

**PROYECTO DE GRADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**SISTEMAS DE CONTROL DE ESCORRENTÍA PLUVIAL EN CIUDADES:  
TECHOS VERDES VS. TANQUES DE ALMACENAMIENTO**

**TESIS DE USO DE SOFTWARE**

**Laura Carolina Vega Piña**

**Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
DICIEMBRE DE 2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Doy gracias a Dios por permitirme llegar a esta instancia de mi carrera profesional y motivar mi trabajo y dedicación en el estudio y desarrollo del presente proyecto de grado. Agradezco también a mi familia por el amor, soporte e instrucción brindados a lo largo de mi vida; a los docentes de Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental que hicieron parte de mi formación como profesional y construyeron en mí nuevas iniciativas y propósitos como proyecto de vida. También, agradezco a la Universidad de los Andes por los grandes estándares fijados en lo que respecta a la educación de calidad, siempre con metas del orden internacional; y finalmente, a mi asesor de tesis, Juan Saldarriaga, quien guio el desarrollo del presente trabajo y motivó mi interés por el aprendizaje sobre el manejo de los recursos hídricos.**

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	3
1.1.1	Objetivo General .....	3
1.1.2	Objetivos Específicos .....	3
2	Marco teórico .....	4
2.1	Hidrología y drenaje urbano .....	4
2.2	Sistemas de alcantarillado .....	6
2.3	Sistemas de control de escorrentía .....	8
2.3.1	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – SUDS .....	10
2.3.2	Techos Verdes .....	14
2.3.3	Tanques de Tormenta .....	19
2.4	Storm Water Management Model – SWMM .....	20
2.5	Modelo Hidrológico del Soil Conservation Service – SCS .....	21
3	Metodología .....	23
3.1	Caracterización del área de estudio .....	23
3.2	Modelación del área de estudio en EPASWMM .....	29
3.2.1	Parámetros hidráulicos .....	31
3.2.2	Parámetros de cuencas .....	33
3.2.3	Parámetros del modelo de infiltración y evento de lluvia .....	42
3.3	Análisis de sensibilidad .....	45
3.4	Escenario con Techos Verdes .....	47
3.5	Escenario con Tanques de almacenamiento .....	48
4	Resultados y análisis de resultados .....	52
4.1	Análisis de sensibilidad .....	52
4.2	Evaluación de escenarios .....	54

---

4.2.1	Hidrogramas de salida .....	54
4.2.2	Inundaciones .....	57
5	Conclusiones.....	58
6	Recomendaciones .....	61
7	Referencias.....	62
8	Anexos .....	65
8.1	Número de Curva en áreas urbanas – NRCS (2004).....	65
8.2	Valores recomendados de n de Manning de acuerdo al tipo de superficie – Ministerio de vivienda y urbanismo de Chile (1997).....	66
8.3	Mapa Zonas Geotécnicas de Bogotá (Decreto 523 de 2010).....	67
8.4	Asignación del porcentaje de área impermeable por subcuenca (capa vectorial) .....	68
8.5	Asignación del CN por subcuenca (capa vectorial) .....	69
8.6	Zonas Geotécnicas por subcuenca en el área de estudio (capa vectorial) .....	70
8.7	Hidrogramas de salida por variable evaluada en el análisis de sensibilidad.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Influencia de la urbanización en la ciclo hidrológico (adaptado de Butler & Davies, 2011).....	4
Figura 2. Influencia de la urbanización en el pico de escorrentía (adaptado de Butler y Davies, 2011). .....	5
Figura 3. Funcionamiento del sistema convencional de drenaje urbano (UNESCO y Taylor & Francis Group, 2010).....	7
Figura 4. Tipos de techo verde (Adaptado de Texas A&M University, Interdisciplinary Green Roof Research Group web site. ....	14
Figura 5. Sección transversal típica y estructura de drenaje del techo verde (adaptado de Urban Drainage and Flood Control District, 2010 y Clean Water Services, 2009). ....	16
Figura 6. Tipos de Tanques de Tormenta subterráneos prefabricados (izq. Conder Storage Tank, der. Aquacell). ....	20
Figura 7. Perímetro urbano de Bogotá y área de estudio .....	24
Figura 8. UGAs incluidas en el área de Estudio. ....	24
Figura 9. Configuración urbana: (de izq. a der.) área construida, lotes y manzanas.....	25
Figura 10. Acercamiento a sección del área urbana – área construida, lotes y manzanas. ....	26
Figura 11. Zonas verdes, parques, plazas y vías. ....	26
Figura 12. Usos de suelo – clasificación zonal. ....	28
Figura 13. Caracterización topográfica - Curvas de nivel. ....	28
Figura 14. Estratificación socio-económica por manzanas.....	29
Figura 15. Configuración hidráulica de la red de alcantarillado pluvial “Chicó Norte”. ....	32
Figura 16. Red Chicó Norte y capas del visor geográfico del acueducto. ....	33
Figura 17. Diagrama de flujo – delimitación de subcuencas de la zona urbana.....	34
Figura 18. Diagrama de flujo – delimitación de subcuencas de la zona rural. ....	35
Figura 19. Imágenes del procedimiento de delimitación de subcuencas rurales y área final de estudio. ....	36
Figura 20. Subcuencas de drenaje y nodos aferentes del área de estudio (zona rural y urbana).....	37
Figura 21. Diagrama de flujo – cálculo del área y ancho de las subcuencas. ....	38
Figura 22. Diagrama de flujo – estimación de la pendiente media de las subcuencas. ....	39
Figura 23. Estaciones pluviométricas – análisis hidrológico Chicó Norte y Chicó Sur (CIACUA, 2014, p. 35)...	45
Figura 24. Parámetros de EPA-SWMM para un Techo Verde estándar. ....	48

---

Figura 25. Nodos de la red Chicó Norte con inundaciones superiores a los 800 lps en el minuto 45..... 49

Figura 26. Ubicación de tanques y caudal de inundación en nodos y tanques del minuto 0:45 a la 1:15. .... 51

---

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Hietogramas de diseño para el modelo de lluvia-escorrentía Chicó Norte (CIACUA, 2014).....	44
Gráfica 2. Variación del hidrograma de salida de los escenarios de control de escorrentía respecto al sistema original.....	55
Gráfica 3. Hidrogramas de salida de los escenarios de control y modelo original.....	56
Gráfica 4. Hidrogramas de salida con escenario de techos verdes con berma de 2 y 30 mm (TV1 y TV2). ....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas del sistema convencional de drenaje (adaptado de Butler y Davies, 2011)....	7
Tabla 2. Evolución en el manejo del agua urbana en países desarrollados (UNESCO y Taylor & Francis Group, 2010).....	9
Tabla 3. Tipologías SUDS típicamente empleadas para el manejo de escorrentía.....	10
Tabla 4. Principales beneficios y limitaciones de los Techos Verdes.....	17
Tabla 5. Eficiencia de retención en relación con el espesor del sustrato y pendiente de Techos Verdes (Dietz, 2007).....	18
Tabla 6. Eficiencia de reducción de escorrentía, 13 casos de estudio (Ahiablame et al., 2012). ....	18
Tabla 7. Clasificación del uso del suelo por Código Zonal .....	27
Tabla 8. Parámetros Hidráulicos.....	30
Tabla 9. Parámetros de cuencas.....	30
Tabla 10. Parámetros del modelo de Infiltración .....	31
Tabla 11. Componentes principales de la red Chicó Norte. ....	31
Tabla 12. Asignación inicial de porcentajes de área impermeable por tipo de suelo .....	40
Tabla 13. Valores de área impermeable corregidos por zonificación de uso de suelo. ....	40
Tabla 14. Valores típicos de almacenamiento en depresiones (Iglesias & Martínez, 2013) .....	42
Tabla 15. Relación zonas geotécnicas en Chicó Norte (Decreto 523 de 2010) con el Grupo Hidrológico de Suelo (SCS). ....	43
Tabla 16. Rango de valores por grupo de datos de cada parámetro – análisis de sensibilidad .....	46
Tabla 17. Resultados del análisis de sensibilidad – comparación con caudales pico. ....	52
Tabla 18. Reducción del caudal pico – escenarios de control. ....	55
Tabla 19. Reducción en el volumen de inundación - escenarios de control.....	57

---

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cadual de escorrentía - SCS.....	22
Ecuación 2. Almacenamiento en función del CN.....	22
Ecuación 3. Área impermeable ponderada.....	41
Ecuación 4. CN por tipo de suelo.....	43
Ecuación 5. CN ponderado por área.....	44
Ecuación 6. Desviación estandar – análisis de sensibilidad.....	46

## 1 INTRODUCCIÓN

Con el proceso de industrialización se incrementó en gran medida el proceso de urbanización alrededor del mundo; no obstante, solo hasta los últimos 50 años se ha evidenciado la tasa máxima de crecimiento poblacional en zonas urbanas alrededor del mundo. De acuerdo al programa de las Naciones Unidas (UN-HABITAT, 2015), en 1950 un tercio de la población mundial vivía en asentamientos urbanos, hoy en día más del 50% de la población mundial vive en las ciudades. A nivel nacional dicha situación ha sido más crítica, pues según un estudio realizado por el Banco Mundial (2012), cerca del 75% de la población nacional vive en ciudades, comparado con un 38% en 1938.

De la mano con el desarrollo urbano, se ha generado una continua y creciente interacción entre el ser humano y el ciclo hidrológico. De acuerdo con Butler y Davies (2011), esta interacción se ha dado en principalmente de dos formas: la extracción de agua del medio natural para abastecimiento y desarrollo de diversas actividades económicas, y la creación de superficies artificiales impermeables que desvían el curso del agua del sistema natural de drenaje. Lo anterior, sumado al acelerado proceso de urbanización, ha dado lugar a la generación de altos volúmenes de aguas residuales (o aguas negras) y aguas lluvias, para las cuales ha sido indispensable la creación de sistemas de drenaje urbano que permitan su efectiva evacuación. En un comienzo, en ciudades como Londres, la construcción de sistemas de drenaje (sistemas artificiales) buscaba reemplazar la función del sistema natural de drenaje conformado por los diversos canales y zanjas preexistentes a la urbanización, que permitían la descarga de aguas lluvias a cuerpos de agua receptores. Por su parte, las aguas negras eran depositadas en pozos sépticos residenciales, desocupados con cierta periodicidad. No obstante, con el acelerado incremento poblacional, rápidamente se superó la capacidad de dichos sistemas, forzando la conexión de las descargas de aguas negras con el sistema de drenaje de la ciudad (Butler y Davies, 2011).

Hoy en día, en la mayoría de ciudades del mundo se han construido sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario, principalmente conformado por pozos y tuberías interconectadas, en dos configuraciones principales: sistema combinado y/o separado. Esto es lo que hoy se considera como el sistema convencional de drenaje urbano. A pesar de que estos sistemas han proporcionado la disminución de inundaciones urbanas y principalmente el adecuado mantenimiento de la salud pública, su implementación ha redundado en el deterioro de los cuerpos de agua receptores afectando su calidad y la salud pública de poblaciones aguas abajo de las descargas; por otro lado, se han generado mayores probabilidades de inundación por la rapidez y magnitud de los volúmenes descargados a los cuerpos de agua receptores. Debido a esto, han surgido nuevas iniciativas que buscan generar el control de la calidad y/o cantidad del agua drenada, por medio de sistemas control

en la fuente, es decir sistemas que generen mecanismos de control previo al ingreso del agua al sistema convencional de drenaje.

Dentro de las nuevas aproximaciones abordadas se encuentran los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), en los cuales se emplean diversos tipos de estructuras que permiten el tratamiento, reducción y/o retención temporal del agua drenada por escorrentía superficial. Algunos mecanismos de control sobre el volumen de escorrentía empleados por estas estructuras son la infiltración, filtración, evapotranspiración, retención y detención. Se considera que una amplia implementación de estos sistemas implicaría reducciones significativas del caudal pico y volúmenes de escorrentía sin la necesidad de acudir a mecanismos de infraestructura de alta envergadura, por lo cual han logrado emplearse en gran medida en países como Australia, Canadá, Estados Unidos, el Reino Unido, la Unión Europea y Chile (CIUA, 2015). No obstante, en el caso de ciudades altamente densificadas, la factibilidad de implementación de SUDS se ve restringida a cierto tipo de estructuras, como los alcorques inundables, techos verdes, cunetas verdes y zanjas de infiltración, las cuales presentan mayor facilidad de implementación en zonas reducidas. Por otro lado, también existe un gran interés por las alternativas que permiten el amortiguamiento de grandes volúmenes de agua de manera directa y controlada, como es el caso de los tanques de tormenta, de instalación subterránea y alta capacidad de almacenamiento, que a pesar de representar mayores intervenciones a nivel de infraestructura, prometen una mayor resiliencia del sistema en caso de eventos de lluvia de alta magnitud.

El presente trabajo tiene la finalidad de evaluar y contrastar dos de los sistemas de control de escorrentía más empleados en ciudades altamente densificadas: techos verdes y tanques de tormenta, el primero representativo de la nueva perspectiva de sistemas alternativos al sistema de drenaje convencional (ingeniería suave), y el segundo representativo de una solución estructural de ingeniería de alta envergadura (ingeniería dura). Esta evaluación se desarrolla por medio de la elaboración de un modelo de lluvia-escorrentía en EPASWMM con la red pluvial del sector Chicó Norte (Bogotá). Posterior al levantamiento del modelo, incluyendo la caracterización hidráulica de la red, la caracterización de cuencas de drenaje y las variables hidrológicas del modelo, se creará un escenario de techos verdes y otro con tanques de tormenta, considerando una implementación extensa de los mismos, de tal forma que se pueda evaluar su funcionamiento y nivel de efectividad sobre el control de escorrentía e inundaciones del sistema. Adicionalmente, se desarrollará un análisis de sensibilidad del modelo respecto a las variables características de las cuencas y variables hidrológicas definidas.

En el presente documento se desarrolla una sección de marco teórico en el que se incluye una descripción de los efectos y transformaciones del drenaje y ciclo hidrológico por cuenta del desarrollo urbano; adicionalmente, se hace una descripción del sistema convencional de drenaje urbano, de las diversas aproximaciones de tipologías SUDS y estructuras de control de escorrentía

seleccionadas para el análisis en el presente documento, y finalmente sobre los fundamentos teóricos del modelo. Posteriormente, se describe el paso a paso de la recopilación y análisis de información requeridos para el desarrollo del modelo, así como del procedimiento seguido en el análisis de sensibilidad y la simulación de los escenarios con sistemas de control de escorrentía. Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad y la respuesta del modelo ante la simulación de los escenarios con sistemas de control de escorrentía. Y finalmente, se aborda el análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones correspondientes al trabajo desarrollado.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Analizar y evaluar la efectividad en el manejo y control de escorrentía pluvial de los techos verdes y tanques de almacenamiento, a partir de la simulación de escenarios en un modelo de lluvia-escorrentía en EPASWMM con la red de alcantarillado pluvial de Chicó Norte (Bogotá).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

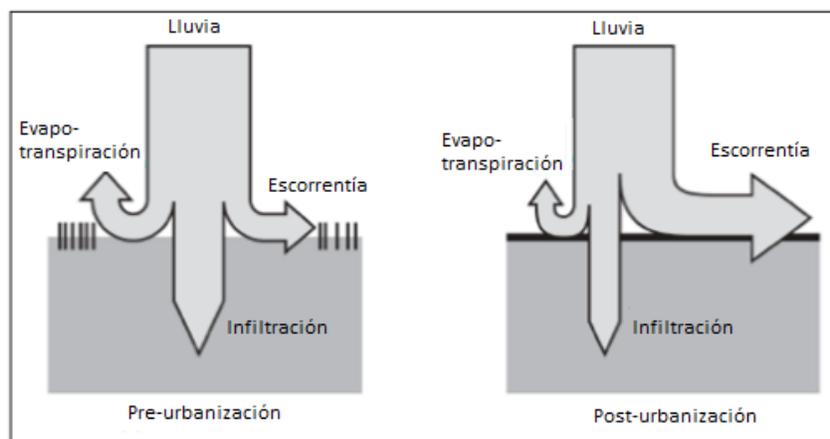
- Caracterizar el área de estudio en términos de variables cualitativas y cuantitativas necesarias para el desarrollo del modelo.
- Recrear el sistema hidráulico, áreas de drenaje y parámetros hidrológicos de Chicó Norte en EPASWMM, dando lugar al modelo de lluvia-escorrentía correspondiente.
- Desarrollar un análisis de sensibilidad del modelo respecto a las variables características de las cuencas y variables hidrológicas definidas.
- Simular los escenarios correspondientes a los sistemas de control de escorrentía a analizar (techos verdes y tanques de almacenamiento).
- Analizar el control sobre inundaciones, volúmenes y picos de escorrentía de los mecanismos evaluados.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Hidrología y drenaje urbano

Previo al proceso de urbanización, en el ciclo hidrológico natural parte del agua que cae por precipitación es evaporado o transpirado por las plantas; otra parte es infiltrada en el suelo, contribuyendo a la recarga de acuíferos y flujo base de los ríos; y la fracción remanente es conducida por la superficie natural en forma de escorrentía hacia cuerpos de agua receptores. La proporción de agua en cada componente varía de acuerdo a varios factores como la humedad y temperatura de la zona, la pendiente del terreno, tipo de suelo, humedad antecedente y tipo o densidad de la vegetación en la superficie; no obstante, la mayor transformación del ciclo se da por cuenta de la acción del hombre en el proceso de urbanización.

