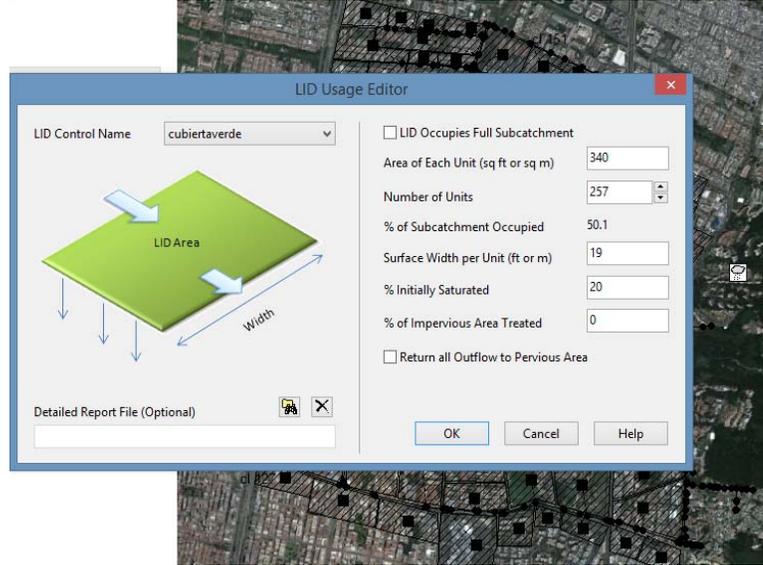
Surface	Soil	Drainage Mat
Thickness (in. or mm)		50
Void Fraction		0.5
Roughness (Mannings n)		0.15

Fuente: Autores.

Posteriormente se aceptaron las características ingresadas para la herramienta LID, y de esta manera asignarla a las cuencas del área de estudio. Con el fin de realizar la asignación del Lid en las cuencas del área de estudio, se procedió a ingresar en el cuadro en el cual se define cada cuenca en la opción de LID CONTROLS la asignación de la cubierta verde, en la que se tuvo en cuenta:

- El área de cada unidad
- La cantidad de unidades para esa cuenca
- El ancho de la superficie por unidad
- El porcentaje de saturación inicial
- El porcentaje del área impermeable tratada

Figura 27. Asignación Cubierta Verde a las Subcuencas.



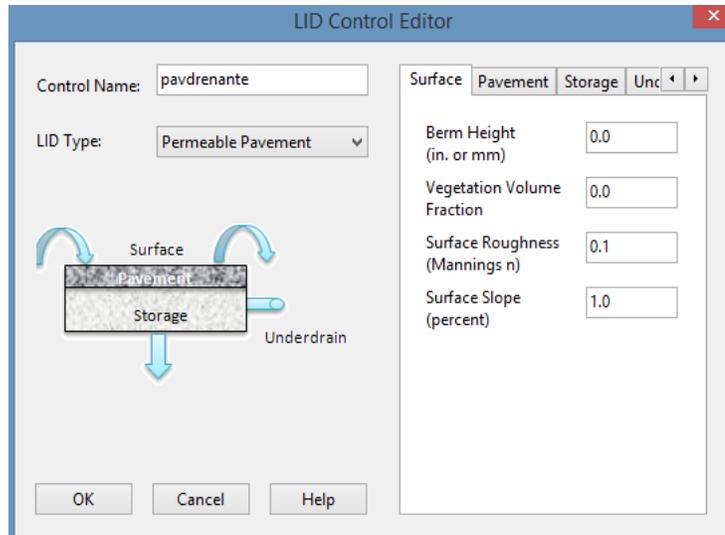
Fuente: Autores.

A continuación se aceptan los parámetros ingresados y se procede a realizar este mismo procedimiento para cada una de las cuencas del área de estudio.

8.3 MODELACIÓN PAVIMENTO PERMEABLE

Para anexar el nuevo LID control para el proyecto, se escogió como nombre “pavdrenante” y escogimos el tipo Lid pavimento permeable.

Figura 28. Selección LID Pavimento Permeable.



Fuente. Autores.

Posteriormente se comenzó a ingresar las características del pavimento permeable como:

- Superficie
- Pavimento
- Almacenamiento
- Drenaje

Figura 29. Parámetros para el Pavimento Permeable.

Panel	Parameter	Value
Surface	Berm Height (in. or mm)	200
	Vegetation Volume Fraction	0.0
	Surface Roughness (Mannings n)	0.011
	Surface Slope (percent)	2.0
Pavement	Thickness (in. or mm)	150
	Void Ratio (Voids / Solids)	0.18
	Impervious Surface Fraction	0
	Permeability (in/hr or mm/hr)	73.69
	Clogging Factor	5.2
Storage	Thickness (in. or mm)	200
	Void Ratio (Voids / Solids)	0.6
	Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	100
	Clogging Factor	0
Underdrain	Flow Coefficient*	0
	Flow Exponent	0.5
	Offset Height (in. or mm)	6

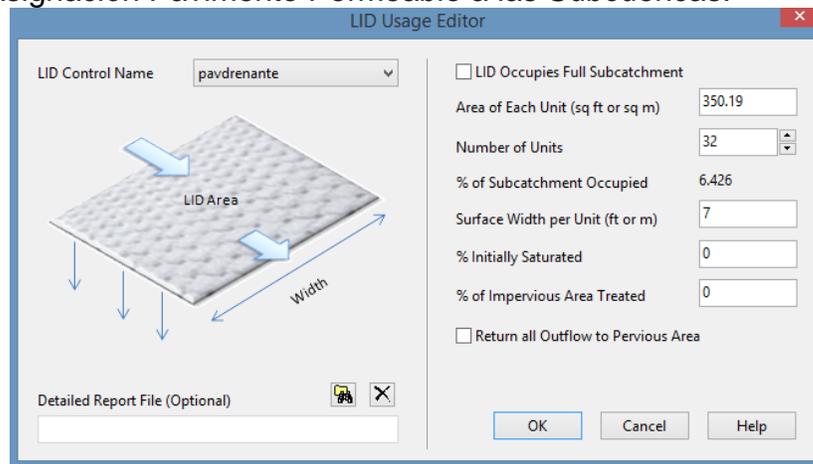
*Units are for flow in either in/hr or mm/hr; use 0 if there is no underdrain.

Fuente: Autores.

Luego de realizar el ingreso de la información, para realizar la caracterización del SUDS, se aceptó la información ingresada para crear este nuevo LID. Para que el

programa tome en cuenta este nuevo Lid creado fue necesario asignar a cada una de las subcuencas, con cierta información para determinar el impacto sobre la misma.

Figura 30. Asignación Pavimento Permeable a las Subcuencas.



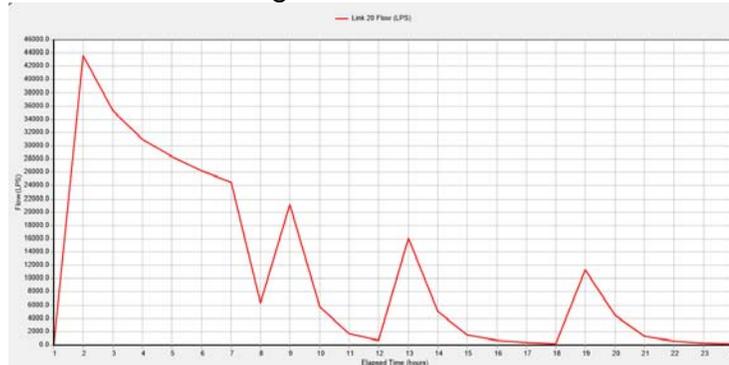
Fuente: Autores.

9. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

9.1 MODELACIÓN RED EXISTENTE

Al verificar la tubería para desagüe, se pudo observar que se presentan cuatro picos en la modelación, el primero a las dos horas, el segundo a las nueve horas, el tercero a las trece horas y el último a las diez y nueve horas. La segunda hora es la que más se inunda, posteriormente el flujo comienza a disminuir.

Figura 31. Caudal tubería de desagüe modelación sin herramientas LID`s.



Fuente: Autores.