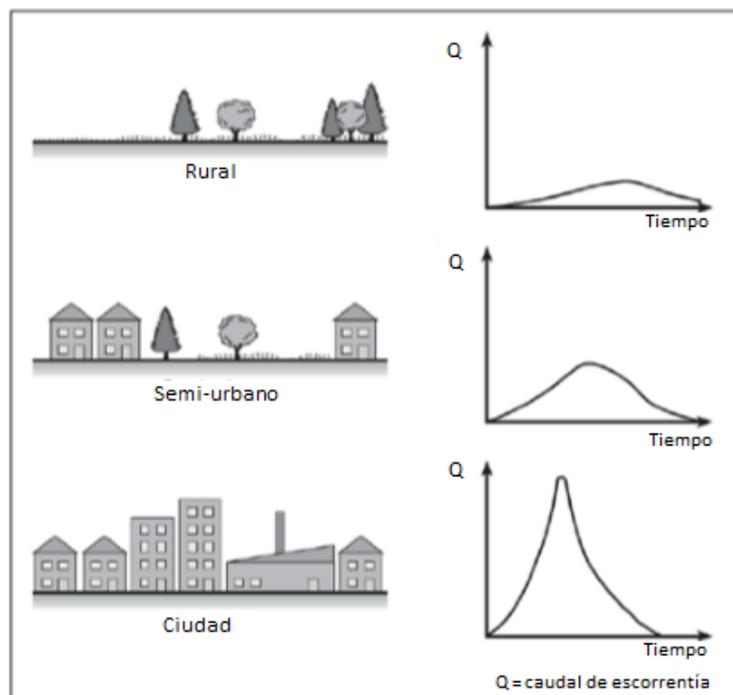
El desarrollo urbano implica la transformación y reemplazo de la superficie natural por la construcción de diversas edificaciones, vías y plazas que implican la impermeabilización del suelo en grandes extensiones de área. Dicha situación, genera el incremento del agua lluvia convertida en escorrentía, lo que a su vez implica la reducción de agua infiltrada y conducida a los acuíferos, y el agua evapo-transpirada por la reducción de cobertura vegetal, como se muestra en la Figura 1. Además del aumento de volumen, la impermeabilización de superficies incrementa la rapidez de generación de escorrentía. Estos factores son la principal motivación para la creación de sistemas de infraestructura de drenaje efectivos en la rápida evacuación del agua lluvia, evitando la generación de inundaciones y proliferación de vectores o problemas de salud pública.



**Figura 1. Influencia de la urbanización en la ciclo hidrológico (adaptado de Butler & Davies, 2011).**

Con el desarrollo de la infraestructura de drenaje artificial, se ha garantizado apropiadas condiciones de vida para la población; no obstante, la rápida generación de altos volúmenes de agua drenada

por las tuberías de la red, implica mayores caudales de descarga y caudales picos a la salida del sistema sobre los cuerpos de agua receptores (ver Figura 2). Este hecho, incrementa el riesgo de inundación en los cuerpos de agua y deteriora el estado original del cauce al generarse erosión del mismo. Por otra parte, la concentración de diversas actividades humanas, junto con el desarrollo industrial y productivo, incrementa la concentración de diversos tipos de contaminantes que son drenados a los cuerpos de agua luego de los eventos de lluvia. Por lo anterior, sumado a los sistemas que conectan aguas residuales al sistema de drenaje pluvial, los diversos ecosistemas acuáticos sufren grandes daños, lo que genera a su vez nuevas necesidades de tratamiento que requieren de soluciones de ingeniería de alto impacto.



**Figura 2. Influencia de la urbanización en el pico de escorrentía (adaptado de Butler y Davies, 2011).**

Como puede notarse, el desarrollo de estos sistemas parece formar un problema sin salida, en el cual se requiere el desarrollo de infraestructura de dimensiones cada vez mayores, pues difícilmente se obtiene una solución sostenible a las diversas externalidades formadas por el mismo. Respecto a esto, se han planteado mecanismos alternativas al sistema convencional de drenaje analizados con mayor detalle en la sección de sistemas de control de escorrentía.

## 2.2 Sistemas de alcantarillado

De acuerdo al reporte “The Global Water Supply and Sanitation Assessment” de la Organización Mundial de la Salud y UNICEF, las tecnologías de saneamiento consideradas adecuadas son: conexión a alcantarillado público, conexión a sistema séptico, letrina de fosa simple, letrina de fosa simple mejorada y ventilada, y letrina de sifón (WHO & UNICEF, 2000). Lo que hace evidente la existencia de diversas posibilidades *on-site* aceptables para la disposición de aguas residuales alrededor del mundo; no obstante, es claro que cuando se trata de zonas altamente densificadas (zonas urbanas), la alternativa más apropiada es la conexión a alcantarillado público.

Los sistemas de alcantarillado son redes subterráneas compuestas por tuberías y pozos interconectados que permiten la recolección y transporte de aguas residuales y/o agua lluvia de la ciudad para ser tratado y finalmente descargado en cuerpos de agua receptores. Existen básicamente dos tipos de sistemas de alcantarillado: sistema combinado y sistema separado; sin embargo, hoy en día también se da la combinación de ambos, en este caso llamados sistemas híbridos.

En el sistema combinado, la recolección y transporte de aguas lluvias se da en conjunto con el agua residual por medio de una sola red de tuberías, en cuyo caso el destino de las mismas consiste en las plantas de tratamiento de agua residual, antes de su posterior descarga al medio natural. Cuando se dan periodos secos, el sistema solo conduce el agua residual; sin embargo, en periodos húmedos este debe estar en la capacidad de transportar adicionalmente el agua de escorrentía de la ciudad. Según Butler y Davies (2011), el agua lluvia puede llegar a representar entre 50 y 100 veces el volumen promedio de agua residual, por lo cual para este sistema se han diseñado estructuras especiales de alivio ubicadas aguas arriba de las plantas de tratamiento. Las estructuras de alivio permiten drenar volúmenes o caudales de agua que excedan la capacidad de diseño del sistema, evitando con ello la presurización de las tuberías y posteriores inundaciones en la ciudad. Las descargas de los mismos se conectan de forma directa con los cuerpos de agua receptores. Sobre esto, si bien parece haber una alta dilución del agua residual en el agua lluvia, varios estudios han demostrado el alto nivel de contaminación que puede tener el agua lluvia, especialmente cuando se da el primer lavado, arrastrando altas concentraciones de diversos contaminantes de la superficie de la ciudad.

El sistema separado, consiste en dos sistemas de tuberías, casi siempre paralelos, por los cuales se pretende recolectar y conducir de forma separada el agua residual y el agua lluvia. La tubería de agua lluvia se diseña con proporciones similares a la del sistema combinado y el agua recolectada por lo general es drenada de forma directa a los cuerpos de agua. En el caso de las aguas residuales, a pesar de que el volumen descargado varía con el tiempo, el sistema se diseña para transportar el caudal máximo horario y se conecta a la planta de tratamiento antes de ser descargado al sistema

natural. En primera instancia, una de las desventajas de este tipo de sistemas es el incremento en los costos constructivos, de operación y mantenimiento; no obstante, la principal falencia radica en la dificultad de mantener el sistema separado, en primera medida por la dificultad de controlar las conexiones erradas al sistema pluvial y en segunda medida por fenómenos de infiltración y flujo directo del agua lluvia al sistema de aguas residuales.

El sistema de drenaje híbrido consiste en adaptar ambos tipos de sistemas con el fin de darle una mayor vida útil y mejorar la capacidad de evacuación del sistema en conjunto. Un ejemplo claro se da en las ciudades más antiguas del Reino Unido, donde en el centro de la ciudad (por lo general la zona más antigua) se cuenta con alcantarillado combinado y en la periferia las nuevas urbanizaciones manejan sistema separado. Las aguas residuales del sistema separado son dirigidas al sistema combinado, mientras que el sistema de aguas lluvias descarga directamente a los cuerpos de agua receptores, mitigando la probabilidad de inundación en zonas urbanas (Butler & Davies, 2011). Existe adicional a este tipo de sistemas, una alta probabilidad de que los sistemas separados tiendan a ser considerados como mixtos, al haber problemas con las conexiones erradas bien sea por negligencia o ignorancia de quienes llevan a cabo las debidas conexiones a los mismos.

En la Figura 3 se presenta un esquema del funcionamiento general de este tipo de sistemas y en la Tabla 1 se incluyen las principales ventajas y desventajas del sistema separado y combinado respectivamente.

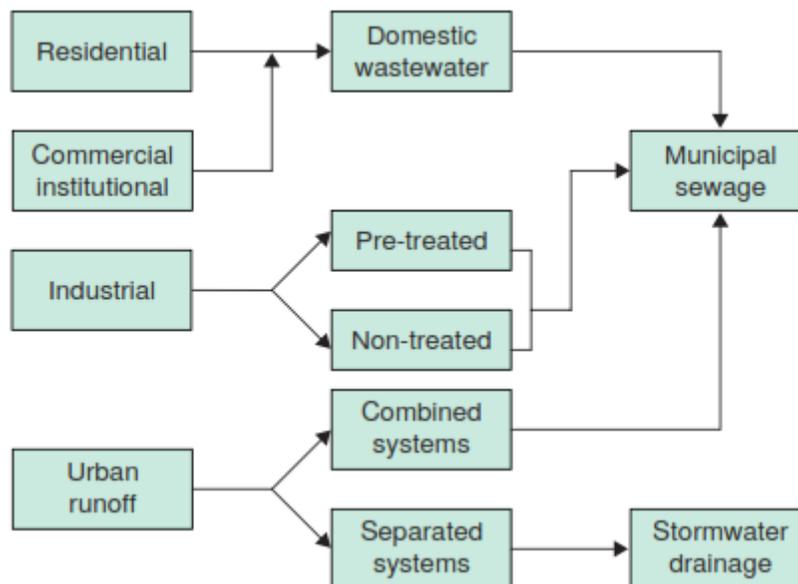


Figura 3. Funcionamiento del sistema convencional de drenaje urbano (UNESCO y Taylor & Francis Group, 2010)

Tabla 1. Ventajas y desventajas del sistema convencional de drenaje (adaptado de Butler y Davies, 2011).

	Sistema separado	Sistema combinado
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>* No emplea alivios, lo que implica menor contaminación por aguas residuales</li> <li>* Menores esfuerzos requeridos por las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR).</li> <li>* De ser necesario, solo se requeriría bombear el volumen de agua residual a las PTAR.</li> <li>* Cada sistema se diseña con un criterio óptimo de forma independiente.</li> <li>* Pozos de menor tamaño para el sistema de aguas residuales, mayores velocidades con bajo caudal.</li> <li>* Menor variación de caudal y concentración del agua residual tratada.</li> <li>* No residuos de carretera en las aguas residuales.</li> <li>* Las inundaciones se producirán únicamente con agua lluvia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Menores costos de construcción.</li> <li>* Menor ocupación de espacio.</li> <li>* Drenaje residencial más económico y simple.</li> <li>* Lavado de sólidos depositados en la tubería de aguas residuales durante eventos de lluvia.</li> <li>* Se provee tratamiento al agua de escorrentía</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Costos extra por la instalación de las dos tuberías.</li> <li>* Espacio adicional requerido en vías angostas y áreas construidas.</li> <li>* Mayor cantidad de drenajes con riesgo de generar conexiones erradas.</li> <li>* No hay lavado de sólidos depositados en la tubería en tiempo húmedo.</li> <li>* No hay tratamiento del agua de escorrentía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Alivios necesarios para el adecuado funcionamiento de la tubería y planta de tratamiento.</li> <li>* Necesita de grandes esfuerzos para manejo y tratamiento del agua probablemente con necesidad de almacenamiento y alivios.</li> <li>* Altos costos de bombeo si es necesario el bombeo de caudal para el tratamiento del agua.</li> <li>* La profundidad óptima de la tubería de agua lluvia puede no corresponder con la de agua residual.</li> <li>* Flujo lento y de baja profundidad en tuberías largas y en periodos secos que pueden generar sedimentación de sólidos y descomposición de los mismos.</li> <li>* Alta variación de caudal y concentración de contaminantes, perjudiciales para el bombeo y tratamiento respectivamente.</li> <li>* Necesaria la remoción de arenas.</li> <li>* Si hay inundación y se excede la capacidad de los pozos, pueden haber problemas de salud pública.</li> </ul>

### 2.3 Sistemas de control de escorrentía

De acuerdo al documento “*Integrated Urban Water Management in Humid Tropics*” desarrollado por la UNESCO y Taylor & Francis Group (2010), la evolución del drenaje urbano en países

desarrollados ha pasado por las etapas: pre-higienista, higienista, correctiva y sostenible como se muestra a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2. Evolución en el manejo del agua urbana en países desarrollados (UNESCO y Taylor & Francis Group, 2010).**

<b>Etapas</b>	<b>Periodo</b>	<b>Características</b>
Pre-higienista	Hasta principios del siglo XX	Sistemas urbanos sin alcantarillado pluvial y sanitario o algún tipo de tratamiento. Muchos hogares emplean algún tipo de sistema en sitio ( <i>on-site</i> ) y el agua lluvia drena por las calles con alta proliferación de enfermedades asociadas a la contaminación del agua.
higienista	Hasta 1970s	Provisión de agua potable y redes de alcantarillado sanitario sin plantas de tratamiento que generan alta contaminación de cuerpos de agua; el agua lluvia es conducida por canales, conductos o calles, transfiriendo el impacto por contaminación de la escorrentía aguas abajo.
Correctiva	Después 1970s	Tratamiento de aguas residuales, implementación de pondajes de retención y detención en los sistemas de alcantarillado pluvial para controlar picos de caudal de escorrentía de áreas urbanas.
Sostenible	Después de 1990s	Introducción de mejores medidas de regulación y control para reducir la contaminación del agua lluvia; los sistemas de drenaje incorporan prácticas naturales como la infiltración y procuran mantener las funciones hidrológicas naturales. La planeación urbana tiene en cuenta la escorrentía y la necesidad de mantener condiciones de flujo naturales.

La etapa “sostenible” implica la coordinación entre diferentes autoridades públicas, la colaboración entre diversas organizaciones públicas, privadas y ONGs para promover una efectiva asociación con la población civil y el sector privado; y adicionalmente, la capacidad para transformar y mejorar la planeación, diseño y operación de los sistemas urbanos de drenaje (Karamouz, Moridi, & Nazif, 2011).

Dado que la implementación del sistema convencional de drenaje implica a groso modo una solución de “final de tubo” con altos costos ambientales y de infraestructura, existe una presión cada vez mayor de adoptar nuevas alternativas y cambiar el paradigma de drenaje, de tal manera que su desarrollo sea sostenible y efectivo en forma integral. Por lo anterior basado en un concepto de Planeación de Bajo Impacto (Low Impact Development – LID), se ha generado un enfoque

centrado en el manejo de volumen de escorrentía, a partir del cual se considera que una reducción del volumen implica a su vez reducción de contaminantes, velocidades, caudales máximos, erosión y sedimentación. Lo anterior por medio de mecanismos de recolección, almacenamiento, tratamiento, redistribución, y/o reciclaje de aguas lluvias (Ahiablame et al., 2012).

Dentro de esta aproximación de bajo impacto, nacen diferentes medidas estructurales y no estructurales en el control de escorrentía, conocidas en diferentes contextos como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), Medidas de Control de Agua Lluvia (Stormwater Control Measurements - SCM) o Mejores Prácticas de Manejo (Best Management Practices – BMP) (Zhen et al., 2006). Las medidas no estructurales son principalmente medidas preventivas de control de la contaminación en la fuente a través de mecanismos como la preservación del paisaje natural, reducción y desconexión de superficies impermeables, limpieza de calles y sumideros, reducción de contaminantes en la fuente y educación (como se cita en CIIA, 2015, p. 50). Por su parte, las medidas estructurales se diseñan para generar control directo sobre el volumen, caudal de descarga y/o contaminación del agua de escorrentía por medio de mecanismos como filtración o sedimentación previo a su descarga a los cuerpos de agua receptores o incluso al sistema convencional. A continuación se describe con mayor detalle el concepto de SUDS como sistemas estructurales de control de escorrentía.

### 2.3.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – SUDS

De acuerdo con CIRA (2007) y Wild et al. (2002), un SUDS es aquella medida de aproximación holística que provee un balance entre el control de calidad del agua, cantidad de agua y servicios ambientales. Estos sistemas pueden emplearse de forma independiente o en conjunto de acuerdo a las necesidades definidas para su uso. Existen diversas estructuras SUDS, cuyos mecanismos de tratamiento y control varían según su diseño. A continuación se da una breve descripción e ilustración de las estructuras o tipologías más empleadas y comúnmente disponibles (ver Tabla 3).

**Tabla 3. Tipologías SUDS típicamente empleadas para el manejo de escorrentía.**

Nombre (en inglés)	Definición	Ilustración
<p>Tanques de almacenamiento (Storage Tanks)</p>	<p>Sistema empleado para interceptar, conducir y almacenar agua lluvia para futuros usos. El agua almacenada corresponde al agua de escorrentía captada por superficies impermeables como techos, parqueaderos, entre otros. Su capacidad varía desde tanques de lluvia o residenciales (típicamente de 190 a 400 litros) a grandes depósitos para usos comerciales, institucionales o industriales (750 a 40.000 litros). Con poco tratamiento, por ejemplo filtración o separación del primer lavado, el agua almacenada puede ser usada para irrigación, lavado a presión o descarga de sanitarios, lo que puede implicar reducciones en el consumo de agua municipal de hasta el 55% (CVC &amp; TRCA, 2010).</p>	
<p>Cunetas verdes (Swales / enhanced vegetated swales)</p>	<p>Son canales abiertos vegetados, diseñados para conducir, tratar y atenuar la escorrentía superficial. La instalación de pequeñas barreras o diques permeables y vegetación, permite la disminución de la velocidad del agua para favorecer la sedimentación de partículas, la filtración a través de la zona radicular y sustrato, y la infiltración en el suelo nativo. Donde la densidad urbana, topografía y profundidad de la tabla de agua lo permite, el uso de estas estructuras es preferido sobre los bordillos, cunetas y desagües pluviales como sistema de conducción del agua (CVC &amp; TRCA, 2010).</p>	
<p>Drenajes filtrantes vegetados (Vegetated Filter Strips)</p>	<p>Son franjas de pendiente suave densamente vegetados que tratan la escorrentía que ingresa como flujo laminar proveniente de áreas impermeables adyacentes. Permiten la reducción de la velocidad y filtración de sólidos suspendidos y contaminantes asociados, y permite la infiltración al suelo circundante. Aunque originalmente se empleaba como una práctica de tratamiento en la agricultura, hoy en día ha evolucionado en una práctica de manejo de escorrentía (CVC &amp; TRCA, 2010).</p>	
<p>Zonas de bio-retención (Bioretention Zones)</p>	<p>Las estructuras de bio-retención corresponden a un área deprimida diseñada para capturar, filtrar y/o infiltrar el volumen para el cual fue diseñada, proveyendo cierto tratamiento. Esta estructura también se conoce como jardines de lluvia (rain gardens). El nombre bio-retención se encuentra asociado al tipo de tratamiento que este provee, donde gracias a la alta presencia de diversas especies vegetales se da la absorción biológica y retención de los contaminantes encontrados en el agua de escorrentía (Urban Drainage and Flood Control District, 2010).</p>	

<p>Superficies permeables o humedales artificiales (Wetlands)</p>	<p>Los humedales artificiales o contruidos son cuerpos de agua de poca profundidad densamente vegetados que emplean en gran medida la sedimentación de sólidos, filtración de partículas finas y absorción biológica de contaminantes provenientes del agua de escorrentía. El nivel de agua se incrementa con los eventos de lluvia y su salida está configurada para drenar lentamente el caudal, típicamente sobre los tres días, hasta regresar al nivel de agua de tiempo seco. Los humedales artificiales están compuestos por 3 partes principales: una zona de entrada, típicamente con cuenca de sedimentación; una zona de macrófitas densamente vegetada, y un canal de bypass para proteger la zona macrófita (EPA Victoria, 2005).</p>	
<p>Cuencas de infiltración (Infiltration Basins)</p>	<p>Las cuencas de infiltración consisten en áreas planas o de baja pendiente diseñadas para capturar el volumen de diseño o tratamiento. El agua lluvia se infiltra a través del fondo de la cuenca en el suelo circundante en un periodo de tiempo cercano a las 72 horas. El caudal que excede el volumen de diseño debe descargarse a un sistema de drenaje aguas abajo para evitar exceder su capacidad. Las basuras y sedimentos son acumulados en la antecámara ubicada a la entrada de la antecámara. Este sistema resulta efectivo en la remoción de los diversos contaminantes de la escorrentía (Riverside County Flood Control and Water Conservation District, 2011).</p>	
<p>Pavimentos porosos (Permeable Pavements)</p>	<p>Consisten en pavimentos que permiten el paso del agua a través de las capas que lo conforman. Dependiendo del diseño, los pavimentos permeables pueden ser usados para promover la reducción de volumen, proveer tratamiento, controlar la velocidad descarga del volumen tratado y reducir el área impermeable. Este sistema es comúnmente empleado en combinación con otras estructuras SUDS para garantizar un completo tratamiento y control de la descarga (Urban Drainage and Flood Control District, 2010).</p>	
<p>Franjas infiltrantes o tiras de filtro (Infiltration Trenches)</p>	<p>Las franjas de infiltración son zanjas poco profundas equipadas con un reservorio subsuperficial compuesto de grava o agregado grueso. El espacio vacío creado por el agregado proporciona cierto volumen de almacenamiento a la escorrentía superficial que es drenada a la zanja. Posteriormente, este volumen de agua es infiltrado al suelo circundante a través del fondo y lados de la estructura. Inicialmente está ideada para tratar la calidad del agua de escorrentía; no obstante, cuando se instala una tubería de drenaje perforada en su interior, esta puede atenuar picos de escorrentía con periodos de retorno de 1 o 2 años (Virginia Department of Transportation, 2013).</p>	

<p>Sumideros tipo alcorque inundable (Tree Box Filters o Box Planters)</p>	<p>Son sistemas similares a las Zonas de Bioretención dado que emplean de igual manera vegetación y suelo mejorado para filtrar y retener la escorrentía. Existen tres tipos de alcorques que pueden ser implementados dependiendo de las características del sitio y requerimientos: alcorques plantados con descarga únicamente por desbordamiento, alcorques con tuberías de drenaje perforadas en el fondo y alcorques con capacidad de drenar el agua por medio de infiltración y recarga de acuíferos (The City of Edmonton).</p>	
<p>Pondajes húmedos vegetados (Wet Ponds o Retention Basin)</p>	<p>Son áreas deprimidas que permiten el almacenamiento temporal del agua de escorrentía y cuentan con una piscina permanente o estacional. Los lagos artificiales pueden considerarse como una forma particular de los pondajes húmedos; no obstante, estas estructuras incorporan nuevos elementos de diseño para garantizar el tratamiento del agua lluvia. La piscina permanente permite mejorar la calidad del agua al sedimentar partículas finas, adicionalmente se da lugar a otros fenómenos físicos, químicos y biológicos que garantizan el adecuado tratamiento del agua de escorrentía (Louisiana Department of Environmental Quality, 2010).</p>	
<p>Cuenca Seca de Drenaje Extendida (Extended Detention Basin)</p>	<p>Consiste en una cuenca de sedimentación diseñada para almacenar por varias horas el agua drenada por escorrentía. Esta estructura es similar a las cuencas de detención empleadas para el control de inundaciones; no obstante, estas emplean estructuras de salida que controlan la salida gradual del agua, extendiendo el tiempo de drenaje de eventos de lluvia de alta frecuencia y garantizando con ello una mayor efectividad en la remoción de contaminantes. Un tiempo de drenaje de 40 horas es recomendado para garantizar la adecuada remoción de sólidos suspendidos, mientras que la remoción de contaminantes disueltos se da por medio de absorción biológica en la sección de micropiscina permanente o humedal a la salida de la estructura (Urban Drainage and Flood Control District, 2010).</p>	
<p>Techos Verdes (Green Roofs o Living roofs)</p>	<p>Son sistemas livianos que cuentan con una cobertura delgada de vegetación y sustrato instalado sobre los techos de edificaciones, por lo general con nula o poca pendiente. Estos sistemas son altamente promovidos por sus amplios beneficios a las ciudades; entre estos, mejora en eficiencia energética (regula la temperatura), reduce el fenómeno urbano de "isla de calor" y genera más zonas verdes aptas para la recreación pasiva, las cuales generan un alto valor estético; adicionalmente, son atractivos por su capacidad de tratar, balancear y reducir caudales pico de escorrentía. Los techos verdes actúan como un césped o prado en el cual se da almacenamiento de agua lluvia en el medio de crecimiento y áreas encharcadas. El exceso de lluvia ingresa a tuberías perforadas en la base del sistema y a tuberías de drenaje por desbordamiento, por medio de las cuales el agua es conducida al sistema de drenaje de la edificación. Como mecanismos de control, durante el evento de lluvia, el agua es evaporada, evapotranspirada o drenada lentamente (CVC &amp; TRCA, 2010).</p>	

Con el propósito de abordar aspectos más específicos de los mecanismos de control de escorrentía seleccionados para el presente trabajo, en las siguientes secciones se describirá con más detalle cada uno de ellos.

### 2.3.2 Techos Verdes

Los techos verdes pueden definirse como sistemas vivos contenidos en la superficie de diversas estructuras hechas por el hombre; conformando sistemas vegetados donde las plantas no son sembradas propiamente en el suelo (Urban Drainage and Flood Control District, 2010). Existen dos tipos de techos verdes, intensivos y extensivos. Según la descripción dada por Daniel Roehr y Elizabeth Fassman-Beck (2015), el primero de estos consiste en un sistema multicapa (drenaje, medio de crecimiento o sustrato y plantas) diseñado en forma individual o compuesta (modular), con profundidades de sustrato usualmente superiores a los 150 mm, superficie nivelada o con variabilidad topográfica, con capacidad de albergar diversas especies vegetales (desde plantas herbáceas hasta árboles) y otras estructuras como pavimentos y pérgolas. Para su cuidado es necesaria una frecuente irrigación y mantenimiento, usualmente se hace referencia a ellos como jardines de techo. Por su parte, los techos extensivos son sistemas simples o multicapa, diseñados de forma individual o modular cuyo sustrato o medio de crecimiento oscila entre 25 y 150 mm, conforman por lo general una superficie nivelada o gradada con pocas variaciones topográficas, manejan vegetación herbácea y arbustiva de poca altura, y exigen relativamente poco mantenimiento en términos de fertilización, irrigación o humedad. En la Figura 4 se muestra la configuración típica de los techos verdes intensivos y extensivos.

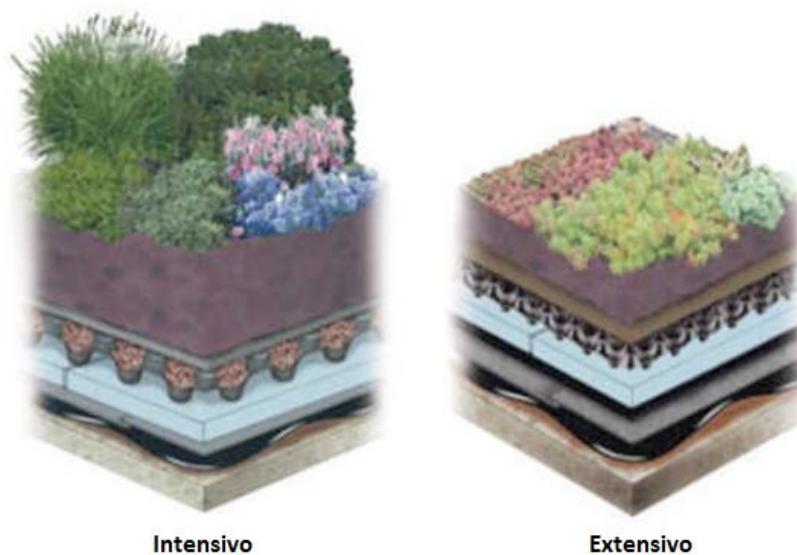


Figura 4. Tipos de techo verde (Adaptado de Texas A&M University, Interdisciplinary Green Roof Research Group web site).

Respecto a la estructura del techo verde, en la Figura 5 se muestra cada una de las capas que lo conforman, así como la tubería típica de drenaje por desbordamiento. A continuación se describe la función y algunos aspectos importantes de cada una de ellas según la información suministrada por el Distrito de control de inundaciones y drenaje urbano de Denver (2010) y la empresa de servicios públicos de la cuenca del río Taulatin y condado de Washington – USA (Clean Water Services, 2009).

Soporte estructural o cubierta del techo: La cubierta o techo debe estar en la capacidad de soportar el sustrato, la vegetación, el agua almacenada y/o nieve (en caso de presentarse), el paso peatonal y diversos equipos para su mantenimiento.

Membrana impermeabilizante: Impide el paso del agua a la edificación. Algunos materiales recomendados son asfalto modificado, caucho sintético o termoplásticos reforzados. Esta también puede actuar como bloqueo de las raíces.

Barrera aislante contra raíces: Ésta protege la membrana impermeabilizante previniendo su perforación por las raíces de las especies vegetales plantadas en el sistema. Su densidad y material dependerán del material empleado como membrana impermeabilizante y tipo de vegetación empleada. Este debe extenderse incluso sobre la zona de basalto de grava y lateralmente a cualquier elemento vertical.

Membrana protectora o de filtración: Previene el ingreso de partículas finas o material del sustrato a la capa de drenaje luego de presentarse un evento de lluvia.

Medio de crecimiento o sustrato: Aunque el medio de crecimiento no es típicamente “suelo”, se emplean otros términos como sustrato de crecimiento o suelo mejorado para referirse a este. El material que lo conforma debe ser liviano y debe proveer suficientes nutrientes para garantizar el crecimiento de plantas. La mezcla típica del material que lo conforma varía entre 5% orgánico, 95% inorgánico de material inorgánico, y 30% orgánico/70% inorgánico, dependiendo del tipo de vegetación (Clean Water Services, 2009).

Vegetación: Por lo general, la vegetación sembrada corresponde a especies nativas o naturalizadas, de raíces poco profundas, resistentes a sequías, perenes, resistentes al frío y vientos fuertes; predominantemente de poca necesidad de irrigación, fertilización y mantenimiento. Se recomienda la siembra de diversas especies para incrementar la supervivencia de las mismas y mayor cobertura.

Lastre de grava: debe ser ubicado en el perímetro del techo verde y alrededor de ductos de ventilación u otros elementos verticales para separarlos de la vegetación y sustrato. Su necesidad de implementación depende del tipo de techo y detalles del mismo. Adicionalmente, el basalto o

adoquines de azotea pueden ser empleados para proveer acceso, especialmente para los elementos verticales que requieren de mantenimiento.

**Tubería de drenaje:** este debe permitir el drenaje del agua lluvia de exceso en el sistema cuando el sustrato se encuentre saturado. El uso de techos verdes modulares o manufacturados es recomendado cuando existe un mecanismo efectivo de drenaje. Debe ponerse especial atención al punto de ubicación del drenaje procurando evacuar efectivamente el agua de exceso.



**Figura 5. Sección transversal típica y estructura de drenaje del techo verde (adaptado de Urban Drainage and Flood Control District, 2010 y Clean Water Services, 2009).**

El funcionamiento de este sistema, en términos hidrológicos, consiste en el almacenamiento de la precipitación que cae en forma directa para su posterior evapotranspiración, en términos de mecanismos de control de escorrentía, este sistema está en la capacidad de proveer retención y detención, incrementando el tiempo de concentración, y con ello, el tiempo requerido para la generación del pico de escorrentía y magnitud del caudal drenado al sistema de drenaje de la ciudad (Roehr y Fassman-Beck, 2015). A medida que el agua lluvia cae sobre el techo verde, el agua comienza a percollarse humedeciendo el sustrato, posteriormente solo hasta alcanzar una humedad cercana a la capacidad de campo del medio, el agua comenzará a descender por la capa de drenaje por acción de la gravedad. En el caso de presentarse un evento de lluvia de baja intensidad, es probable que el techo verde esté en la capacidad de retener y evapotranspirar el agua precipitada en forma directa sobre su superficie; no obstante, tras de eventos de lluvia de alta magnitud una

alta proporción del agua precipitada será lentamente drenada por el sistema y conducida a las tuberías de drenaje.

Algunos factores que pueden afectar el funcionamiento de los techos verdes son la intensidad y frecuencia de los eventos de lluvia, el vigor de las plantas y adecuado desarrollo de las raíces, la pendiente del techo y la composición del sustrato. En este último caso, Stovin et al. (2013) ha encontrado que una la heterogeneidad del sustrato puede generar el drenaje del agua a una humedad menor a la capacidad de campo. Por otra parte, la capacidad disponible de almacenamiento del sistema, asociado a diferencia entre las condiciones secas y el total de almacenamiento potencial de agua del medio también se ve influenciado de variables como la tasa de evapotranspiración, el tiempo entre eventos del lluvia, las condiciones de las plantas y condiciones ambientales y las características de almacenamiento propias del medio de crecimiento (Roehr y Fassman-Beck, 2015). Por su parte, la tasa de ET dependerá de la disponibilidad y facilidad de acceso al agua almacenada. Según se sabe, el agua requerida o potencial para ser evapotranspirada corresponderá a la humedad contenida en el sustrato entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente (Roehr y Fassman-Beck, 2015). En la Tabla 4. Principales beneficios y limitaciones de los Techos Verdes. Tabla 4 se presentan los principales beneficios y limitaciones asociadas a los techos verdes (Adaptado de Urban Drainage and Flood Control District, 2010; y Clean Water Services, 2009).

**Tabla 4. Principales beneficios y limitaciones de los Techos Verdes.**

Beneficios	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce caudales y volúmenes de escorrentía</li> <li>• Reduce el efecto de isla de calor en áreas urbanas</li> <li>• Puede proporcionar valor en la acreditación LEED</li> <li>• Puede extender la vida útil del techo reduciendo las fluctuaciones de temperatura diaria y evitando el ingreso de luz ultravioleta</li> <li>• Puede proporcionar ahorro de energía por aislamiento adicional y refrigeración por evapotranspiración</li> <li>• Provee espacios abiertos estéticamente agradables en zonas de alta densidad urbana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Experiencia limitada sobre su implementación</li> <li>• Los costos iniciales de instalación son mayores que los correspondientes a un techo convencional</li> <li>• Irrigación requerida en zonas de clima semi-árido</li> <li>• Requiere de mantenimiento significativo durante el periodo de establecimiento de la vegetación (primeros dos años)</li> <li>• Su uso se ve restringido por la resistencia estructural de las edificaciones; no obstante hay mayor flexibilidad para nuevas urbanizaciones</li> </ul>

Respecto a su desempeño, algunos trabajos académicos han recopilado información sobre diferentes estudios desarrollados en diferentes partes del mundo. El primero de estos, recopila información del porcentaje de reducción de precipitación o escorrentía en relación con el espesor del sustrato y pendiente del techo de 10 estudios previamente desarrollados en diferentes partes del mundo (Dietz, 2007); el segundo suministra información de 13 casos de estudio donde se mide el nivel de reducción de escorrentía de los techos verdes analizados (Ahiablame et al., 2012). En la Tabla 5 y Tabla 6 se presenta la información descrita.

**Tabla 5. Eficiencia de retención en relación con el espesor del sustrato y pendiente de Techos Verdes (Dietz, 2007).**

Ubicación	Retención de precipitación (%)	Espesor del sustrato (cm)	Pendiente del techo (%)	Referencia
Augustenborg, Suecia	63.0	3.0	2.6	Bengtsson et al. 2005
Oregon, USA	69.0	12.7	-	Hutchinson et al. 2003
Michigan, USA	38.6	2.0	2.0	Monterusso et al. 2004
Michigan, USA	58.1	1.0	2.0	Monterusso et al. 2004
Carolina del Norte, USA	62.0	7.6	-	Moran et al. 2004
Carolina del Norte, USA	63.0	10.2	3.0	Moran et al. 2004
Michigan, USA	69.8	2.5	2.0	Van Woert et al. 2005
Michigan, USA	70.7	4.0	2.0	Van Woert et al. 2005
Michigan, USA	65.9	4.0	6.5	Van Woert et al. 2005
Michigan, USA	68.1	6.0	6.5	Van Woert et al. 2005
<b>Promedio</b>	<b>62.8</b>			

**Tabla 6. Eficiencia de reducción de escorrentía, 13 casos de estudio (Ahiablame et al., 2012).**

Estudio	Ubicación	Reducción de escorrentía (%)
Scholtz-Bart (2001)	Illinois, USA	65.0
Bass and Baskaran (2003)	Ottawa, Canadá	23.0
Liu (2003)	Ottawa, Canadá	54.0
DeNardo et al. (2005)	Pennsylvania, USA	40.0
Van Woert et al. (2005)	Michigan, USA	49-83
Hathaway et al. (2008)	Carolina del Norte, USA	64.0
Bliss et al. (2009)	Pennsylvania, USA	70.0
Roehr and Kong (2010)	Vancouver and Kelowna, Canadá	29-100
Roehr and Kong (2010)	Shanghai, China	55.0
Stovin (2010)	Sheffield, UK	34.0
Voyde et al. (2010)	Auckland, Nueva Zelanda	82.0
Gregoire and Clausen (2011)	Connecticut, USA	51.0
Carpenter and Kaluvakolanu (2011)	Michigan, USA	68.0

Respecto a esta información, se puede notar en el estudio desarrollado en 2007 un porcentaje de reducción de escorrentía entre el 38.6% y el 70.7%; no obstante la información suministrada para el año 2012 da cuenta de valores menores en 3 casos y amplias variaciones en dos casos particulares, el más representativo de 29 a 100% de reducción de escorrentía. De lo anterior, se puede decir que dicha variación en el rango de resultados para un techo verde y los valores extremos encontrados pueden deberse a las diversas condiciones de lluvia (frecuencia e intensidad) a las que se pudieron haber sometido los mismos. Sin embargo, hay que resaltar una marcada prevalencia de buen desempeño en la reducción de escorrentía, pues la mayoría de los resultados se encontraron por encima del 50%. Por otro lado, no es clara la incidencia del espesor del sustrato y pendiente del techo en la reducción de escorrentía.