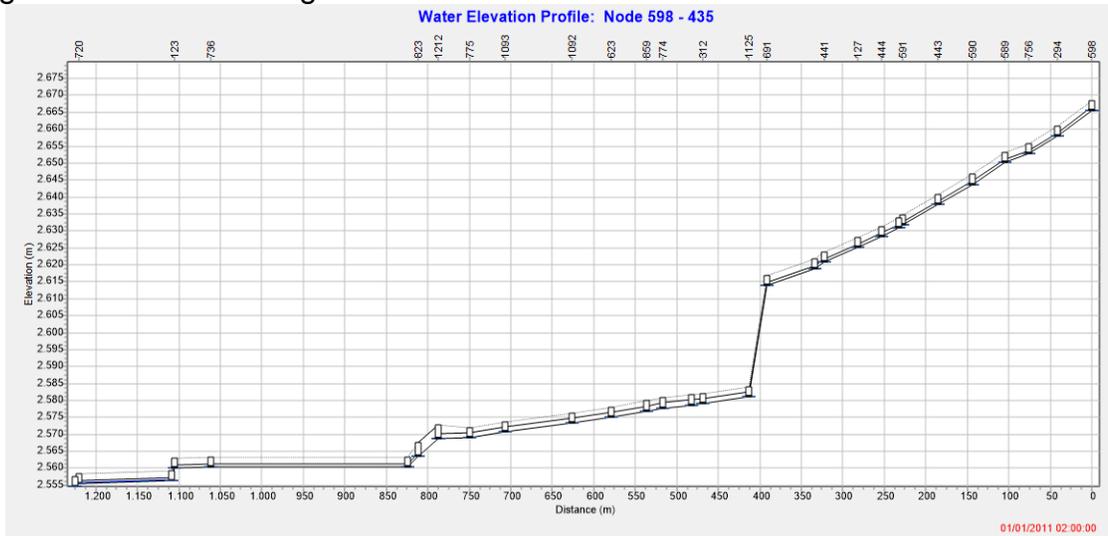
Se realiza una verificación de la cantidad de nodos inundados en la segunda hora de la simulación ya que en esta hora se presenta el pico más alto de caudal en el cual se encontraron 41 nodos inundados.

Figura 32. Nodos inundados modelación sin herramientas LID`s.



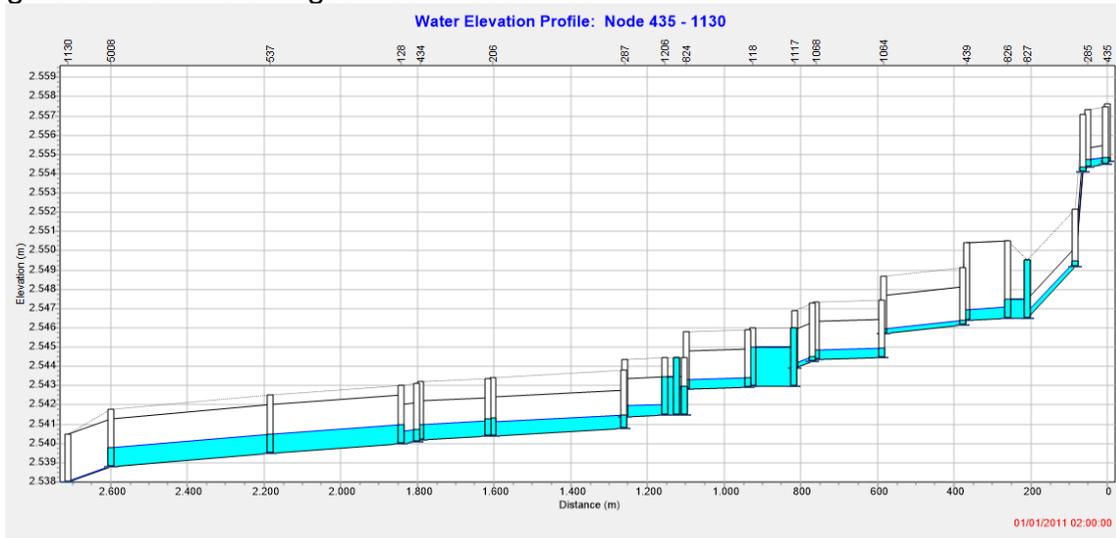
Fuente: Autores.

Se decidió verificar el comportamiento del perfil del nodo 598 -1130(outfall) en el cual verificamos la inundación de los mismos
 Figura 33. Lámina de agua nodos 598-435.



Fuente: Autores.

Figura 34. Lámina de agua nodos 598-1130.



Fuente: Autores.

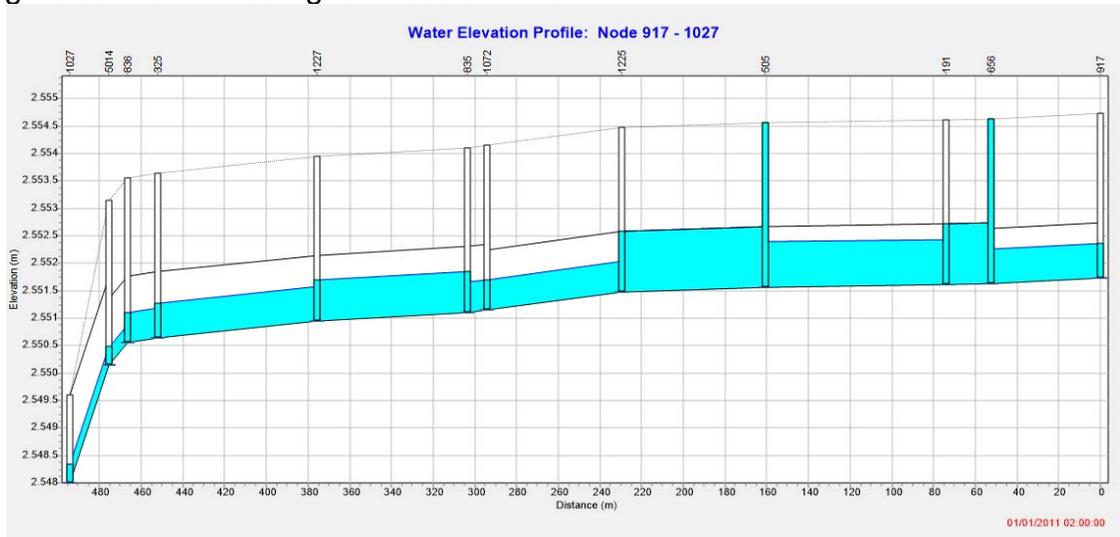
De acuerdo a lo anterior podemos verificar que las inundaciones para este tramo se están ocasionando en la parte occidental de la zona de estudio.

La modelación se realizó en un periodo de tiempo de 24 horas con intervalos de una hora, en el que se observó que las precipitaciones presentan varios picos y el mayor de ellos es en la segunda hora de la simulación.

En la hora en la cual se presenta mayor intensidad se observa que la capacidad de los pozos j-827, j-1117, j-205, no es suficiente para el drenaje del desagüe del agua, por ende el comportamiento de este alcantarillado no es el deseable por el desbordamiento de los pozos.

Se procedió a realizar el mismo análisis para el segundo desagüe de la zona de estudio, el cual desagua una cantidad mucho menor de pozos.

Figura 35. Lámina de agua nodos 917-1027.



Fuente: Autores.

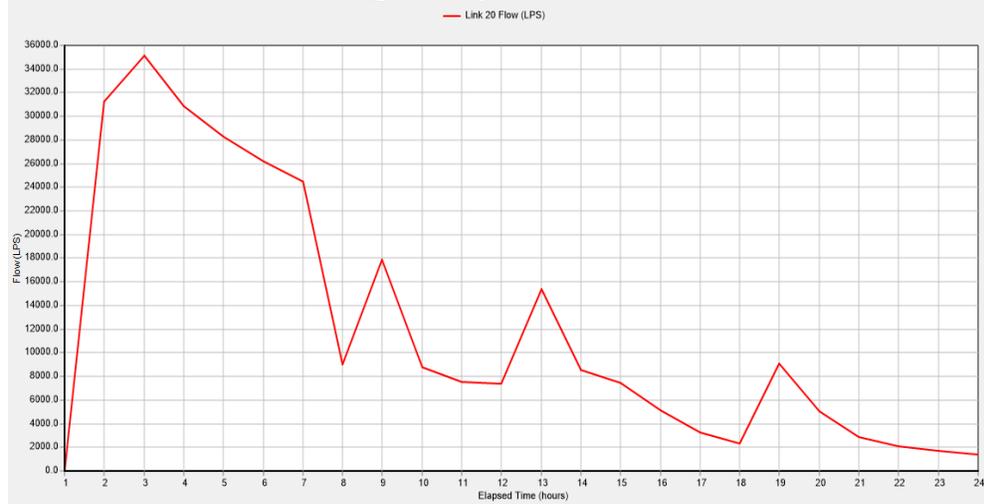
La figura anterior está representando la modelación de la lámina comprendida entre el pozo 1027-917(outfall), como en el anterior tramo analizado, la hora en la que se presenta mayor inundación es la segunda hora.