### 2.3.3 Tanques de Tormenta

Según lo descrito por el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA (2014), de la universidad de los Andes, los tanques de tormenta son depósitos de retención empleados para contener temporalmente el agua de escorrentía pluvial evitando con ello problemas de inundaciones urbanas, los cuales pueden ser clasificados según su funcionalidad, tipología constructiva o tipo de conexión con el sistema de drenaje. Dentro de su funcionalidad, estos pueden controlar los caudales descargados a cuerpos de agua para evitar su inundación, así como controlar la calidad de los vertimientos descargados. Respecto a su tipología constructiva, estos pueden ser depósitos abiertos a la atmósfera, como los sistemas SUDS, o pueden ser depósitos subterráneos como tanques de hormigón de alta capacidad o tanques prefabricados. Finalmente, estos sistemas de control pueden ser instalados considerando una conexión de tipo *on-line* u *off-line* con el sistema convencional de drenaje y plantas de tratamiento.

Dado que el propósito del presente trabajo es comparar dos tipos de sistemas con diferentes mecanismos de control en zonas urbanas altamente densificadas, los tanques de tormenta a los que se hará alusión corresponden a los depósitos subterráneos de gran capacidad<sup>1</sup>, preferiblemente sintéticos. Este tipo de tanques constituyen una de las alternativas más viables cuando la capacidad de las tuberías del sistema convencional no puede ser ampliada, así también en el caso de ciudades altamente densificadas donde es poco factible la instalación de sistemas de control en espacios abiertos. A pesar de ser mecanismos que pueden garantizar altos volúmenes de control, algunas desventajas asociadas a su uso están relacionadas con su costo de instalación, operación y mantenimiento, así como el aporte nulo en paisajismo en comparación con los sistemas abiertos a la atmósfera como los SUDS. Algunos ejemplos de tanques de tormenta prefabricados son los

---

<sup>1</sup> De acuerdo con la información técnica suministrada por la empresa Premier Tech, los tanques prefabricados Conder Storage Tanks (ver Figura 6), tienen capacidad de almacenamiento de 1 a 250 m<sup>3</sup> (Premier Tech - Aqua, 2015).

tanques en forma cilíndrica compuestos por materiales termoplásticos y tanques compuestos por múltiples elementos estructurales o módulos, como se muestra en la siguiente Figura.



Figura 6. Tipos de Tanques de Tormenta subterráneos prefabricados (izq. Conder Storage Tank, der. Aquacell).

## 2.4 Storm Water Management Model – SWMM

El Storm Management Model o Modelo de Gestión de Aguas Pluviales de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA - Environmental Protection Agency), es un modelo de simulación dinámica del agua lluvia, de libre acceso en la página web de la EPA, descrito por Burszta-Adamiak y Mrowiec (2013) como uno de los más empleados en todo el mundo. Éste puede ser empleado para un evento particular de precipitación o para la simulación continua en un periodo extendido. Está en la capacidad de simular tanto la calidad como la cantidad del agua lluvia drenada, especialmente en alcantarillados urbanos. Maneja un Módulo de escorrentía o Hidrológico y un Módulo de Transporte o Hidráulico, que dirigen el análisis de la precipitación y escorrentía en función de cuencas de drenaje y diversos modelos hidrológicos, y a su vez permiten la caracterización puntual del sistema convencional de drenaje compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. De acuerdo a esto, el modelo de la EPA está en la capacidad de seguir la transformación de la calidad y cantidad del agua de escorrentía en cada cuenca, el caudal y nivel de agua en los pozos, y la calidad en cada tramo de tubería o canal, en múltiples intervalos de tiempo. La 5ª versión ha sido desarrollada por la National Risk Management Research Laboratory de la EPA, en colaboración con la firma consultora CDM, Inc (EPA, 2010).

Las técnicas de infraestructura verde (Green Infrastructure – GI) o LID (Low Impact Development) fueron explícitamente introducidas en el algoritmo del modelo en 2010, y posteriormente revisadas

en 2014 para la publicación de la versión 5.1. Los mecanismos de control LID o SUDS incluidos son: celdas de bioretención o alcorques inundables, zonas de bioretención o jardines de lluvia, techos verdes, zanjas de infiltración, pavimentos permeables, tanques de almacenamiento (domiciliarios) y cunetas verdes vegetadas.

En lo que respecta a los techos verdes, SWMM 5.1 define las propiedades de este sistema en función de su estructura multicapa, incluyendo tres fases: superficie, suelo o sustrato y material drenante. Para cada una de estas, el usuario debe ingresar la información técnica relevante para su simulación. Según lo describe Daniel Roehr y Elizabeth Fassman-Beck (2015), SWMM 5.1 asume que la humedad del sistema se moviliza de forma vertical en el proceso de percolación, de acuerdo al modelo de infiltración de Green-Ampt y que el agua precipitada sobre el sistema es drenada luego de que la humedad del sistema alcanza la capacidad de campo del sustrato; consecuentemente, el mínimo contenido de humedad del sistema corresponde al punto de marchitamiento permanente. Dado que los tanques de almacenamiento incluidos en la sección de mecanismos LID corresponden a depósitos del orden residencial, los tanques de tormenta se ven mejor representados por los “sistemas de almacenamiento” o “storage units”, definidos como nodos con alta capacidad de almacenamiento, cuyas propiedades volumétricas pueden ser representadas por tablas o funciones de la superficie de almacenamiento en función de la altura. Otros parámetros característicos de estos sistemas en el modelo son: la cota de fondo, altura máxima del mismo, la proporción de evaporación que se produce en el sistema de almacenamiento, la superficie de almacenamiento del agua estancada cuando hay inundación (parámetro opcional) e información sobre aportantes externos de caudal (parámetro opcional).

## 2.5 Modelo Hidrológico del Soil Conservation Service – SCS

El *Technical Release (TR)-55*, conocido coloquialmente como el método del “Número de Curva” (CN) es uno de los métodos más ampliamente empleados para la estimación del volumen de escorrentía pluvial producido luego de un evento de lluvia. Éste fue desarrollado por el Natural Resources Conservation Service (NRCS), más conocido como el Soil Conservation Service (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. La metodología se encuentra descrita de forma puntual en el *National Engineering Handbook, Part 630 – Hydrology*, disponible en la página web del NRCS con sus últimas actualizaciones.

La gran acogida de este método se debe en gran medida a su simplicidad y razonable precisión en la estimación de escorrentía (especialmente volúmenes de escorrentía) para un evento de lluvia dado (Hawkins et al., 2009) El método introduce una variable cuantitativa (el número de curva) que indica la proporción de escorrentía generada en una zona particular de acuerdo al uso del suelo, el tipo de suelo y algunas condiciones de cobertura vegetal existentes para una magnitud dada de lluvia. Entre mayor sea el número de curva, existe mayor potencial de generación de escorrentía o

mayor proporción de áreas impermeables del suelo. Para áreas urbanas, el CN se encuentra entre valores de 39 y 98. El valor correspondiente al CN puede definirse según las especificaciones técnicas dadas en la Tabla 9-5 del Capítulo 9 del *National Engineering Handbook* (ver Anexo 8.1). Como lo cita Roehr y Fassman-Beck (2015), la expresión empleada para calcular el volumen de escorrentía pluvial corresponde a la siguiente:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{S + P - I_a}$$

Ecuación 1. Cadual de escorrentía - SCS

$$S = \left[ \frac{1000}{CN} - 10 \right] * 25.4$$

Ecuación 2. Almacenamiento en función del CN

Donde, Q es la profundidad de escorrentía por zona de captación (mm o pulgadas), P es la profundidad de lluvia (mm o pulgadas), S es la máxima capacidad de almacenamiento en la zona de captación (mm o pulgadas), CN es el número de curva del área de captación e  $I_a$  es considerado como la profundidad de lluvia a partir de la cual se genera escorrentía (NRCS, 2004, pág. 10-5).

### 3 METODOLOGÍA

El análisis desarrollado se basó en la simulación de un modelo de lluvia-escorrentía del sector Chicó Norte (Bogotá) en la versión 5.1 del software SWMM de la USEPA (United States Environmental Protection Agency). Dado que se quiere verificar y evaluar el comportamiento de sistemas de control de escorrentía pluvial únicamente se trabajó con la red pluvial del sector. Para su desarrollo fue necesario el análisis espacial de la información característica del área de estudio, lo cual fue posible por medio del software ArcGIS 10.1. De acuerdo a lo requerido para el desarrollo del modelo, la recopilación y análisis de información se desarrolló en tres etapas: 1. Caracterización del modelo hidráulico, 2. Caracterización de cuencas, y 3. Definición de parámetros del modelo de infiltración y evento de lluvia. Los cuales se describen con detalle en las siguientes secciones. El modelo hidrológico empleado, como ya se describió en el numeral 2.5 del marco teórico, corresponde al *Technical Release 55* o “Número de Curva” desarrollado por el Natural Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés).

La red de alcantarillado pluvial analizada, red Chicó Norte, fue seleccionada debido a su previa inclusión en el proyecto *Drenaje Urbano y Cambio Climático: Hacia los sistemas de alcantarillado del futuro*, desarrollado por el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes. En dicho proyecto se definieron 3 redes de alcantarillado pluvial de Bogotá, a saber, Chicó Norte, Chicó Sur y Mini-Chicó Sur, por medio de las cuales se planteó el objetivo de probar las metodologías de control y gestión inteligente de redes de drenaje urbano en tiempo real planteadas en el desarrollo del proyecto. De esta forma, la selección de las redes cumplió con criterios de cercanía del sistema a puntos de medición de caudales y niveles, e inclusión de zonas donde se han presentado sobrecargas e inundaciones en puntos localizados. Por lo anterior y teniendo en cuenta que para el sector analizado en el proyecto se desarrolló un análisis hidrológico con escenarios de cambio climático y adicionalmente se desarrolló de forma preliminar el modelo hidráulico de la red Chicó Norte, se consideró apropiado la selección de la misma para su análisis en el presente estudio.

#### 3.1 Caracterización del área de estudio

La red Chicó Norte, ubicada al Nor-Oriente de la ciudad de Bogotá, se definió en torno al área delimitada por las Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGAs) comprendidas entre la Calle 100 y Calle 127, sentido Sur-Norte, y entre la Carrera 7ª y la Autopista Norte, sentido Oriente-Occidente (CIACUA, 2014). Las UGAs fueron definidas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB) con el objetivo de mejorar la gestión administrativa y operativa de cada uno de los sectores que conforman la red de alcantarillado de Bogotá. En la Figura 8 se puede observar la ubicación del

área de estudio en la ciudad y extensión de la misma, y en la Figura 8 las UGAs que se encuentran inscritas en ella.

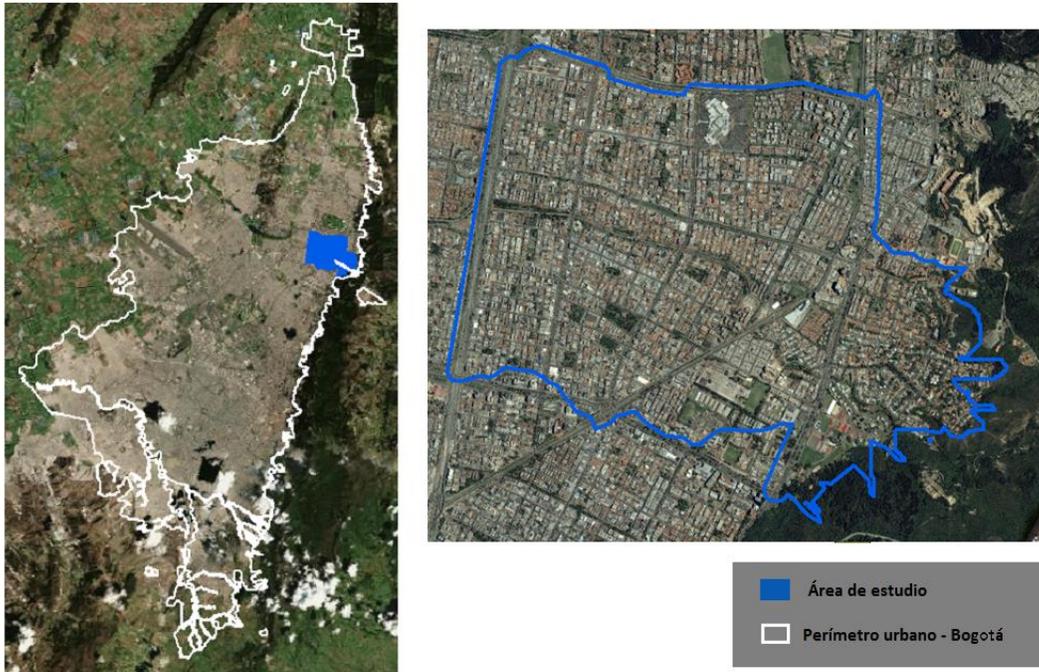


Figura 7. Perímetro urbano de Bogotá y área de estudio



Figura 8. UGAs incluidas en el área de Estudio.

En lo que respecta al área urbana, es indispensable la previa identificación de información espacial característica del área de estudio que será necesaria para su posterior análisis e inclusión en el modelo. Dentro de esta, información relevante sobre la configuración y organización urbana, incluyendo la parcelación de tierras, identificación y ubicación de zonas verdes, parques, plazas y vías es importante para la futura estimación del grado de impermeabilidad del suelo urbano. De igual modo, el uso de suelo será fundamental para la definición del Número de Curva, pues como se mencionó éste consiste en uno de los parámetros determinantes para su estimación. Por otra parte, será necesario el uso de información que defina la topografía del terreno, por lo cual se hará uso de curvas de nivel del terreno. Finalmente, dado que es importante reconocer la factibilidad de implementación de los techos verdes la estratificación socio-económica del suelo urbano puede dar un indicio del tipo de edificaciones o techos y capacidad económica de los residentes.

Sobre la configuración urbana, fue necesario acceder a información catastral suministrada por el Centro de Investigación en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) de la Universidad de los Andes. Con esta fue posible conocer la parcelación del área urbana en las categorías lotes, manzanas y área construida, como se puede ver en la Figura 9 y . Hay que decir que la capa de área construida será el insumo principal, no solo para definir el grado de impermeabilidad, sino para estimar el área factible de implementación de techos verdes. en de la Figura 9 a la Figura 14

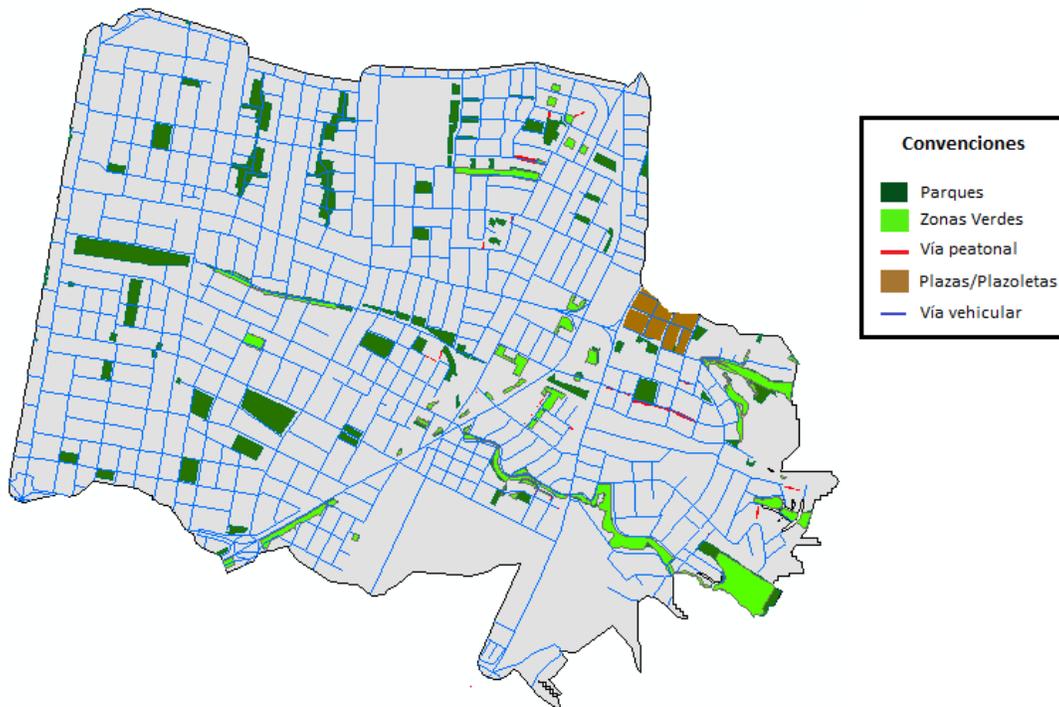


Figura 9. Configuración urbana: (de izq. a der.) área construida, lotes y manzanas.