En la mencionada hora de inundación se observa que la capacidad de los pozos j-656 y j-505, no cumplen con su funcionamiento de desaguar el agua efectivamente, debido a que se está produciendo reboce en cada uno de ellos, lo cual no es deseado en el alcantarillado pluvial.

9.2 MODELACIÓN RED EXISTENTE EMPLEANDO CUBIERTAS VERDES

Al verificar la tubería para desagüe, se pudo observar que la gráfica (Imagen No.31) representa diferencias en cuanto a su comportamiento con respecto a la gráfica generada (Imagen No.36), por el área de estudio sin aplicarle algún tipo de lid, como por ejemplo: el nivel de flujo disminuyó, al igual que las pendientes de la gráfica, lo que significa que los cambios en el flujo son menos bruscos y los tiempos de retención aumentaron. Aunque siguen siendo cuatro picos de la gráfica, todos representan un flujo mucho menor, en comparación al modelo anterior.

Figura 36. Caudal tubería de desagüe empleando cubiertas verdes.



Fuente: Autores.

Se logra observar una gran disminución en los pozos inundados ya que para esta simulación se redujeron a un total de 19 nodos inundados en comparación a los 41 nodos inundados en el modelo sin ninguna herramienta LID.

Este análisis se realizó en la tercera hora de la modelación, ya que al implementar las cubiertas verdes, causo un cambio en esta hora pico en la que se produce el mayor flujo.

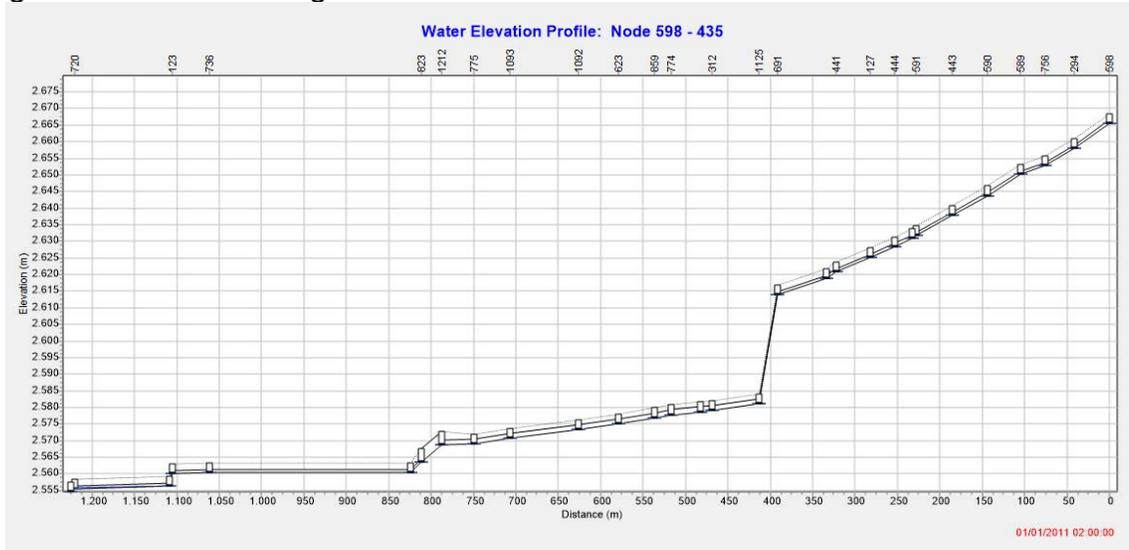
Figura 37. Nodos inundados empleando cubiertas verdes.



Fuente: Autores.

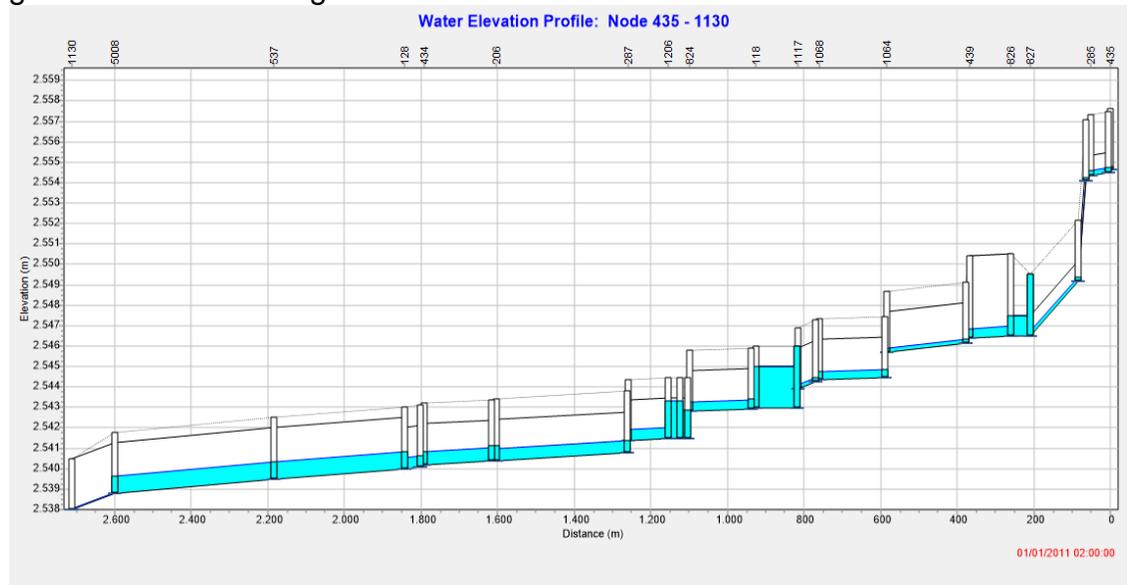
Se decidió verificar el comportamiento del perfil del nodo 598 -1130 (Outfall) en el cual verificamos la inundación de los mismos

Figura 38. Lámina de agua nodos 598-436 con cubiertas verdes.



Fuente: Autores.

Figura 39. Lámina de agua nodos 435-1130 con cubiertas verdes.



Fuente: Autores.

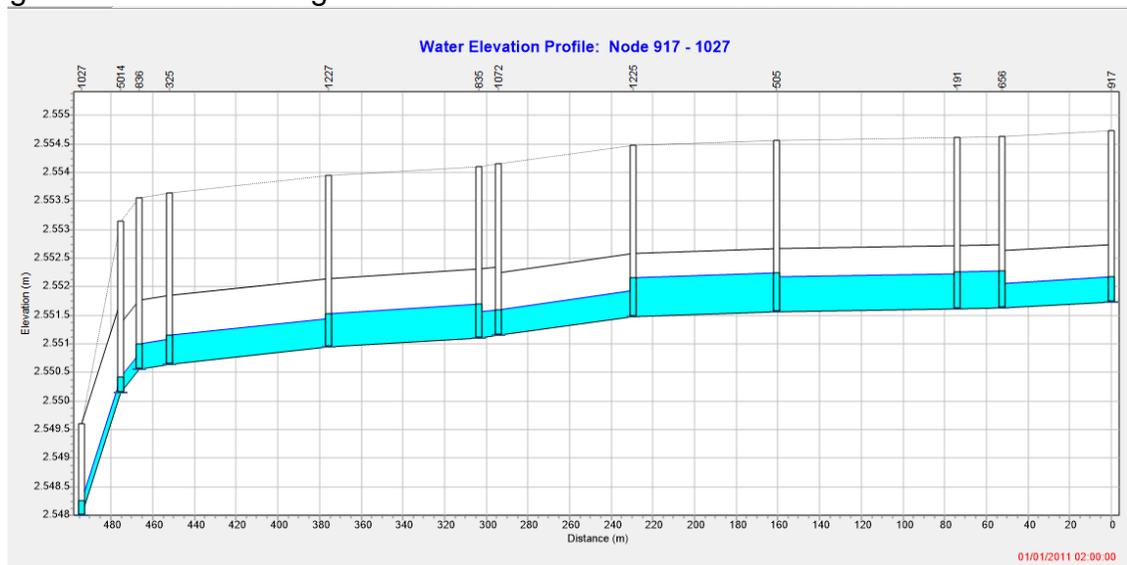
De acuerdo a lo anterior podemos verificar que las inundaciones para este tramo se están ocasionando en la parte occidental de la zona de estudio.