**Figura 10. Acercamiento a sección del área urbana – área construida, lotes y manzanas.**

Dado que el área de estudio será dividida por subcuencas de drenaje, aferentes a los pozos de inspección del sistema, se han unido diversas capas de información sobre la ubicación de diversas áreas verdes, parques, plazas y trazado de vías, como se observa en la Figura 11. Esto se hace con el fin de caracterizar asertivamente el porcentaje de impermeabilidad de cada subcuenca de drenaje; no obstante, hay que decir que adicionalmente debe hacerse un seguimiento y análisis de imágenes satelitales actualizadas para asegurar la similitud del modelo con la realidad.



**Figura 11. Zonas verdes, parques, plazas y vías.**

En lo que respecta al uso del suelo, gracias a información suministrada por el SUR, fue posible caracterizar el área de estudio como se muestra en la Figura 12, de acuerdo a la siguiente clasificación:

**Tabla 7. Clasificación del uso del suelo por Código Zonal**

<b>Zona</b>	<b>Código zonal</b>	<b>Descripción</b>
<b>Residencial</b>	101	Zona residencial neta
	102	Zona residencial con zona delimitada de comercio y servicios
<b>Dotacional</b>	301	Zona de equipamientos colectivos
	302	Zona de servicios urbanos básicos
<b>Comercio y servicios</b>	401	Zona de servicios empresariales
	405	Zona de comercio cualificado
	408	Grandes superficies comerciales
<b>Área de actividad central</b>	502	Zona de núcleos fundacionales

Como se observa en la Figura 12, predomina el uso de suelo residencial en una proporción mayor al 70%, seguido del uso dotacional y en menor medida el uso comercial y de servicios. El área de actividad central no es significativa, si se compara con la Figura 11 ésta corresponde a la única área de plaza o plazoleta. Al igual que para las áreas abiertas o zonas verdes, ésta información debe ser verificada con imagen satelital, pues a pesar de que se ha definido por lineamientos del POT (Plan de Ordenamiento Territorial), es susceptible de modificaciones por diversos cambios o falencias en el sector constructivo o urbanismo de la ciudad.

Sobre la información topográfica, Chicó Norte se encuentra ubicado a una altura promedio cercana a los 2555 m.s.n.m.; no obstante, como se puede notar en la Figura 13 hacia el oriente incrementa la altura del terreno en forma considerable, alcanzando un nivel máximo de 2728 m.s.n.m. solamente considerando el perímetro urbano. Esto implica una diferencia de 475 m con la curva de nivel más bajo.

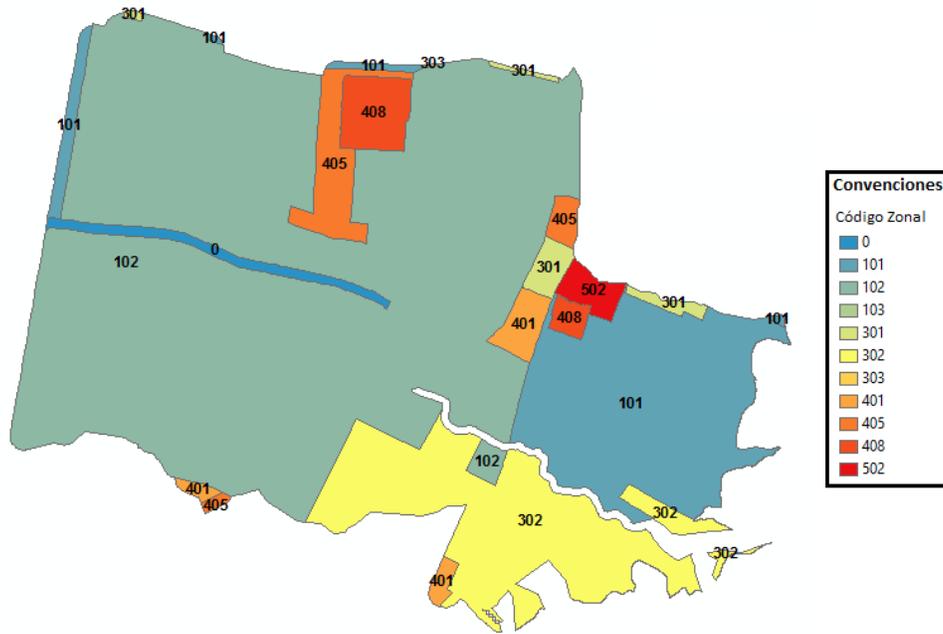


Figura 12. Usos de suelo – clasificación zonal.

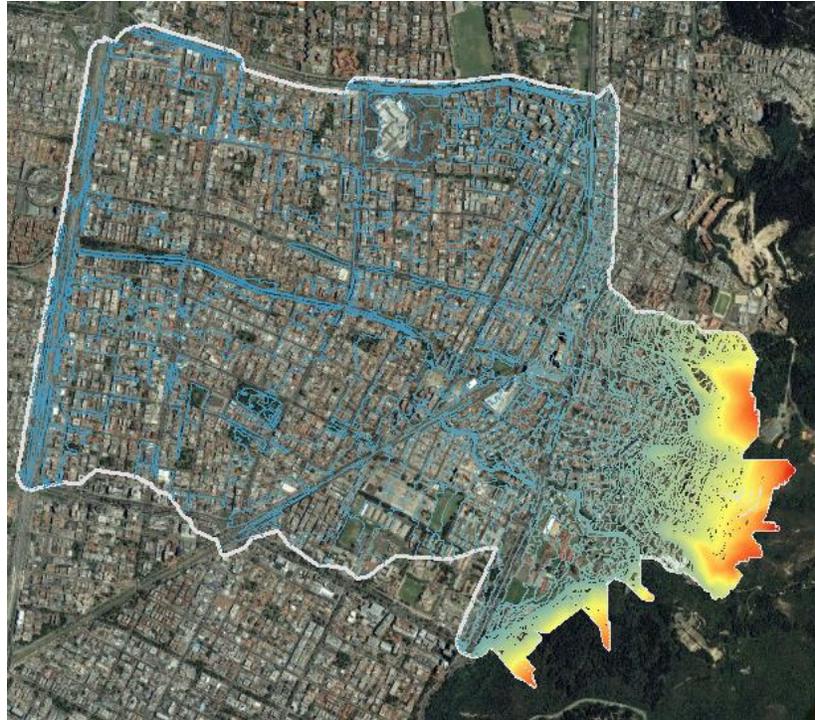


Figura 13. Caracterización topográfica - Curvas de nivel.

Con respecto a la estratificación socio-económica (ver Figura 14), predomina el área residencial de estratos altos (5 y 6), en tanto que existe una proporción muy baja de los estratos 3 y 4, y no se identifican predios de estrato bajo. Lo anterior indica que a pesar de que la mayoría del área de estudio es de tipo residencial, existe una alta factibilidad de que en dichas residencias exista la capacidad económica tanto para la instalación, como para el mantenimiento de los techos verdes.

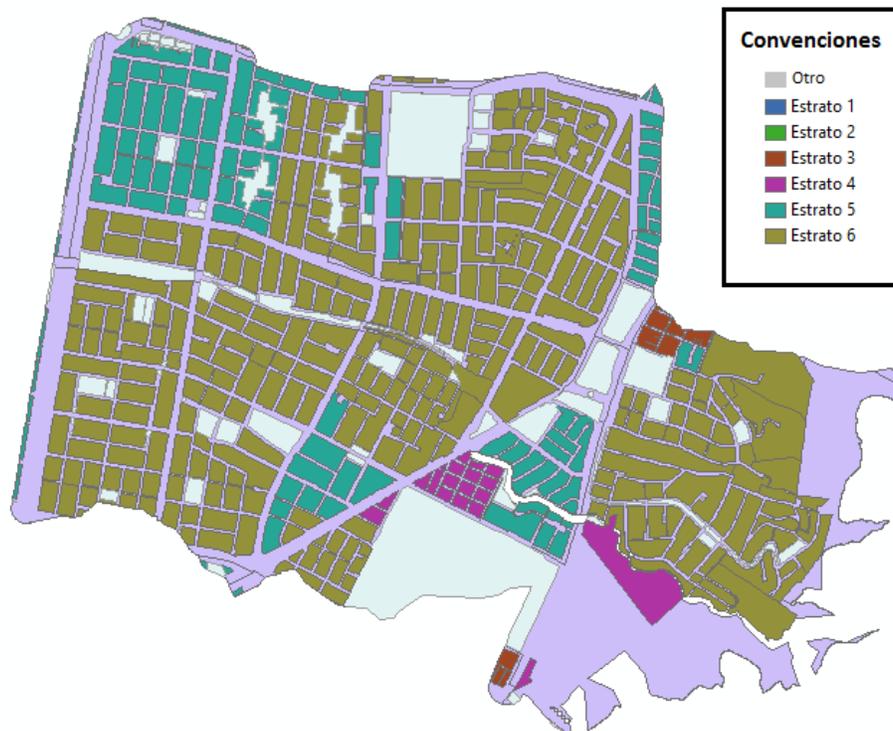


Figura 14. Estratificación socio-económica por manzanas.

### 3.2 Modelación del área de estudio en EPASWMM

Para la simulación del modelo de lluvia-escorrentía es necesario puntualizar la información recopilada en las variables o parámetros definidos por el modelo, lo cual fue desarrollado por medio de las diversas herramientas de análisis de información geográfico brindadas por el software ArcGis. A continuación se listan las variables que fueron modificadas para cada elemento del modelo (Nodos, tuberías y cuencas) como se muestra en la Tabla 8 (parámetros hidráulicos),

Tabla 9 (Parámetros de cuencas) y Tabla 10 (Parámetros del modelo de infiltración). Respecto a los parámetros del modelo de infiltración, estos fueron definidos para cada subcuenca de acuerdo al modelo de infiltración de Número de Curva. Hay que resaltar que los parámetros no especificados en las tablas fueron definidos con los valores que aparecen por defecto en el programa o en blanco,

en el caso de las descripciones y etiquetas (*Tags*). Adicionalmente, gracias a la versatilidad del programa SWMM los grupos de información obtenidos para cada variable fueron incluidos en el modelo de lluvia-escorrentía por medio de la edición de datos en formatos de tipo “.txt”, los cuales tienen compatibilidad con el formato empleado por SWMM (“.inp”).

**Tabla 8. Parámetros Hidráulicos**

<b>Elemento</b>	<b>Características</b>
<b>Nodos</b>	Identificación
	Coordenada X
	Coordenada Y
	Cota de fondo del nodo (m)
	Profundidad del pozo (m)
<b>Tubería</b>	Identificación
	Nodo de entrada
	Nodo de salida
	Forma
	Profundad máxima de la sección transversal o diámetro (m)
	Longitud (m)
	Rugosidad (n de Manning)

**Tabla 9. Parámetros de cuencas**

<b>Elemento</b>	<b>Características</b>
<b>Subcuencas</b>	Identificación
	Patrón de lluvia o hietograma
	Nodo de salida
	Área (ha)
	Ancho (m)
	Pendiente media de la superficie (%)
	Porcentaje de área impermeable (%)
	n de Manning del área impermeable
	n de Manning del área permeable
	Profundidad de almacenamiento en zonas deprimidas de área impermeable (mm)
	Profundidad de almacenamiento en zonas deprimidas de área permeable (mm)
	Porcentaje del área impermeable sin almacenamiento en depresiones (%)
	Flujo interno entre subáreas permeables e impermeables (Salida, Permeable, Impermeable)
	Porcentaje de escorrentía transportada (%)

**Tabla 10. Parámetros del modelo de Infiltración**

Tipo	Variable
<b>Número de Curva</b>	Número de Curva
	Conductividad hidráulica*
	Tiempo requerido para que el suelo saturado esté completamente seco (días)

\* Variable no significativa en el análisis (obsoleta)

### 3.2.1 Parámetros hidráulicos

Como se describió, se tomó como insumo el modelo hidráulico inicial desarrollado por el CIACUA (2014) donde ya se había especificado la topología y diversas características de la red troncal y local, como diámetros, profundidades del pozo, rugosidades, longitud, sección transversal, y cotas de los pozos. No obstante, fue necesaria su revisión y corrección dado que algunos pozos se encontraban repetidos, algunas tuberías quedaban en contrapendiente y las cotas de los pozos tenían un desfase respecto al nivel del terreno. Hay que decir que el modelo desarrollado por el CIACUA se basó en información catastral suministrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la cual presentó bastantes errores sobre la topología y características físicas del sistema, lo que generó la necesidad de depurar la información al momento de construir el modelo; de igual modo, fue necesario el desarrollo de un procedimiento de esqueletización<sup>2</sup>, debido a la complejidad agregada por la gran cantidad de componentes de la misma (CIACUA, 2014). Finalmente, cabe resaltar que la corrección del modelo hidráulico fue posible gracias al apoyo del Asistente Graduado Carlos Montes, quien tuvo gran participación al respecto. Con el fin de dar una noción de la magnitud de la red, en la Tabla 11 se indican la cantidad de los elementos principales que la conforman.

**Tabla 11. Componentes principales de la red Chicó Norte.**

Componente	Cantidad
Tuberías y conductos	1275
Cámaras de Inspección (pozos)	1300
Puntos de descarga	1

Como puede notarse, la cantidad de tuberías y conductos del sistema es menor en 25 elementos en comparación con la cantidad de pozos debido principalmente a la presencia del Canal Molinos el cual hace parte de la red troncal, ubicado en sentido Oriente-Occidente sobre la mitad del área de

<sup>2</sup> Corresponde a un procedimiento donde se busca reducir el tamaño de la red, sin afectar su comportamiento hidráulico.

estudio. Finalmente, en la Figura 15 se presenta la topología de la red, así como cada uno de los componentes que la conforman: red troncal (en verde), red local (en azul), cámaras de inspección (en blanco) y punto de descarga (en rojo).



**Figura 15. Configuración hidráulica de la red de alcantarillado pluvial “Chicó Norte”.**

Cabe resaltar que para la corrección y verificación de la información hidráulica de la red se hizo uso del visor geográfico de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, disponible en la página web: <http://www.acueducto.com.co/wascont/sigue-web/visor/base/index.html> (ver Figura 16).

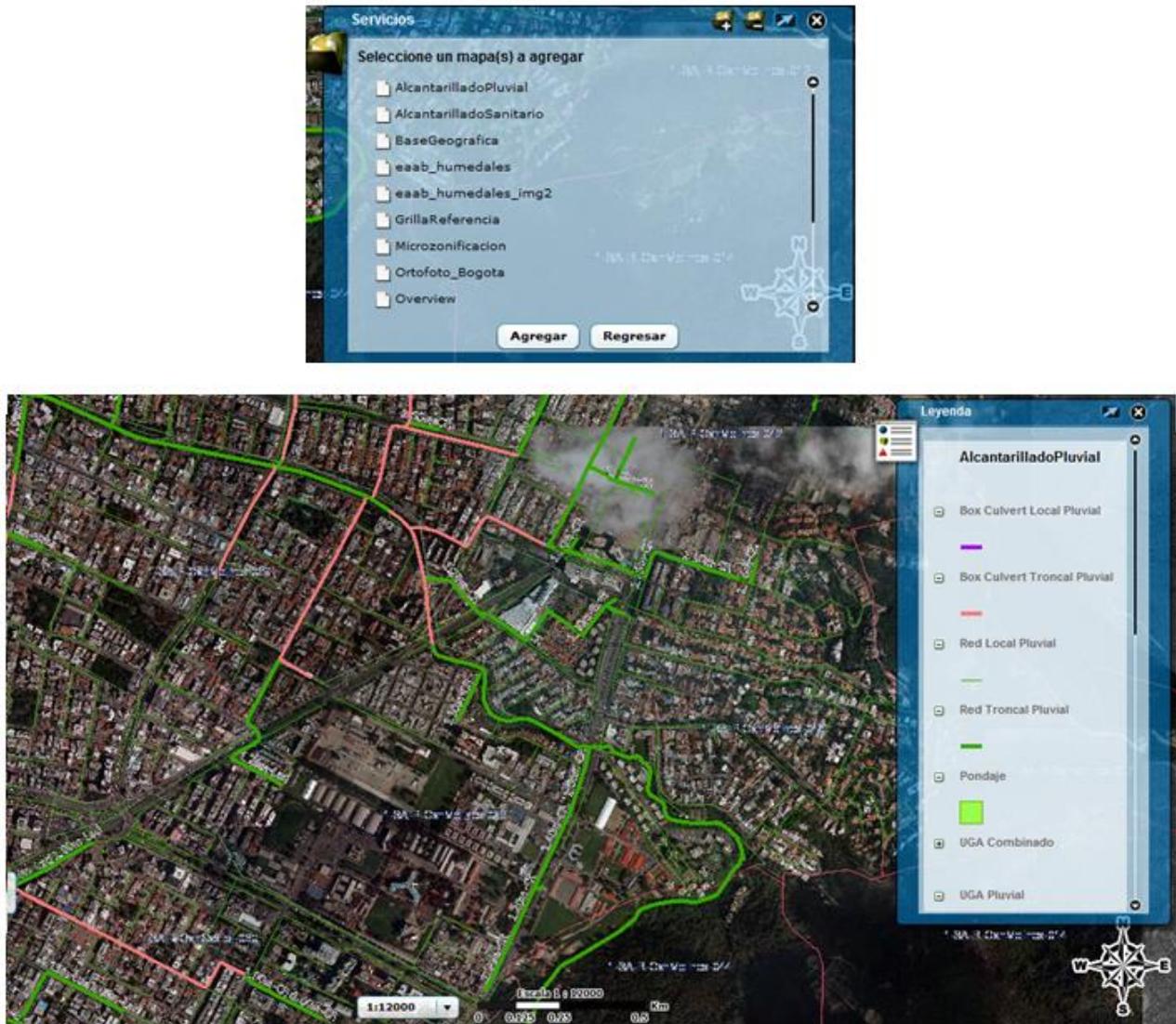


Figura 16. Red Chicó Norte y capas del visor geográfico del acueducto.

### 3.2.2 Parámetros de cuencas

#### 3.2.2.1 Delimitación de Subcuencas

Dado que SWMM trabaja con base en subcuencas de drenaje, para la definición de las mismas en la zona urbana se hizo uso de la herramienta “Create Thiessen Polygons” de ArcGIS teniendo en cuenta las capas de información del perímetro urbano de la red previamente definido y los pozos del sistema de alcantarillado correspondientes al área urbana. En la Figura 17 se detalla el procedimiento seguido. Dado que al costado oriental de la red se cuenta con la presencia de una

extensa zona rural de alta pendiente, se consideró apropiado su inclusión como subcuencas de drenaje aferentes a los pozos colindantes con la zona. De esta forma, para su definición fue necesario aplicar un nuevo procedimiento donde pudiesen identificarse la dirección de flujo y acumulación del agua en función de la topografía del terreno.