La modelación se realizó en un periodo de tiempo de 24 horas con intervalos de una hora, en el que se observó que las precipitaciones presentan varios picos y el mayor de ellos es a la tercera hora de la simulación.

En la hora pico se observa que la capacidad de los pozos j-827, no es suficiente para el drenaje del desagüe del agua, por ende el comportamiento de este alcantarillado no es el deseable ya que se produce un desbordamiento de los pozos.

Se procedió a realizar el mismo análisis para el segundo desagüe de la zona de estudio, el cual desagua una cantidad mucho menor de pozos.

Figura 40. Lámina de agua nodos 917-1027 con cubiertas verdes.



Fuente: Autores.

En la imagen anterior está representando la modelación de la lámina comprendida entre el pozo 1027-917(outfall), como en el anterior tramo analizado el mayor pico de inundación es presentado en la tercera hora de la simulación.

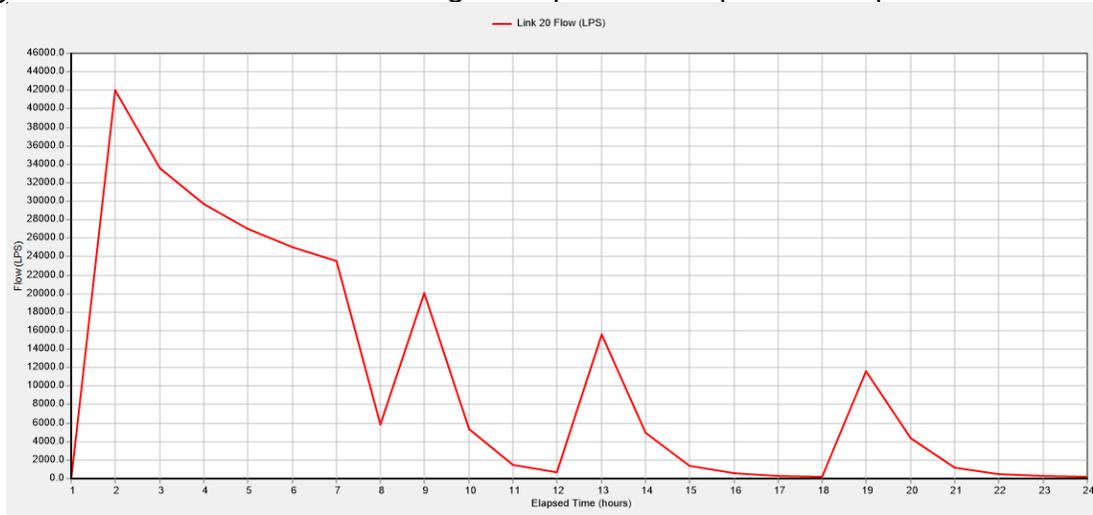
En el mencionado instante de inundación se observa que la capacidad de los pozos implementando las cubiertas verdes, cumplen con su funcionamiento de desaguar el agua, ya que no se está produciendo desbordamiento en los pozos, lo cual es lo deseado en el alcantarillado pluvial.

9.3 MODELACIÓN RED EXISTENTE EMPLEANDO PAVIMENTO PERMEABLE

Al verificar la tubería para desagüe, se pudo observar, que el SUDS propuesto como pavimento permeable, causa un cambio en el comportamiento de la gráfica (Figura 41 vs. Figura 42), aunque los tiempos de retención son muy similares, el

flujo de agua disminuye considerablemente, aunque es de resaltar, que no es tal el impacto como las cubiertas verdes, pero aun así el cambio es notable.

Figura 43. Caudal tubería de desagüe empleando un pavimento permeable.



Fuente: Autores.

Se presentan 38 nodos inundados en la segunda hora de la simulación. Se puede observar, que la disminución de pozos inundados utilizando el pavimento permeable en comparación con el área de estudio sin tratar con alguna tecnología SUD es muy baja, pero sin embargo si está contribuyendo en aliviar el alcantarillado pluvial.

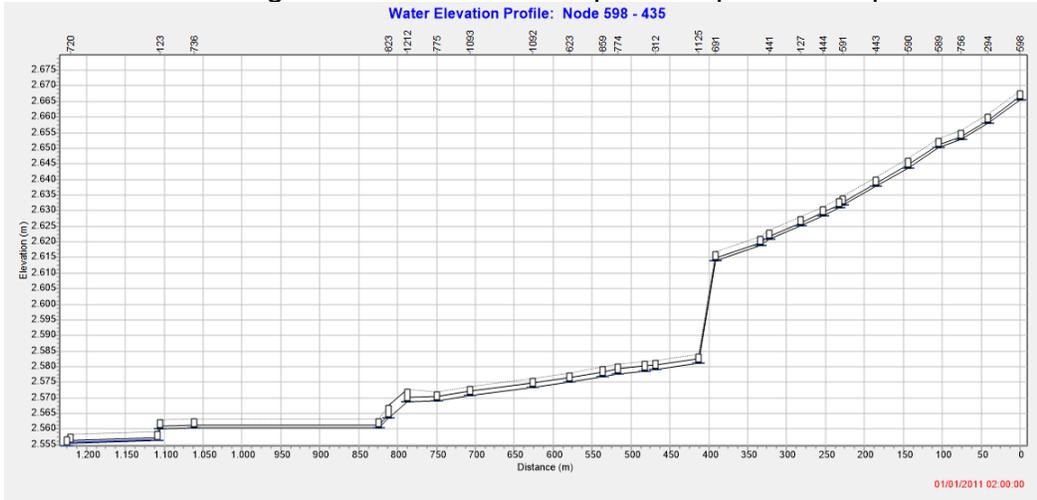
Figura 44. Nodos inundados empleando pavimentos permeables.



Fuente: Autores.

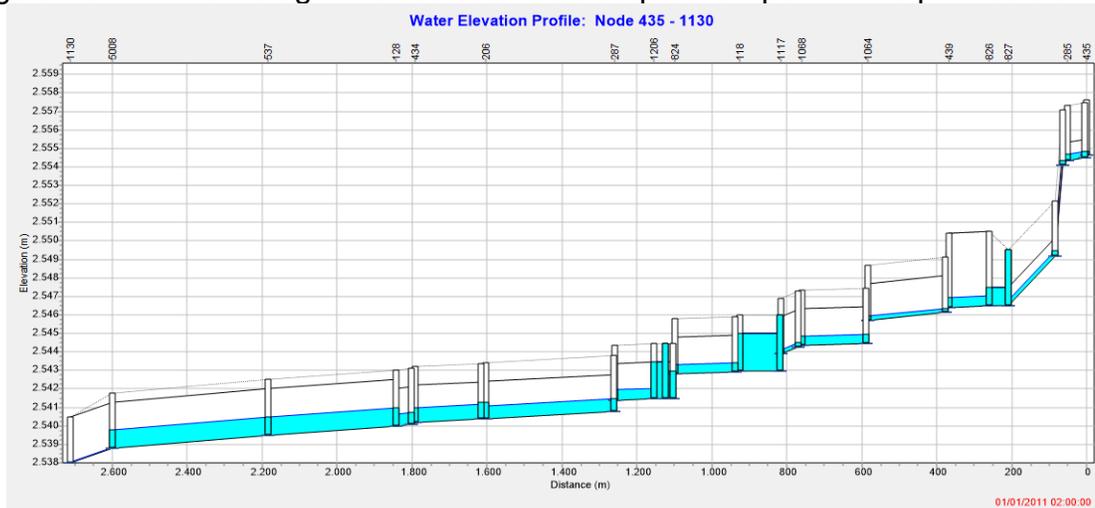
Se decidió verificar el comportamiento del perfil del nodo 598 -1130 (Outfall) en el cual verificamos la inundación de los mismos

Figura 45. Lámina de agua nodos 598-436 empleando pavimento permeable.



Fuente: Autores.

Figura 46. Lámina de agua nodos 435-1130 empleando pavimento permeable.



Fuente: Autores.

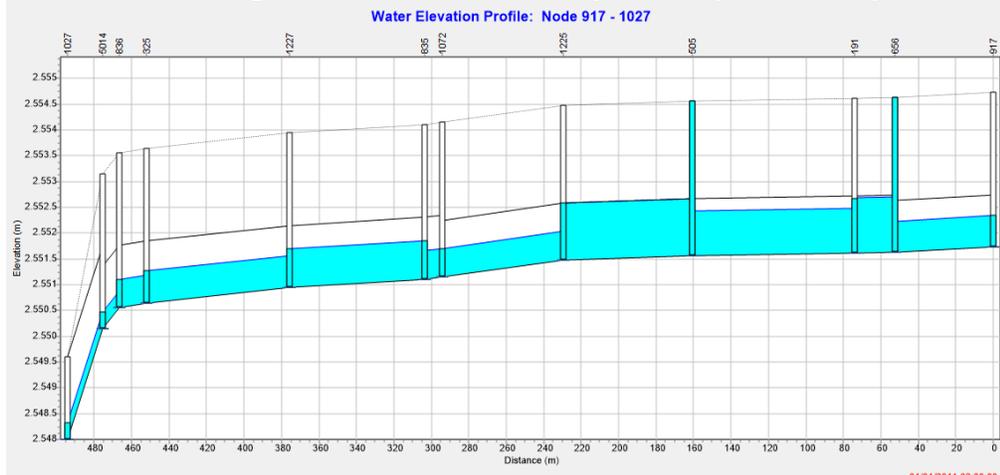
De acuerdo a lo anterior podemos verificar que las inundaciones para este tramo se están ocasionando en la parte occidental de la zona de estudio de igual manera como sucedió en la primera modelación si aplicar ninguna herramienta LID.

La modelación se realizó en un periodo de tiempo de 24 horas con intervalos de una hora, en el que se observó que las precipitaciones presentan varios picos y el mayor de ellos es a la segunda hora de la simulación.

En la hora pico de la segunda hora se observa que la capacidad de los pozos j-827, j-1117, j-205, no es suficiente para el drenaje del desagüe del agua, por ende el comportamiento de este alcantarillado no es el deseable por el desbordamiento de los pozos.

Se procedió a realizar el mismo análisis para el segundo desagüe de la zona de estudio, el cual desagua una cantidad mucho menor de pozos.

Figura 47. Lámina de agua nodos 917-1027 empleando pavimento permeable.



Fuente: Autores.

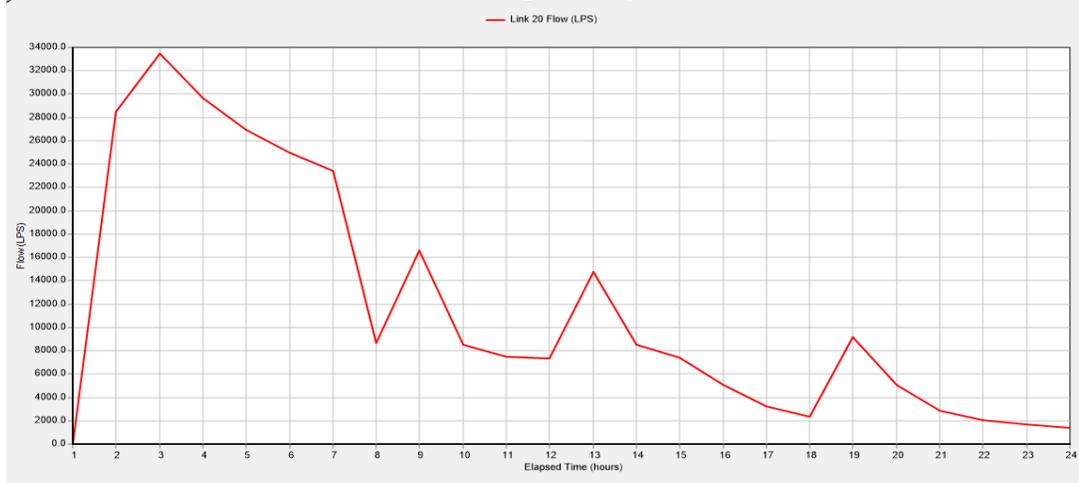
La imagen anterior está representando la modelación de la lámina comprendida entre el pozo 1027-917 (Outfall), como en el anterior tramo analizado el mayor pico de inundación es en la segunda hora.

En el mencionado instante de inundación se observa que la capacidad del pozo j-505, no cumple con su funcionamiento de desaguar el agua, ya que se está produciendo un rebose, lo cual no es deseado en el alcantarillado pluvial. Cabe destacar que ya no se están inundando dos pozos como sucedía en la primera modelación (sin LID), ya que el pozo j-656, tiene niveles altos de lámina de agua, pero no alcanza los niveles de lámina como lo hace el pozo j-505.

9.4 MODELACIÓN RED EXISTENTE EMPLEANDO CUBIERTAS VERDES Y PAVIMENTOS PERMEABLES

Al verificar la tubería para desagüe, se pudo observar que el comportamiento, es muy similar al que se produce con la implementación de cubiertas verdes, pero el impacto al utilizar las dos técnicas SUDS o herramientas LID's, frente al área de estudio sin realizarle la implementación de la tecnología es muy notable; ya que el flujo disminuyó de 44000 LPS (aproximadamente) a unos casi 34000 LPS con tiempos de retención mucho mayores.

Figura 48. Caudal en la tubería de desagüe empleando ambas herramientas LID's.



Fuente: Autores.

Se presentan 18 nodos inundados en la segunda hora de la simulación en comparación con 41 nodos inundados en el mismo periodo de simulación, para la zona de estudio sin ninguna técnica LID.

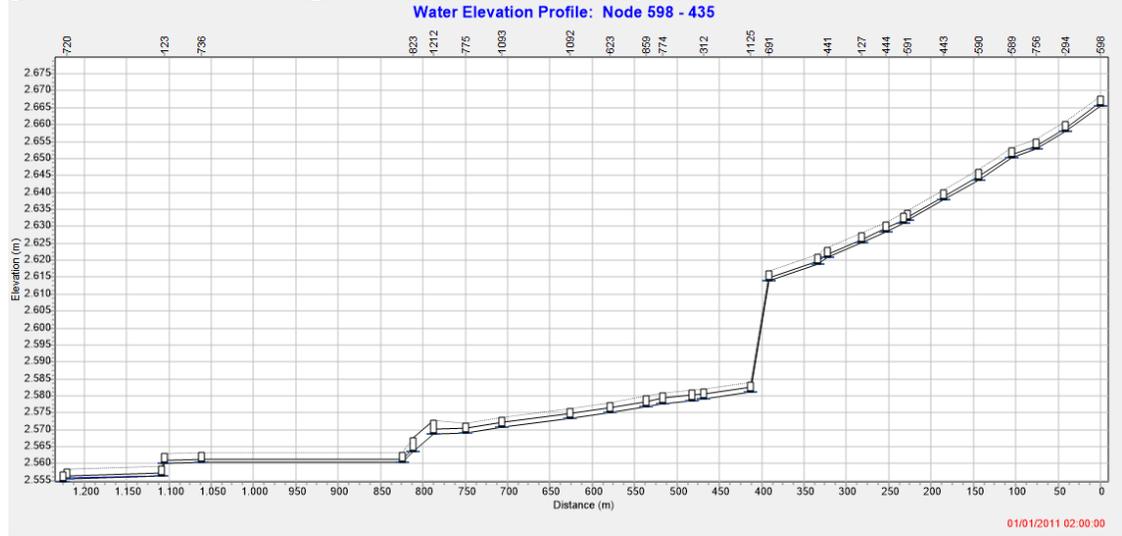
Figura 49. Nodos inundados empleando ambas herramientas LID's.



Fuente: Autores.