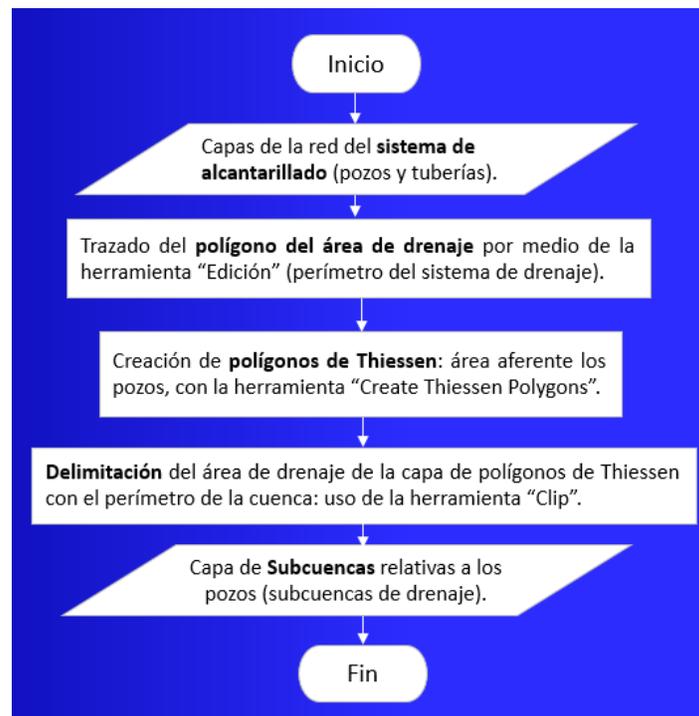


Figura 17. Diagrama de flujo – delimitación de subcuencas de la zona urbana.

La definición de las cuencas de drenaje de la zona rural, cuyo procedimiento se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 18Figura 17, fue posible gracias a la herramienta “Watersheds” de ArcGIS. Esta herramienta permite obtener una capa raster con información de cuencas de drenaje delimitadas por criterios de dirección de flujo y acumulación o empozamiento del agua de acuerdo a la topografía del terreno y sumideros definidos. Posteriormente, para facilitar el manejo de la información obtenida, es posible vectorizar la capa raster por medio de la herramienta “Raster to Polygon” de ArcGIS. En la Figura 19 se observan algunas capas creadas en el proceso de delimitación de subcuencas rurales y área de estudio final; de igual manera, en la Figura 20 se observan las subcuencas de drenaje del área urbana y rural finalmente definidas; en total se definieron 1294 subcuencas de drenaje.

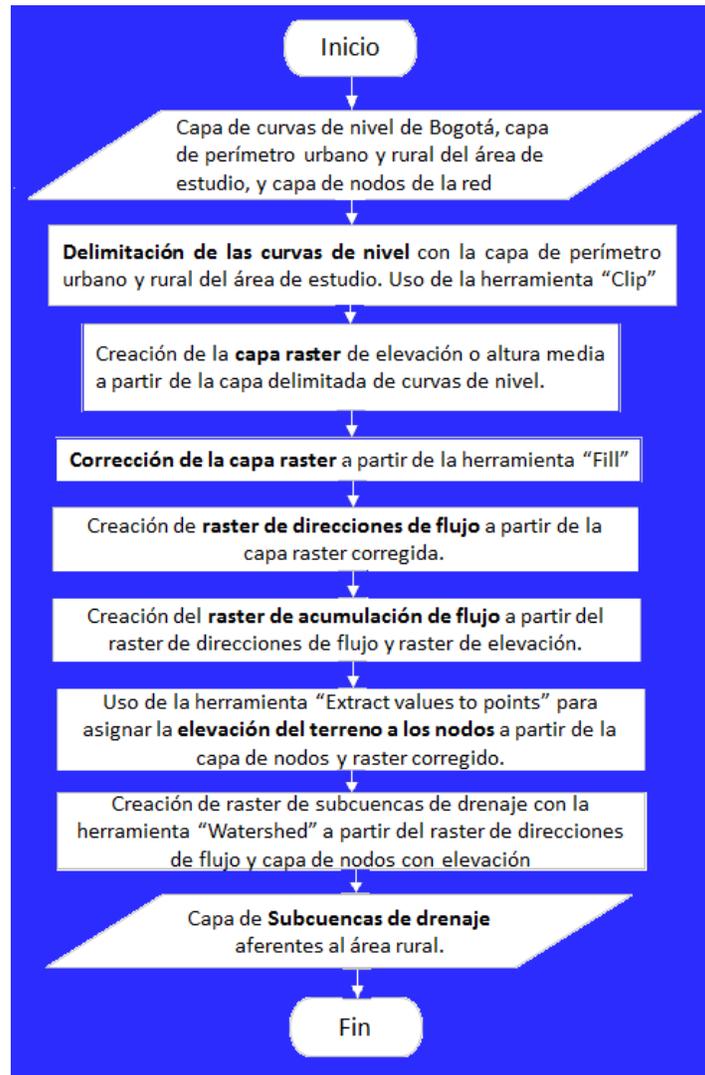


Figura 18. Diagrama de flujo – delimitación de subcuencas de la zona rural.

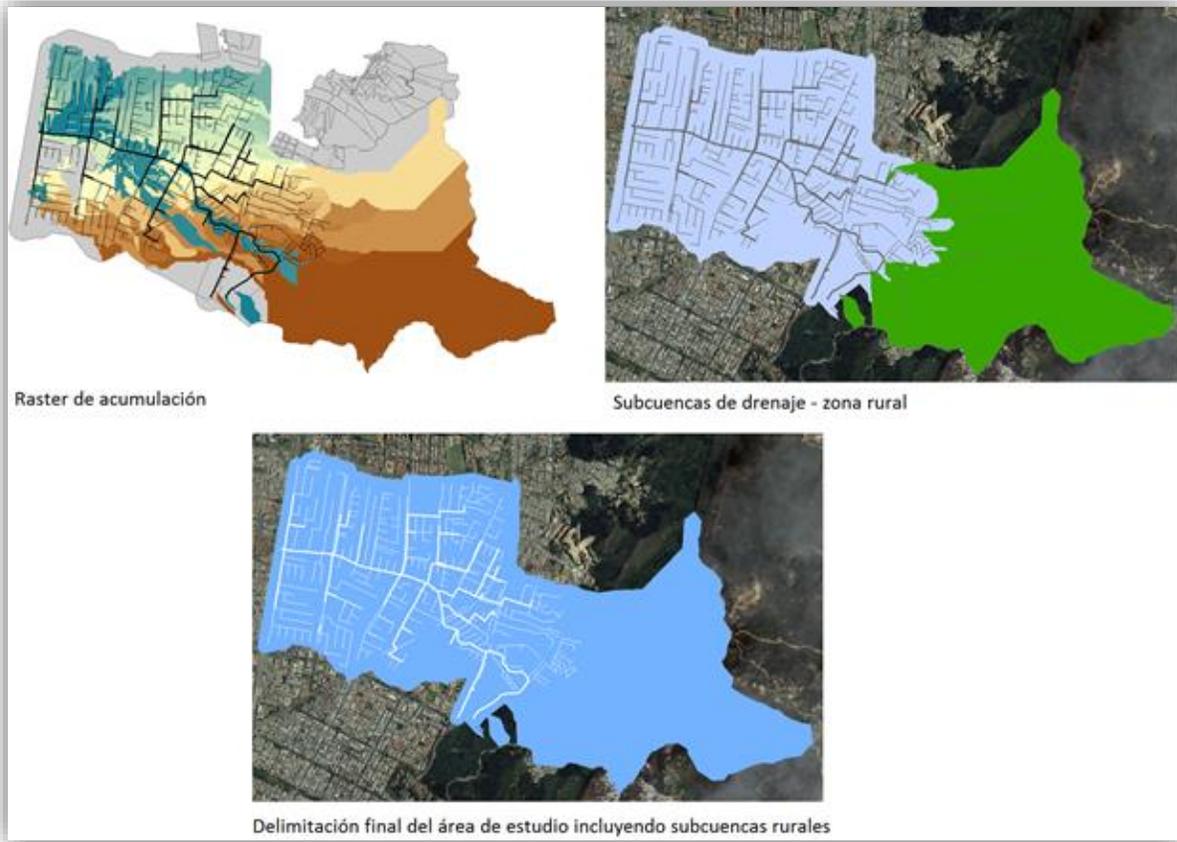


Figura 19. Imágenes del procedimiento de delimitación de subcuencas rurales y área final de estudio.

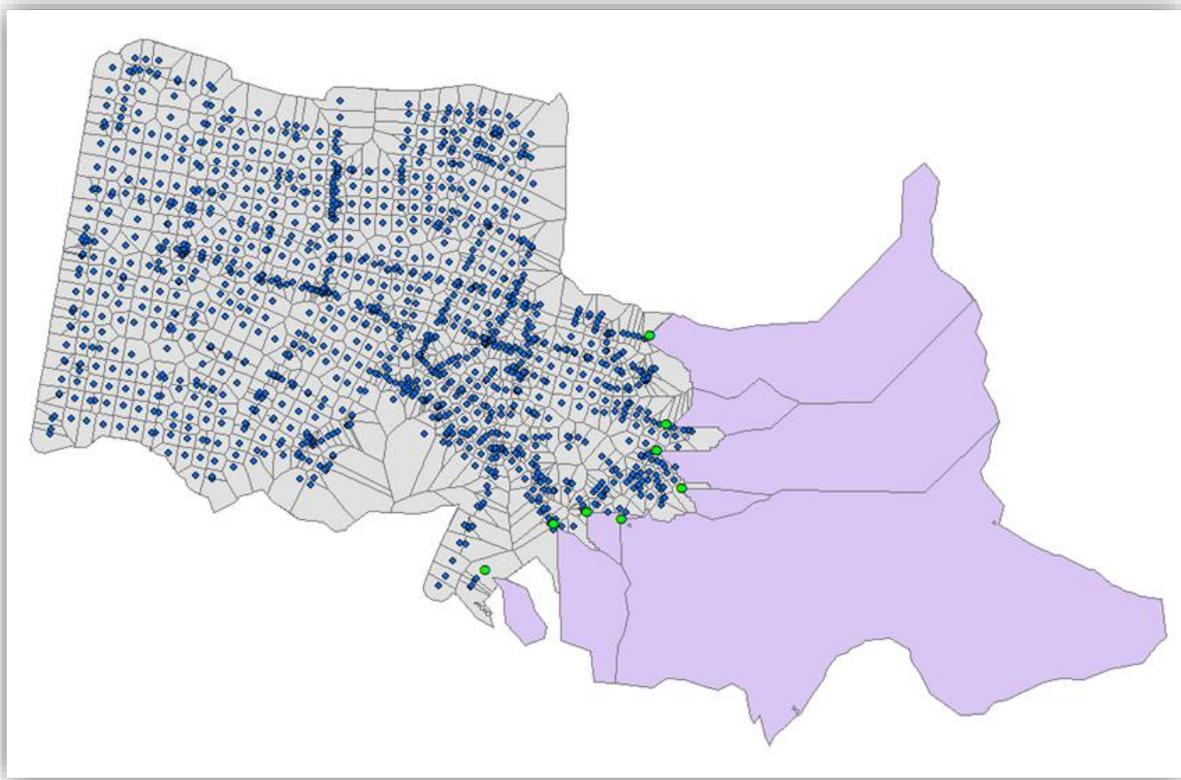


Figura 20. Subcuencas de drenaje y nodos aferentes del área de estudio (zona rural y urbana).

### 3.2.2.2 Área y ancho

El área superficial y ancho de cada una de las subcuencas es posible estimarlo a partir de la herramienta “Zonal Geometry as Table” de ArcGIS, en la cual es posible exportar una tabla “.txt” con una serie de parámetros característicos de las mismas. Dado que el ancho requerido en el modelo corresponde a la distancia entre el punto más alejado de la cuenca y el punto de descarga o drenaje, ésta herramienta es ideal dado que permite calcular el ancho como la longitud del eje mayor de la elipse inscrita en la sección de mayor longitud de cada polígono (ver diagrama de flujo de la Figura 21).

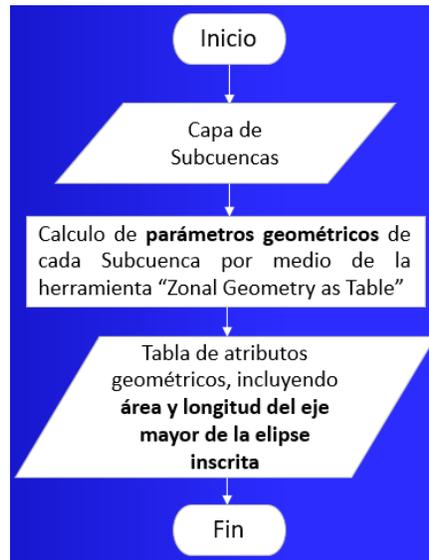


Figura 21. Diagrama de flujo – cálculo del área y ancho de las subcuencas.

### 3.2.2.3 Pendiente media

Respecto a la pendiente media, a partir de la información suministrada por las curvas de nivel, es posible generara una tabla de estadísticas donde se incluya la pendiente media por subcuenca a través de la herramienta “Zonal Statistics as Table” de ArcGIS. Lo anterior es posible con la previa generación de un modelo digital de elevación (DEM) y su posterior parametrización en valores porcentuales del cambio de pendiente, así como la sectorización de la información por subcuencas (ver diagrama de flujo en la Figura 22).

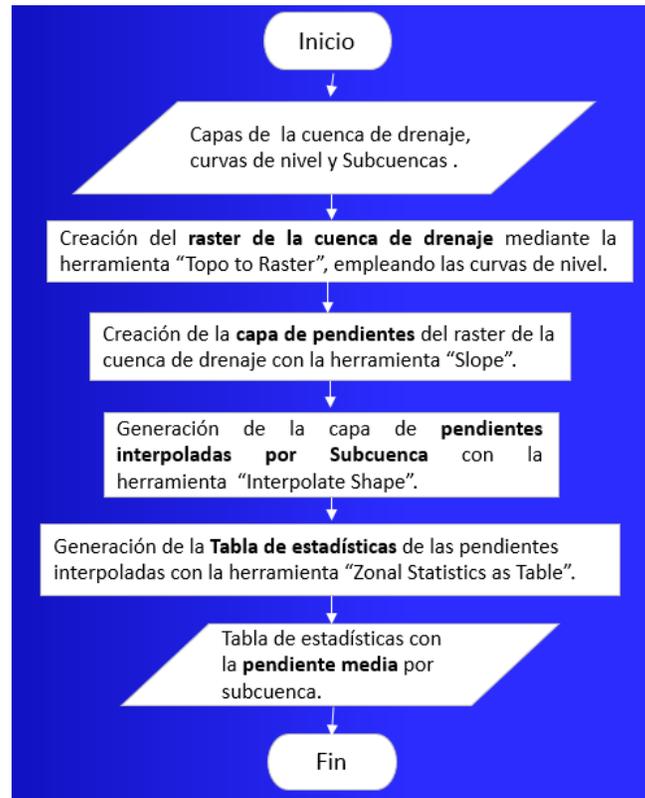


Figura 22. Diagrama de flujo – estimación de la pendiente media de las subcuencas.

#### 3.2.2.4 Porcentaje de área impermeable

Para estimar el porcentaje de área impermeable, fue útil la información geográfica recopilada sobre los usos del suelo, áreas verdes, parques, plazas/plazoletas y vías. La definición del porcentaje de área impermeable por subcuenca se basó, en primera medida en el criterio o clasificación dada por el Natural Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en el capítulo 9 de la sección Hidrológica del *National Engineering Handbook* (Tabla 9-5 incluida en el Anexo 8.1). De acuerdo a esto se procedió a crear una capa de información geográfica donde se caracterice dicho parámetro. Dado que cada subcuenca puede contar con diversos tipos de uso de suelo, se calculó el área impermeable por subcuenca como el promedio ponderado de los valores de área impermeable asignados por tipo de uso de suelo, con relación al área total de la subcuenca (ver Ecuación 3).

Luego de la asignación inicial de porcentajes de área impermeable por tipo de suelo (ver Tabla 12) conforme a lo descrito por la Ecuación 3, se hizo una corrección de los valores asignados a algunas zonas urbanas (según lo define el código zonal de usos de suelo) verificando la información por

medio de fotografías satelitales actualizadas<sup>3</sup>, y la información geográfica de áreas verdes, parques, plazas/plazoletas, andenes y vías. En total se corrigieron 25 zonas de uso de suelo, de acuerdo a lo que se muestra en la Tabla 13. El mapa resultante de la asignación de valores por subcuenca se muestra en el Anexo 8.4.

**Tabla 12. Asignación inicial de porcentajes de área impermeable por tipo de suelo**

Zona	Código zonal	Descripción	% Área Impermeable
<b>Residencial</b>	101	Zona residencial neta*	12 a 65
	102	Zona residencial con zona delimitada de comercio y servicios	65
<b>Dotacional</b>	301	Zona de equipamientos colectivos	25
	302	Zona de servicios urbanos básicos	
<b>Comercio y servicios</b>	401	Zona de servicios empresariales	85
	405	Zona de comercio cualificado	
	408	Grandes superficies comerciales	
<b>Área de actividad central</b>	502	Zona de núcleos fundacionales	30

\* Valor dependiendo del área comprendida por la zona residencial

**Tabla 13. Valores de área impermeable corregidos por zonificación de uso de suelo.**

Área (Código de área)	Identificador de Zona	Número Zonal	% AI	Promedio
<b>Residencial (1)</b>	6	102	78.6	47.9
	5	102	20	
	8	101	90	
	19	101	12	
	23	101	55	
	9	103	80	
	2	101	0	
<b>Dotacional (3)</b>	20	301	5	32.1
	21	301	80	
	18	303	65	
	22	301	60	
	24	301	30	
	15	302	5	

<sup>3</sup> La EAAB cuenta con información geográfica e imágenes satelitales actualizadas disponibles en la página web <http://gme.acueducto.com.co/datos/>.