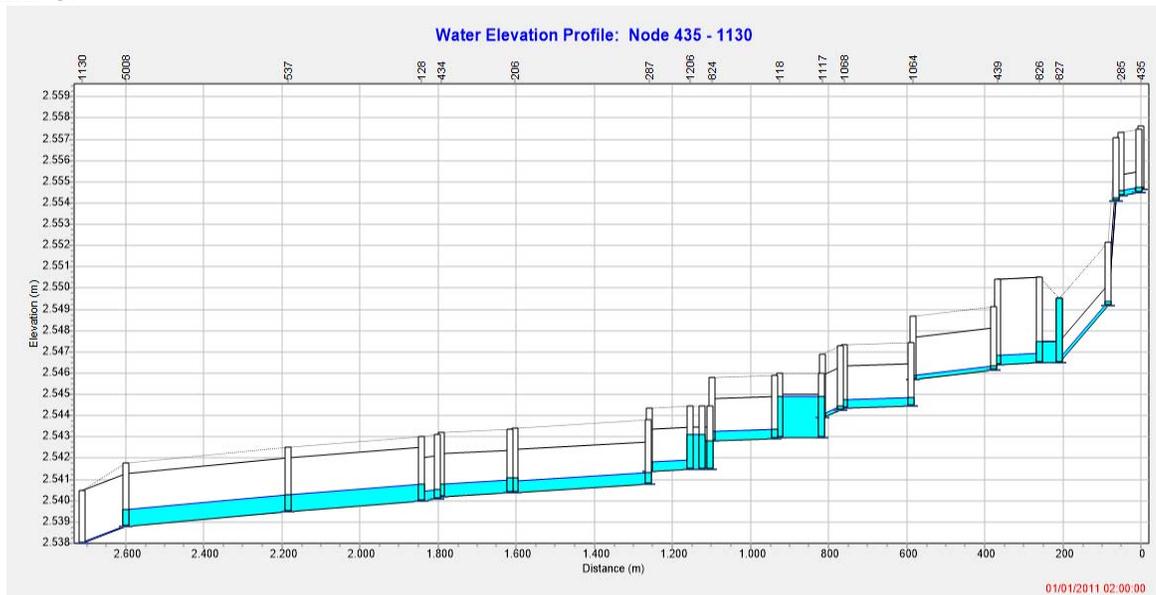
Se decidió verificar el comportamiento del perfil del nodo 598 -1130(outfall) en el cual verificamos la inundación de los mismos

Figura 50. Lámina de agua nodos 598-435 empleando ambas herramientas LID's.



Fuente: Autores.

Figura 51. Lámina de agua nodos 435-1130 empleando ambas herramientas LID's.



Fuente: Autores.

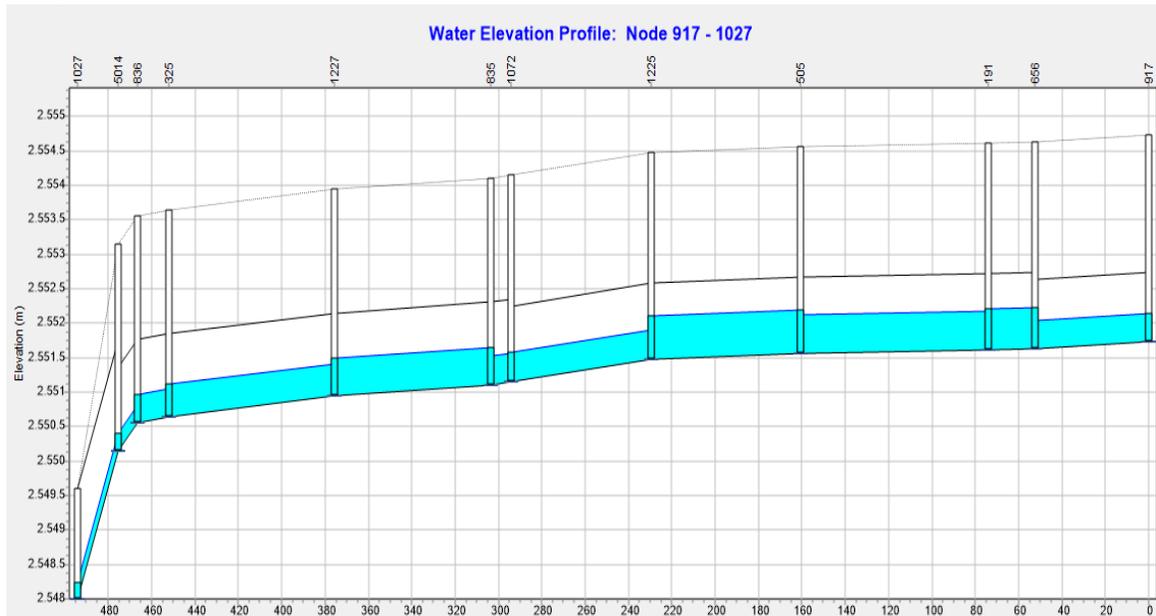
De acuerdo a lo anterior podemos verificar que las inundaciones para este tramo se están ocasionando en la parte media occidental de la zona de estudio.

La modelación se realizó en un periodo de tiempo de 24 horas con intervalos de una hora, en el que se observó que las precipitaciones presentan varios picos y el mayor de ellos es a la segunda hora de la simulación.

En la hora pico de la segunda hora se observa que la capacidad del pozo j-827, no es suficiente para el drenaje del desagüe del agua, por ende el comportamiento de este alcantarillado no es el deseable por el desbordamiento de los pozos. Por otro lado los pozos, j-1117, j-205, ya no se inundan incorporando la tecnología SUD.

Se procedió a realizar el mismo análisis para el segundo desagüe de la zona de estudio, el cual desagua una cantidad mucho menor de pozos.

Figura 52. Lámina de agua nodos 917-1027 empleando ambas herramientas LID's.



Fuente: Autores.

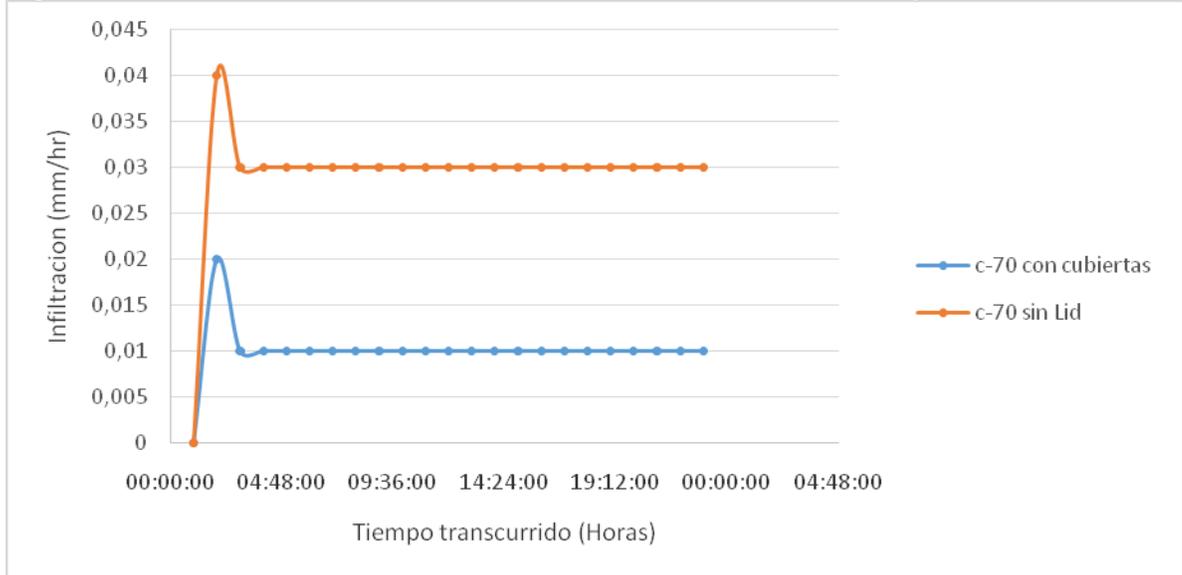
La imagen anterior está representando la modelación de la lámina comprendida entre el pozo 1027-917(outfall), como en el anterior tramo analizado el mayor pico de inundación es en la segunda hora.

En el mencionado instante de inundación se observa que la capacidad de los pozos cumplen con su funcionamiento de desaguar el agua, ya que no se está produciendo reboce en cada uno de ellos, lo cual no es deseado en el alcantarillado pluvial. Cabe destacar que el nodo que se inundaba con anterioridad ya no lo hace, con la implementación de las tecnologías SUDS).

9.5 ANÁLISIS CUENCA NO. 70

Se decidió realizar un análisis a una cuenca en específico, la cual presentara un gran porcentaje de edificaciones, para realizar una comparación de la modelación antes y después de utilizar cubiertas verdes como propuesta de SUDS.

Figura 53. Análisis de la cuenca No. 70 con herramientas LID's y sin LID's.



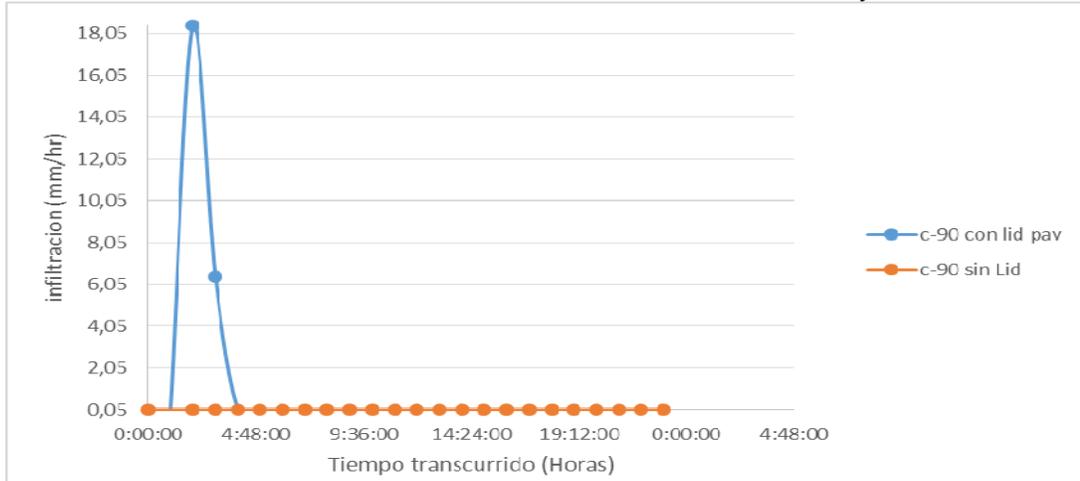
Fuente: Autores.

De la anterior grafica se puede observar que el comportamiento de la infiltración es muy similar en cuando a que en las primeras horas de la modelación se presenta una gran infiltración luego esta se reduce y permanece constante hasta la última hora de la modelación, esto se debe a que cuando se satura el sistema y este ya retiene la mayor cantidad de agua que le sea posible, deja de infiltrar con la misma intensidad; por otra parte se puede verificar que la infiltración en la modelación sin la implementación de las cubiertas verdes es mayor que cuando se realiza la simulación con la técnica, una causa de ello es que gran parte del agua que se estaba infiltrando deja de serlo para ir directamente a la zona del suelo de la técnica Lid y ser retenida allí, otra parte del agua queda en la superficie de las cubiertas que luego es eliminada por el fenómeno de la evapotranspiración.

9.6 ANÁLISIS CUENCA NO. 90

Se decidió realizar un análisis a una cuenca en específico, la cual presentara un gran porcentaje de pavimento en la superficie, por ende se escogió la cuenca en la cual se encuentra el centro comercial Unicentro, el cual contiene una importante área de parqueaderos, en la cual se desarrollaría muy bien el LID de pavimento permeable, posterior a esto se comparó el resultado de las graficas.

Figura 54. Análisis de la cuenca No. 70 con herramientas LID's y sin LID's.

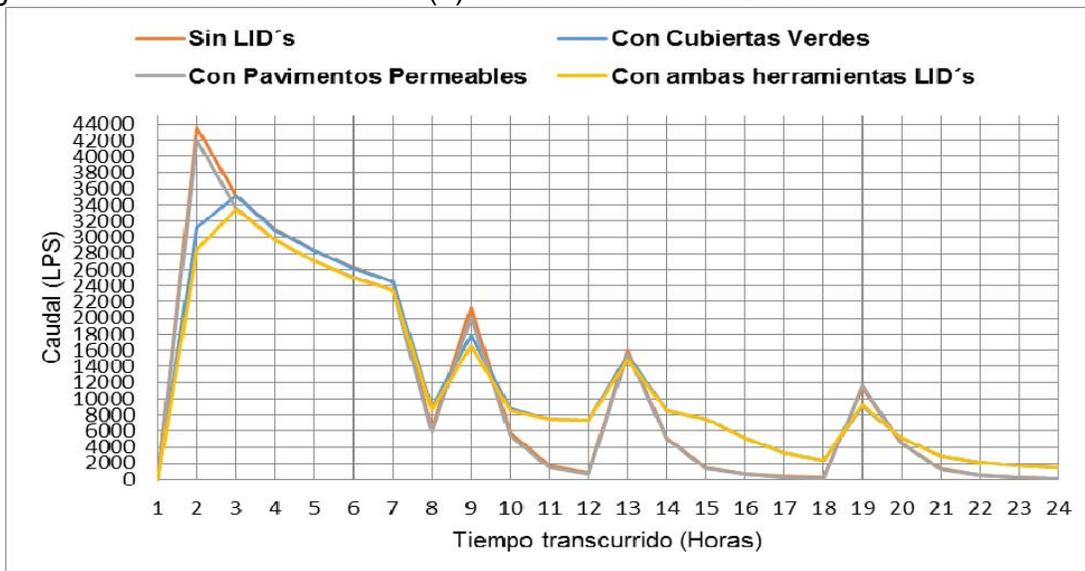


Fuente: Autores.

Como podemos observar en las gráficas la diferencia entre la cuenca sin la aplicación de Lids en contra parte a la implementación de la misma, verificamos que la diferencia entre las dos modelaciones es muy importante, debido a que al no presentar la implementación, se puede notar que la infiltración en la zona es muy baja y es constante en transcurso de la modelación, lo que al contrario el pavimento permeable causa un gran impacto en el transcurso de la modelación, teniendo el auge de este de este modelo en las primeras horas transcurridas del modelo, seguido de una infiltración constante en el resto del modelo.

9.7 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS EJECUTADOS

Figura 55. Análisis de las cuatro (4) modelaciones realizadas.



Fuente: Autores.

En la anterior imagen se puede ver la comparación, con el caudal producido en el transcurso de la modelación, presentando los cuatro escenarios, planteados:

- Cuencas sin herramientas LID's
- Cuencas solo con Cubiertas Verdes.
- Cuencas solo con Pavimentos Permeables.
- Cuencas con las dos herramientas LID's

Realizando un análisis de las gráficas, se pudo determinar que hay un cambio muy significativo, entre el modelo ejecutado sin herramientas LID's, en comparación con la ejecución del modelo aplicando las dos propuestas de LID's, de esta forma se puede recomendar la implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), en Bogotá.

- Segunda y tercera hora del modelo.

Para las tres primeras horas podemos verificar que el caudal ha disminuido en un porcentaje significativo, representando una disminución en la hora pico de inundación, por otra parte se puede observar que en el momento de aplicar cubiertas verdes junto con los pavimentos drenantes la hora de inundación cambia a ser de la segunda hora a la tercera hora; a continuación se presenta una tabla la cual presenta una estimación en la disminución del caudal en las tres primeras horas.

Tabla 5. Comparación en la reducción de caudal con la implementación de SUDS.

COMPARACIÓN	REDUCCIÓN DE CAUDAL
SIN LID's VS. CUBIERTAS VERDES	20%
SIN LID's VS. PAVIMENTO DRENANTE	4.6%
SIN LID'S VS. PROPUESTAS LID's	23.2%

Fuente: Autores.

Como se informó con anterioridad, además de la disminución, del caudal debido a la capacidad de almacenamiento de las propuestas LID's el tiempo de retención aumento y los cambios entre bruscos entre zonas inundadas y no inundadas son menores.