	4	302	12	
	3	302	0	
<b>Comercio y Servicios (4)</b>	10	405	90	88.1
	11	408	85	
	12	405	90	
	25	401	80	
	1	408	90	
	14	401	90	
	16	405	90	
	17	401	90	
<b>Actividad Central (5)</b>	7	502	85	85

$$\%AI_{S_i} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (\%AI_j * A_j)}{A_{S_i}}$$

Ecuación 3. Área impermeable ponderada.

Donde,  $\%AI_{S_i}$  = porcentaje de área impermeable de la subcuenca de drenaje  $i$  (%),  $A_{S_i}$  = área total superficial de la subcuenca de drenaje  $i$  (ha),  $\%AI_j$  = porcentaje de área impermeable asociado al tipo de suelo  $j$  (%),  $A_j$  = área superficial de la subcuenca  $i$  asociado al tipo de suelo  $j$  (ha),  $n$  = cantidad de tipos de uso de suelo en la subcuenca  $i$ .

### 3.2.2.5 Coeficiente de rugosidad para áreas permeables e impermeables

El coeficiente de rugosidad o  $n$  de Manning se definió de acuerdo a los valores establecidos en la Guía de Diseño *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos* (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 1997). Los valores se presentan en el Anexo 8.2. Dada la alta variabilidad del espacio urbano y tipo de vegetación del área rural, se asignaron valores aleatorios con distribución de probabilidad uniforme, considerando como límite superior e inferior del rango de opciones a los valores extremos dados por la Guía de Diseño. En el área urbana (zona predominantemente impermeable) se consideró un rango de valores comprendidos entre 0.011 y 0.035; en tanto que para el área rural se consideró un rango de valores entre 0.03 y 0.16.

### 3.2.2.6 Almacenamiento en depresiones de áreas permeables e impermeables

El almacenamiento en depresiones hace alusión al agua estancada o almacenada en zonas hundidas o deprimidas en la subcuenca. Típicamente, en zonas impermeables dicho valor se encuentra en un rango entre 1.25 y 2.5 mm; mientras que en zonas permeables tal magnitud varía

entre 2.5 y 7.5 mm (Iglesias & Martínez, 2013). De manera similar al procedimiento desarrollado para definir el coeficiente de Manning, dada la alta variabilidad de escenarios en la ciudad y zona rural, se asignaron números aleatorios comprendidos en los rangos anteriormente descritos para cada subcuenca, dependiendo del grado de impermeabilidad. No obstante, dado que la zona rural (costado oriental de la red) presenta alta pendiente el rango definido para la zona permeable fue el correspondiente a céspedes y hierba (2.5 a 5 mm), como se observa en la Tabla 14.

**Tabla 14. Valores típicos de almacenamiento en depresiones (Iglesias & Martínez, 2013)**

Tipo de superficie	Profundidad de almacenamiento (mm)
Zonas Impermeables	1,25 - 2,5
Césped/Hierba	2,5 - 5
Pastos/Prados	≈ 5
Lecho Forestal	7,5

### **3.2.2.7 Porcentaje de área impermeable sin almacenamiento en depresiones**

Para definir el porcentaje de área impermeable se consideró la posibilidad de que las áreas construidas, entre estas vías peatonales y vehiculares, techos de edificaciones, puentes, y plazas pavimentadas tuviesen adecuadas condiciones de drenaje o evacuación del agua de escorrentía. Lo anterior, dado que el área urbana de estudio presentó una alta proporción de predios de estrato alto (estrato 5 y 6), se considera que existe una alta proporción del área impermeable que no permite el almacenamiento del agua en zonas deprimidas. Por lo anterior, considerando la variabilidad de la configuración urbana, se definieron valores aleatorios entre el 75 y 100% para las subcuencas urbanas, las subcuencas rurales mantuvieron un valor de 0%.

## **3.2.3 Parámetros del modelo de infiltración y evento de lluvia**

### **3.2.3.1 Modelo de infiltración**

Aunque SWMM permite estimar la generación de escorrentía y nivel de infiltración de la zona de estudio con diversos modelos de infiltración (Horton, Green-Ampt y Número de Curva), se consideró que el Método del Número de Curva es el más apropiado dado que requiere de pocos parámetros y consiste en un método confiable. Los parámetros requeridos en SWMM son: coeficiente del número de curva (CN) y tiempo de secado. El primero de los parámetros depende de dos factores principales, uso de suelo y características de la subcuenca, y tipo de suelo (Grupo Hidrológico A, B, C y D, dependiendo de su configuración). El segundo de estos valores varía entre 2 y 14 días (Iglesias & Martínez, 2013); no obstante, dada la caracterización de cuencas definida por el CIACUA (2014),

el valor estándar definido para las subcuencas corresponde a 7 días. Más adelante se verificará con el análisis de sensibilidad, que dicho valor no tiene incidencia alguna en los resultados del modelo.

En lo que respecta a la definición del CN, fue necesario crear una capa de información geográfica en ArcGIS a partir de la información suministrada por el Mapa de Zonas Geotécnicas, desarrollado en conformidad con el Decreto 523 de 2010 por la Unidad Administrativa Especial de Catastro de la Secretaría Distrital de Planeación. El mapa y clasificación de zonas geotécnicas se incluye como anexo en el presente documento (Anexo 8.3). En el Decreto 523 de 2010 se da una descripción detallada de la composición principal de cada uno de los tipos de suelos definidos, lo que hace posible su asociación con el Grupo Hidrológico definido en por el método del SCS para la posterior identificación del CN (ver Tabla 15). En el Anexo 8.6 se muestra una imagen de la capa de información geográfica desarrollada con las zonas geotécnicas del área de estudio. Por otro lado, la selección del CN de cada subcuenca se dio cruzando la información del tipo de suelo y uso de suelo correspondiente. Inicialmente, en cada subcuenca, para cada grupo de suelo (A, B, C o D) se calculó un valor de CN ponderado por la fracción de área correspondiente a los usos de suelo incluidos en los el tipo de suelo en cuestión (ver Ecuación 4). Posteriormente, se pondera el valor de CN asignado a cada tipo de suelo con relación al área ocupada en la subcuenca (ver Ecuación 5). La asignación final del CN correspondiente a cada subcuenca se muestra en el Anexo 8.5.

**Tabla 15. Relación zonas geotécnicas en Chicó Norte (Decreto 523 de 2010) con el Grupo Hidrológico de Suelo (SCS).**

Zona geotécnica	Composición principal	Grupo Hidrológico (SCS)
<b>Aluvial</b>	Arenas arcillosas sueltas a compactas	A
<b>Cauce</b>	Gravas arenosas sueltas a compactas	A
<b>Cerros A</b>	Areniscas duras	A
<b>Depósito ladera</b>	Gravas arenosas sueltas a compactas	A
<b>Lacustre A</b>	Arcillas limosas muy blandas	D
<b>Piedemonte A</b>	Gravas areno arcillosas compactas	C
<b>Piedemonte B</b>	Gravas areno arcillosas compactas	C

$$CN_{ji} = \%A_c * CN_c + \%A_{In} * CN_{In} + \%A_R * CN_R + \%A_{DP} * CN_{DP} + \%A_{ED} * CN_{ED}$$

**Ecuación 4. CN por tipo de suelo**

Donde,  $CN_{ji}$  = Número de Curva del tipo de suelo  $j$  de la subcuenca  $i$ ,  $\%A_c$  = fracción de área comercial en el tipo de suelo  $j$ ,  $\%A_{In}$  = fracción de área industrial en el tipo de suelo  $j$ ,  $\%A_R$  = fracción de área residencial en el tipo de suelo  $j$ ,  $\%A_{DP}$  = fracción de área desarrollada permeable

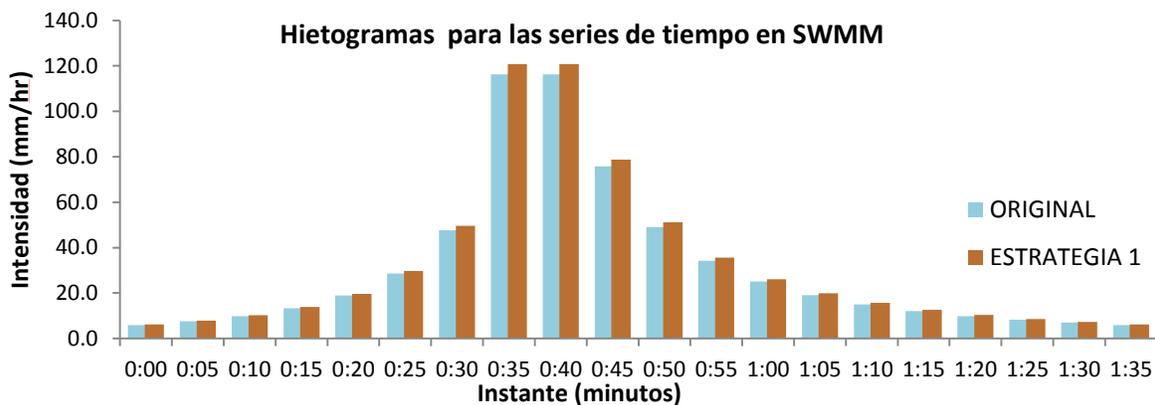
en el tipo de suelo  $j$  y  $\%A_{ED}$  = fracción de área en desarrollo del tipo de suelo  $j$ . La variable  $CN$  hacer referencia al Número de Curva de cada uso de suelo según el subíndice.

$$CN_{S_i} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (CN_{ji} * A_j)}{A_{S_i}} \quad \text{Ecuación 5. CN ponderado por área}$$

Donde,  $CN_{S_i}$  = Número de Curva de la subcuenca de drenaje  $i$ ,  $A_{S_i}$  = área total superficial de la subcuenca de drenaje  $i$  (ha),  $CN_{ji}$  = Número de Curva asociado al tipo de suelo  $j$  de la subcuenca  $i$ ,  $A_j$  = área superficial asociada al tipo de suelo  $j$  de la subcuenca  $i$  (ha),  $n$  = cantidad de tipos de suelo en la subcuenca  $i$ .

### 3.2.3.2 Evento de lluvia

Dado que la red Chicó Norte fue una de las tres redes seleccionadas en el proyecto *Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro*, desarrollado por el CIACUA, se incluyó un análisis exhaustivo de la precipitación en la zona de estudio (incluyendo Chicó Norte). De esta forma, se analizaron 5 escenarios de cambio climático a partir de los cuales se obtuvieron los hietogramas correspondientes al evento de lluvia de diseño de las redes (Inés Camilloni et al., 2014). Las estaciones pluviométricas empleadas en el análisis se muestran en la Figura 23. Dado que el análisis del modelo de lluvia-escorrentía bajo diversos escenarios de cambio climático se sale del alcance del presente trabajo, únicamente se seleccionaron 2 hietogramas de diseño, a saber, la serie original y la “Estrategia 1” especificada para la red Chicó Sur. Las dos series se asignaron de forma aleatoria a las subcuencas para agregar variabilidad espacial de la precipitación en el área de estudio (ver Gráfica 1).



Gráfica 1. Hietogramas de diseño para el modelo de lluvia-escorrentía Chicó Norte (CIACUA, 2014)



Figura 23. Estaciones pluviométricas – análisis hidrológico Chicó Norte y Chicó Sur (CIACUA, 2014, p. 35).

### 3.3 Análisis de sensibilidad

Con la finalidad de conocer la respuesta del modelo ante las diversas variables características de las cuencas y del modelo de infiltración seleccionado, se ha desarrollado un análisis de sensibilidad donde cada una de las variables es analizada de forma independiente. La metodología empleada consistió en definir grupos de datos clasificados por percentiles con base en la información consignada o base de datos de cada variable. En la mayoría de los casos se emplearon cuartiles; no obstante hubo variables que no permitían la creación de más de 2 o 3 grupos de datos. Posterior a la generación de percentiles o grupos de datos, se generaron números aleatorios con el rango de datos comprendido en cada grupo, teniendo en cuenta una distribución normal. Para cada uno de los casos, luego de generar los números aleatorios de la variable objetivo, se simuló el modelo en SWMM con el fin de obtener y comparar el hidrograma de salida del sistema con el hidrograma de la red original. Las variables analizadas fueron: área, porcentaje de área impermeable, ancho, pendiente media, n de Manning de áreas impermeables, n de Manning de áreas permeables, almacenamiento en depresiones de áreas permeables e impermeables, porcentaje de área

impermeable sin almacenamiento en depresiones, Número de Curva, flujo entre subáreas y tiempo de secado. Las gráficas correspondientes a los hidrogramas de salida comparativos de cada parámetro se incluyen en el Anexo 8.7.

A continuación se muestran los rangos definidos para cada uno de los grupos de datos de las variables analizadas.

**Tabla 16. Rango de valores por grupo de datos de cada parámetro – análisis de sensibilidad**

Parámetro (Unidad)	Rango de valores por grupo de datos			
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Área (ha)	[12.5 - 2156]	[2156 - 417]	[4172 - 7152]	[7152 - 25884759]
%Área Impermeable (%)	[0 - 0.552]	[0.552 - 0.786]	[0.786 - 0.9]	-
Ancho (m)	[2.05 - 37.54]	[37.54 - 54.48]	[54.58 - 72.37]	[72.37 - 896.14]
Pendiente (%)	[0.01 - 0.65]	[0.65 - 3.54]	[3.54 - 54.78]	-
n-Manning Imp.	[0 - 0.009]	[0.009 - 0.016]	[0.016 - 0.017]	-
n-Manning Perm.	[0 - 0.021]	[0.021 - 0.078]	[0.078 - 0.13]	-
s- Impermeable (mm)	[1.25 - 1.59]	[1.59 - 1.88]	[1.88 - 2.19]	[2.19 - 2.5]
s - Permeable (mm)	[2.5 - 3.19]	[3.19 - 3.99]	[3.99 - 4.69]	[4.69 - 7.49]
%AI sin A/D (%)	[60 - 70]	[70 - 80]	[80 - 90]	[90 - 100]
Número de Curva (-)	[39 - 70.75]	[70.75 - 102.5]	[102.5 - 134.3]	[134.3 - 166]
Flujo entre subáreas	"Outlet"	"Impervious"	"Pervious"	-
Tiempo de secado (días)	[1 - 3]	[3 - 6]	[7 - 10]	[10 - 15]

Para la generación aleatoria del grupo de datos comprendido en los rangos descritos en la Tabla 16, de manera que se cumpla una distribución de probabilidad normal, es necesario identificar la desviación estándar y la media del conjunto de datos. Dado que se cuenta con los valores extremos de cada conjunto de datos, el la media se define como el promedio de los valores extremos, en tanto que la desviación estándar se obtiene definiendo previamente un intervalo de confianza. En el caso del conjunto de datos creados, se consideró un intervalo de confianza mayor al 99.74%<sup>4</sup>. La expresión empleada para su cálculo se describe a continuación (Ecuación 6).

$$v_{\min_i} = \bar{x}_i - 4\sigma_i \quad \Rightarrow \quad \sigma_i = \frac{\bar{x}_i - v_{\min_i}}{4}$$

**Ecuación 6. Desviación estándar – análisis de sensibilidad.**

<sup>4</sup> La expresión  $\bar{x} \mp 3\sigma$  indica un intervalo de confianza del 99.74% en una distribución normal.

Donde  $v_{min}$  = extremo inferior del rango definido para el conjunto de datos  $i$ ,  $\bar{x}_i$  = promedio del conjunto de datos (promedio de los valores extremos) y  $\sigma_i$  = desviación estándar del conjunto de datos.

### 3.4 Escenario con Techos Verdes

Dado que se quiere analizar el nivel y tipo de control que es capaz de ejercer este sistema sobre la generación de escorrentía urbana y mitigación de inundaciones, se modeló un escenario de alto nivel de incidencia donde el 100% del área construida es factible de implementación de techos verdes. Como se mencionó en el marco teórico, la caracterización de los techos verdes en EPA-SWMM se determina por medio de la parametrización de tres capas o niveles que lo conforman: superficie, suelo o sustrato y material drenante. Para este escenario se consideró conveniente la definición de un solo tipo de techo verde (“TV1”), cuyas variables se consideran estándar, de acuerdo a una revisión bibliográfica previa. Los parámetros de cada capa del techo se muestran en la Figura 24. Para definir el número de techos verdes en cada subcuenca, se calculó el área construida y se dividió por un área promedio de 250 M<sup>2</sup>, adicionalmente, el ancho se calculó como la raíz cuadrada del área, suelo seco (porcentaje del suelo inicialmente saturado) y ningún aporte de agua de escorrentía proveniente de áreas impermeables, únicamente el aporte por lluvia.