9.7.1 Tercera a décima hora. El comportamiento del caudal en estas horas es muy similar en los cuatro escenarios realizados, no hay mayor relevancia en este lapso de tiempo, sin embargo es pertinente aclarar que la aplicación de los LID's si genera una disminución en el caudal en comparación a la zona sin aplicación de alguna tecnología.

Como se informó con anterioridad, además de la disminución, del caudal debido a la capacidad de almacenamiento de las propuestas LID's el tiempo de retención

aumento y los cambios entre bruscos entre zonas inundadas y no inundadas son menores.

9.7.2 Décima a décima octava hora. Es interesante el comportamiento del caudal en este lapso de tiempo, ya que la aplicación de las técnicas LID's representan un aumento en el caudal, lo que quiere decir que el caudal que había disminuido en las primeras horas, fue trasladado en las siguientes horas, lo cual es bueno porque el caudal es más continuo en el transcurso de la simulación, sin presentar grandes cambios que puedan causar inundaciones en los pozos.

9.7.3 Décima octava a vigésima cuarta hora. Nuevamente el caudal con la implementación de las técnicas LID's disminuye en referencia al área sin la utilización de las técnicas, de ante mano esto solo sucede hasta la hora "19" de la simulación, posteriormente en la hora "20" el caudal con la implementación de las dos técnicas es mayor que el caudal presentado con los demás escenarios simulados, esto sucede hasta la hora final de la simulación.

10. CONCLUSIONES

- El proceso para realizar la modelación es sencillo, y es muy práctico en el momento de construir los escenarios, y de esta forma correr la simulación de cada uno de los escenarios y verificar los resultados arrojados por el programa.
- Como metodología empleada la modelación digital es una excelente herramienta, que permite modelar diferentes escenarios, y de esta forma tener una perspectiva más clara referente a lo que se quiere comparar al momento de elaborar una evaluación de las alternativas implementadas en el sistema de drenaje.
- Con la implementación de las alternativas propuestas para el sistema de drenaje, el caudal del sistema es más uniforme, evitando que el caudal pico se presente solo en unas horas y en otras el sistema funcione a su mínima capacidad.
- Los pozos inundados son menores al realizar la modelación con las alternativas LID's, esto se debe a que los pavimentos permeables infiltran una cantidad al suelo y los techos verdes retienen el agua por un determinado tiempo, aliviando el caudal presentado en el sistema.
- Se pudo identificar que los tiempos de retención son mucho más altos con la implementación de SUDS, lo que permite beneficiar la zona occidental del sistema de alcantarillado de la ciudad de Bogotá, previniendo que todo el caudal se acumule allí, causando inundaciones indeseables.
- Se puede recomendar la implementación de los SUDS en la zona de estudio, ya que esta es una zona compuesta por una gran cantidad de edificaciones a las cuales se les puede implementar los techos verdes, y contiene variedad de parqueaderos, como los del centro comercial Unicentro en el cual se pueden implementar los pavimentos drenantes, que causarían gran impacto en el sistema de alcantarillado pluvial.
- Un problema que podría presentarse en el momento de querer realizar la implementación de esta tecnología es la inversión, para construir estas tecnologías sobre zonas ya construidas. En ese caso la empresa de acueducto de Bogotá, debería implementar una estrategia con el fin de incentivar a la población para promover la incorporación de estas tecnologías.

BIBLIOGRAFÍA

ABELLÁN, Ana. Contaminantes en las aguas de escorrentía urbana. [En línea]. Bogotá [citado: 05, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajurbanosostenible.org/calidad/contaminantes-en-las-aguas-de-escorrentia-urbana/>>

ABELLÁN, Ana. Ingeniería “Hard” versus Ingeniería “Soft”. [En línea]. Bogotá [citado: 25 de Marzo del 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajurbanosostenible.org/general/ingenieria-hard-vs-ingenieria-soft/>>

------. Representación de los TDUS en SWMM. [En línea]. Bogotá [citado: 30, mar., 2015], Disponible en Internet: <URL: <http://drenajurbanosostenible.org/general/representacion-de-las-tdus-en-swmm/>>

------. Situación de los SUDS. [En línea]. Bogotá [citado: 05, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajurbanosostenible.org/general/situacion-de-los-suds/>>

------. Tipos de superficies permeables. [En línea]. Bogotá [citado: 28 de, Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://drenajurbanosostenible.org/pavimentos-permeables/tipos-superficies-permeables/>>

ACSE. Design & Construction of Urban Stormwater Management System. New York: ACSE, 1992, 45 p.

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Agenda ambiental localidad Usaquén. Bogotá: Alcaldía Mayor De Bogotá, 2009, 20 p.

ARANGO, Samuel. Concreto permeable: desarrollo de bajo impacto. [En línea]. Bogotá [citado: 13, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-permeable-desarrollo-urbano-de-bajo-impacto-2/>>

CASALE, Jorge. Buenos Aires: legislación sobre techos verdes. [En línea]. Bogotá [citado: 25, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.redsustentable.org/buenos-aires-legislacion-sobre-techos-verdes>>

ECHEVERRY, Verónica. Recorriendo latitudes. [En línea]. Bogotá [citado: 13, mar., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/recorriendo-latitudes-con-concreto-permeable/>>

EL ESPECTADOR. Petro decreta plan para evitar inundaciones en Bogotá. [En línea]. Bogotá 25 de Noviembre del 2014 [citado: 06, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.elespectador.com/noticias/bogota/petro-decreta-plan-evitar-inundaciones-bogota-articulo-529446>>

EL TIEMPO. ¿Por qué se inunda Bogotá cuando llueve? [En línea]. Bogotá [citado: 03, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.eltiempo.com/bogota/inundaciones-en-bogota/14861695>>

GÓMEZ GONZÁLEZ, G.A., RODRÍGUEZ BENAVIDES A.F., TORRES, A. Durabilidad de las capacidades filtrantes de la capa de rodadura de un pavimento poroso rígido., Punta del Este XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 21-25 Nov. 2010. 11 p.

GOOGLE EARTH. Localidad de Usaquen. [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.google.com.co/maps/place/Usaqu%C3%A9n,+Bogotá/@4.7449875,-74.0287975,12z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x8e3f8f805d4e5beb:0x853611c42477c6f>>.

H2O HIDROLOGÍA SOSTENIBLE. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. [En línea]. Bogotá [citado: 25 de Marzo de 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/>>

IDEAM. Curvas de intensidad-duración-frecuencia estación observatorio meteorológico nacional. Bogotá: IDEAM, 2010.

LUCKE, Terry., BEECHAM, Simon., BOOGAARD, Floris., & MYERS, Baden. Are Infiltration Capacities of Clogged Permeable Pavements Still Acceptable? En: Novatech. 2013, 9 p.

MCCUEN, R. Hydrology, FHWA-SA-96-067. Washington: Federal Highway Administration. 1996. 176 p.

OBSERVATORIO AMBIENTAL DE BOGOTÁ. Precipitación anual. [En línea]. Bogotá [citado: Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.oab.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?id=156&v=l>>

RAWLS, W. ASCE Journal Of Hydraulic Engineering, New York: ACSE, 1983, 1316 p.

RESTREPO, Julián. Modelos hidráulicos. [En línea]. Bogotá [citado: 08, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL:

fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/modelacionhidraulica/modelacion_hidraulica.html>

SWMM. Modelo de Gestión de Aguas Pluviales 5vE. Manual del Usuario. Traducción Grupo Multidisciplinario de Modelación de Fluidos. [En línea]. Bogotá. [citado: 14, Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: http://www.instagua.upv.es/swmm/descargas/Manual_SWMM5vE.pdf>

THE OHIO STATE UNIVERSITY. Green Roof: Saving Money, Saving our Earth [En línea]. Bogotá [citado: 21 de, Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://u.osu.edu/crp2110/2015/04/22/green-roofs-saving-money-saving-our-earth/>>

TRUJILLO LÓPEZ, Alejandra; QUIROZ, Diana Paola. Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano. [En línea]. Bogotá [citado: Abr., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/11174/1/TrujilloLopezAlejandra2013.pdf>>

VALENZUELA, Santiago. Plan para mitigar inundaciones en Bogotá. [En línea]. Bogotá [citado: 03 de Febrero del 2015]. Disponible en Internet: <URL: www.elespectador.com/noticias/bogota/plan-mitigar-inundaciones-bogota-articulo-517838>.