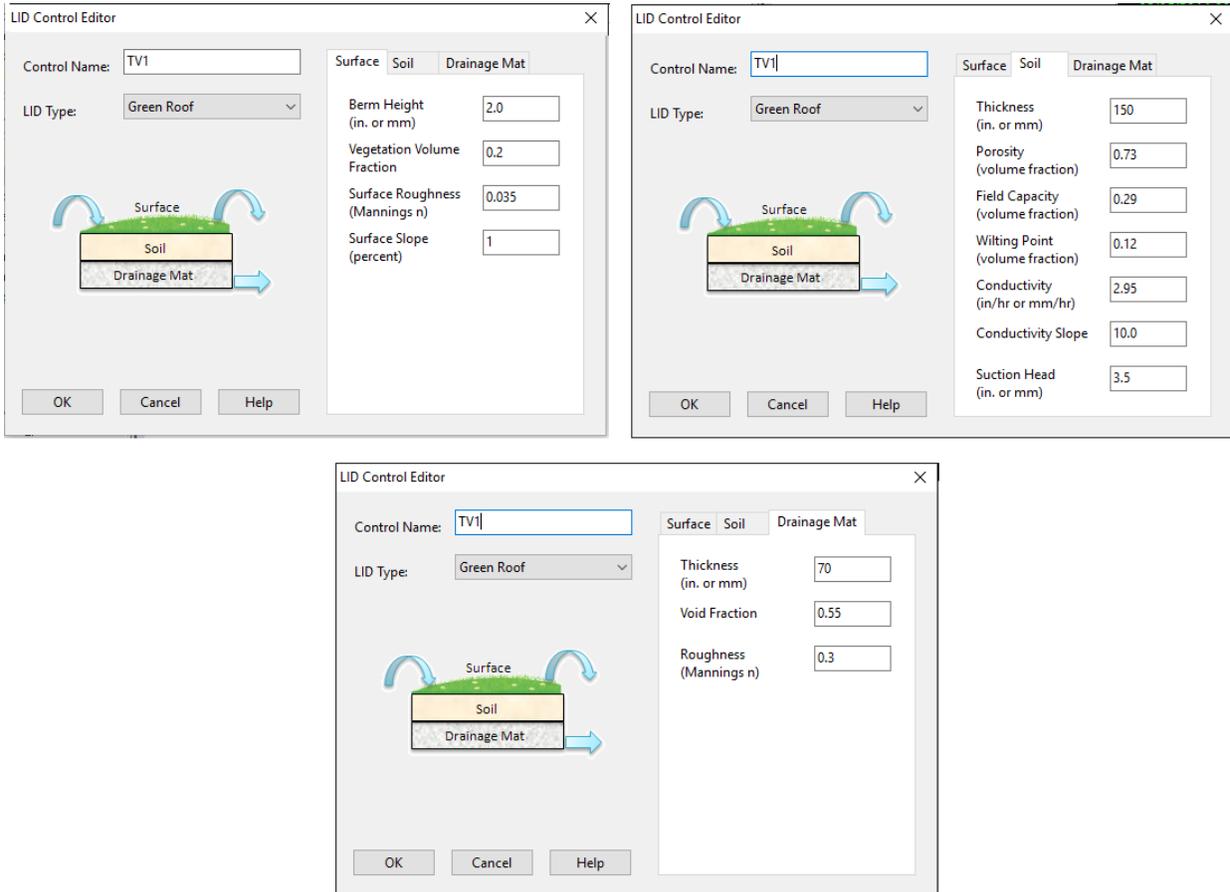


Figura 24. Parámetros de EPA-SWMM para un Techo Verde estándar.

### 3.5 Escenario con Tanques de almacenamiento

La simulación del escenario con Tanques de almacenamiento se llevó a cabo a partir de la conversión de algunos nodos de la red original en “*Storage Units*” (unidades de almacenamiento), para los cuales fue necesario evaluar la función de la superficie de almacenamiento en función de la altura del volumen almacenado. Al convertir el nodo en una unidad de almacenamiento, permanecen las mismas propiedades de cota de fondo y altura máxima del nodo o pozo, y dado que se quiere generar depósitos regulares, el área de almacenamiento no debe cambiar con la profundidad. Por lo anterior en la función expresada como  $A = A * h^B + C$ , donde A corresponde al área de almacenamiento, h corresponde a la profundidad de almacenamiento y, B y C a variables características de la geometría del depósito, se define el exponente B y la constante C iguales a cero. Con lo anterior solo es necesario definir el área ocupada por el depósito, la cual permanece constante con la profundidad del agua almacenada con máxima profundidad igual a la del pozo.

Al igual que en el escenario de techos verdes es deseable recrear un escenario de alta representatividad donde pueda analizarse el potencial de control de escorrentía y mitigación de inundaciones. Para definir la ubicación de los tanques, se analizó en lapsos de tiempo de 15 minutos el comportamiento del sistema durante el evento de lluvia. Esto fue posible gracias a las aplicaciones de visualización de los caudales de inundación en los nodos de la red por medio de la herramienta “Map Query”. Al simular la red original, se encontró que la red presentaba su estado más crítico, en términos de inundaciones, al minuto 45, en el cual se presentaban 21 pozos con inundación superior a los 800 litros por segundo (ver Figura 25). De acuerdo a esto se ubicaron inicialmente 21 tanques en los nodos con mayores volúmenes de inundación, todos con 500 m<sup>2</sup> de área. Posteriormente, luego de realizar varias pruebas e intentar reducir el número de tanques al incrementar el volumen de los tanques en zonas críticas, se definió un escenario final de 16 tanques: uno de 1000 m<sup>2</sup>, tres de 850 m<sup>2</sup>, dos de 800 m<sup>2</sup>, cuatro de 500 m<sup>2</sup> y seis de 350 m<sup>2</sup>. El criterio final de selección de tanques tuvo en cuenta el cambio gradual de inundación de pozos del sistema en el lapso de tiempo más crítico: del minuto 0:45 a 1:25 (ver Figura 26). Cabe resaltar, que la profundidad máxima de los tanques quedó definida en 2.2 m de acuerdo a la información proveniente de los pozos de inspección iniciales.



Figura 25. Nodos de la red Chicó Norte con inundaciones superiores a los 800 lps en el minuto 45.





Figura 26. Ubicación de tanques y caudal de inundación en nodos y tanques del minuto 0:45 a la 1:15.

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Análisis de sensibilidad

Luego de simular el modelo con el conjunto de datos generado para cada rango definido en la Tabla 16, se ha analizado el comportamiento del caudal de salida del sistema por medio de la generación de hidrogramas; éstos se presentan con detalle en el Anexo 8.7. Para visualizar de forma resumida y concreta los resultados obtenidos, se ha decidido analizar y comparar el caudal pico generado en cada simulación en comparación con el caudal pico obtenido a la salida del sistema original. De esta forma en la Tabla 17 se presentan los resultados por variable y rango de datos. El caudal pico del sistema original fue de 7088.98 lps.

**Tabla 17. Resultados del análisis de sensibilidad – comparación con caudales pico.**

Caudal Pico (LPS) y diferencia relativa absoluta (%)						
Variable	Rango 1	Rango 2	Rango 3	Rango 4	Promedio	Sensibilidad
Área	1321.23	3396.15	5276.25	14110.47	6026.03	Alta
	81.4%	52.1%	25.6%	99.0%	<b>64.5%</b>	
%AI	5892.09	6950.61	7234.43	-	6692.38	Media
	16.9%	2.0%	2.1%	-	<b>6.96%</b>	
Ancho	5749.88	6274.42	7088.75	9437.92	7137.74	Alta
	18.9%	11.5%	0.003%	33.1%	<b>15.9%</b>	
Pendiente	6879.4	8155.45	9752.26	-	8262.37	Alta
	3.0%	15.0%	37.6%	-	<b>18.5%</b>	
n-Imp	7250.62	7154.29	7143.12	-	7182.68	Baja
	2.3%	0.9%	0.8%	-	<b>1.3%</b>	
n-Perm	9580.05	7656.28	5557.19	-	7597.84	Alta
	35.1%	8.0%	21.6%	-	<b>21.6%</b>	
S-Imp	7292.46	7154.29	7320.02	7229.37	7249.04	Baja
	2.9%	0.9%	3.3%	2.0%	<b>2.3%</b>	
S_Perm	7385.07	7336.79	7256.92	6481.39	7115.04	Media
	4.2%	3.5%	2.4%	8.6%	<b>4.7%</b>	
AI_sinAD	7288.75	7189.1	7210.82	7077.16	7191.46	Baja
	2.8%	1.4%	1.7%	0.2%	<b>1.5%</b>	
CN	1652.87	7288.35	10738.44	10738.44	7604.53	Alta
	76.7%	2.8%	51.5%	51.5%	<b>45.6%</b>	
Flujo entre subáreas	7542.22	7191.09	-	-	7366.66	Media
	6.4%	1.4%	-	-	<b>3.9%</b>	
Tiempo de Secado	7088.98	7088.98	7088.98	7088.98	7088.98	Nula
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	<b>0.0%</b>	

En la Tabla 17, las variables “n-Imp” y “n-Prem” corresponden al coeficiente de Manning o rugosidad del área impermeable y permeable, respectivamente; las variables “s-Imp” y “s-Perm” hacen referencia a la profundidad de almacenamiento en depresiones del área impermeable y permeable, y la variable “AI\_sinAD” es el porcentaje de área impermeable sin almacenamiento en depresiones.

De acuerdo a lo que se puede observar en la Tabla 17, las variables más influyentes en el modelo son el área, ancho, pendiente, rugosidad de la superficie del área permeable y el Número de Curva, de las cuales sobresalen las variables área y Número de Curva con variaciones promedio del caudal pico generado respecto al sistema original del 64.5% y 45.6%, respectivamente. Por otro lado, se identifica una incidencia leve de las variables porcentaje de área impermeable, profundidad de almacenamiento en depresiones de áreas permeables y el tipo de flujo entre subáreas. Finalmente, las variables menos influyentes en el modelo fueron la rugosidad de la superficie de la zona impermeable, la profundidad de almacenamiento en zonas impermeables, el porcentaje de área impermeable sin almacenamiento en depresiones y tiempo de secado. Respecto a esta última, no se encontró variación alguna de los resultados del modelo en el lapso de tiempo analizado, por lo cual se identifica como una variable de incidencia nula en el modelo.

Con respecto al análisis de sensibilidad, debe decirse que las variables que deben ser estimadas con mayor precisión y exactitud son aquellas identificadas con un alto grado de influencia en el modelo, en especial el procedimiento de delimitación de cuencas y el cálculo del CN de cada subcuenca. Lo anterior dado que errores asociados a las mismas incrementarían en gran medida el nivel de incertidumbre, así como el grado de precisión del modelo respecto al comportamiento real del sistema. Llama la atención, el bajo nivel de influencia de las variables representativas de la zona impermeable: rugosidad del terreno, profundidad de agua almacenada en depresiones y proporción de ésta que no permite almacenamiento, lo que deja en claro el poco nivel de influencia de las variables asociadas a la configuración urbana y su posible interacción. No obstante, debe decirse para la definición del Número de Curva, una de las variables de mayor influencia en el modelo, fue necesaria la recopilación de información relevante sobre la configuración urbana, específicamente la relacionada a la distribución y extensión de usos de suelo, presencia de parques, zonas verdes y áreas abiertas, por lo que es de gran importancia su adecuada caracterización. Finalmente, se observa que las variables de mayor influencia son aquellas asociadas a la caracterización topológica y topográfica de las cuencas, así como el grado de almacenamiento y permeabilidad de las mismas, lo que deja de manifiesto el alto grado de interdependencia entre ellas.

A pesar de que el análisis de sensibilidad buscó incluir una gran variedad de rangos de datos en cada variable, su análisis se limitó al grupo de datos inicial incluido en la caracterización de cuencas; es decir, únicamente se contempló la variación de los parámetros del modelo en relación con los valores previamente definidos para cada una de ellas en el modelo original. Lo anterior implica que variaciones de otro orden de magnitud, no contempladas en el rango de datos definidos para los

parámetros del modelo original pueden generar mayor incidencia en los resultados en comparación con lo presentado en la Tabla 17. Por otro lado, dado que el presente análisis se dio de forma independiente para cada variable, se ignora la posibilidad de que exista cierta interacción e interdependencia entre diversos grupos de variables de tal forma que puedan influenciar en conjunto el comportamiento del modelo. Por lo anterior, resultaría apropiado desarrollar un análisis con esta aproximación en futuros trabajos.

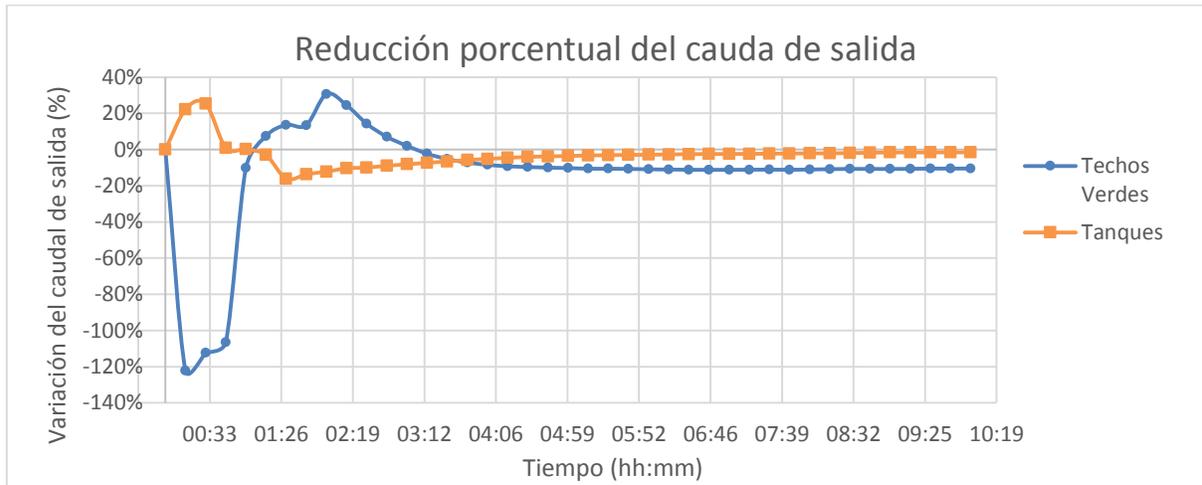
## 4.2 Evaluación de escenarios

Reconociendo que los principales impactos ambientales a cuerpos de agua receptores se generan por el incremento tanto de los volúmenes de agua vertidos, como de los caudales pico generados por el diseño de sistema de drenaje basados en el paradigma de la rápida evacuación del agua urbana, la evaluación de los escenarios se basó en el análisis de los hidrogramas de salida del sistema y el volumen de inundaciones mitigado en comparación con el modelo original de lluvia-escorrentía de la red Chicó Norte.

### 4.2.1 Hidrogramas de salida

Para los escenarios de control de escorrentía definidos, en los cuales se procuró un alto nivel de implementación de los sistemas evaluados, se analizó el cambio del caudal drenado en el sumidero de descarga de la red a partir de su variación relativa en el tiempo en relación con el hidrograma de salida del sistema original (ver Gráfica 2). Este análisis permitió identificar el tiempo de reacción de los mecanismos de control en cuanto a la reducción del caudal drenado, así como la magnitud de mitigación del caudal descargado a los cuerpos de agua receptores en un tiempo determinado. Como se puede observar en la Gráfica 1, la serie de tiempo de los eventos de lluvia tiene su máxima intensidad entre el minuto 30 y el minuto 50, lo que permite tener una referencia temporal de la acción de control ejercida por los mecanismos a evaluar. De acuerdo a esto, en la Gráfica 2 se observa una intersección de las curvas generadas por cada mecanismo, la cual se da en un tiempo muy cercano al tiempo de generación del caudal pico del modelo original. De esta forma dado que una variación porcentual positiva en el eje y de la Gráfica 2 implica la reducción en el caudal de salida, se puede notar que los tanques de almacenamiento reducen el caudal de escorrentía drenado en el tiempo previo y durante la generación del caudal pico del sistema original, en tanto que los techos verdes mitigan el volumen descargado posteriormente a la generación del caudal pico. Adicionalmente, se puede notar una reacción opuesta entre ambos mecanismos a lo largo de toda la serie de tiempo, pues mientras los tanques de almacenamiento reducen el caudal drenado en el tiempo previo a la generación del caudal pico, la implementación techos verdes permite el incremento de los caudales a la salida del sistema; y caso contrario cuando los techos verdes ejercen control sobre el caudal. Finalmente, se puede notar que la máxima reducción de caudal se da por

cuenta de los techos verdes con una reducción del 34% en comparación con los tanques cuya valor máximo fue del 24%.



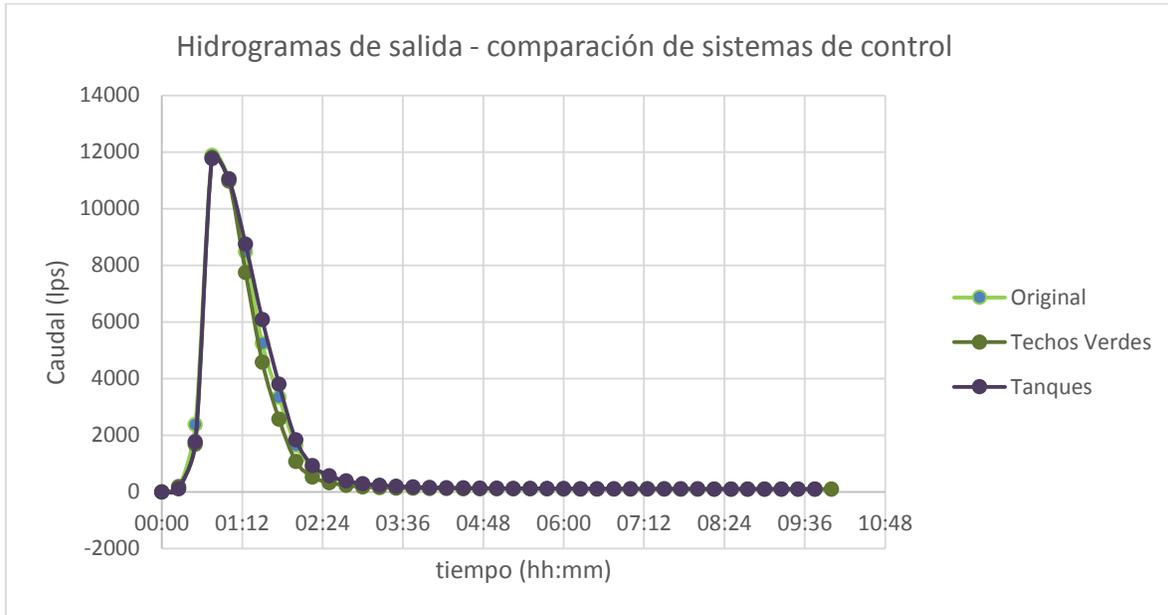
**Gráfica 2. Variación del hidrograma de salida de los escenarios de control de escorrentía respecto al sistema original.**

Al comparar los hidrogramas de salida generados por el escenario de techos verdes, tanques de tormenta y modelo original no se observa a simple vista un cambio representativo sobre el control del caudal, tal situación se da por los altos volúmenes drenados por el sistema; no obstante, como se presentó en la Gráfica 2, la reducción del caudal supera el 20% durante el momento más crítico para los dos casos seleccionados. En la Gráfica 3 se muestran los hidrogramas correspondientes. Como se puede observar en la Tabla 18, en ninguno de los dos escenarios de control modelados se logró una reducción mayor al 1% en el caudal pico de descarga.

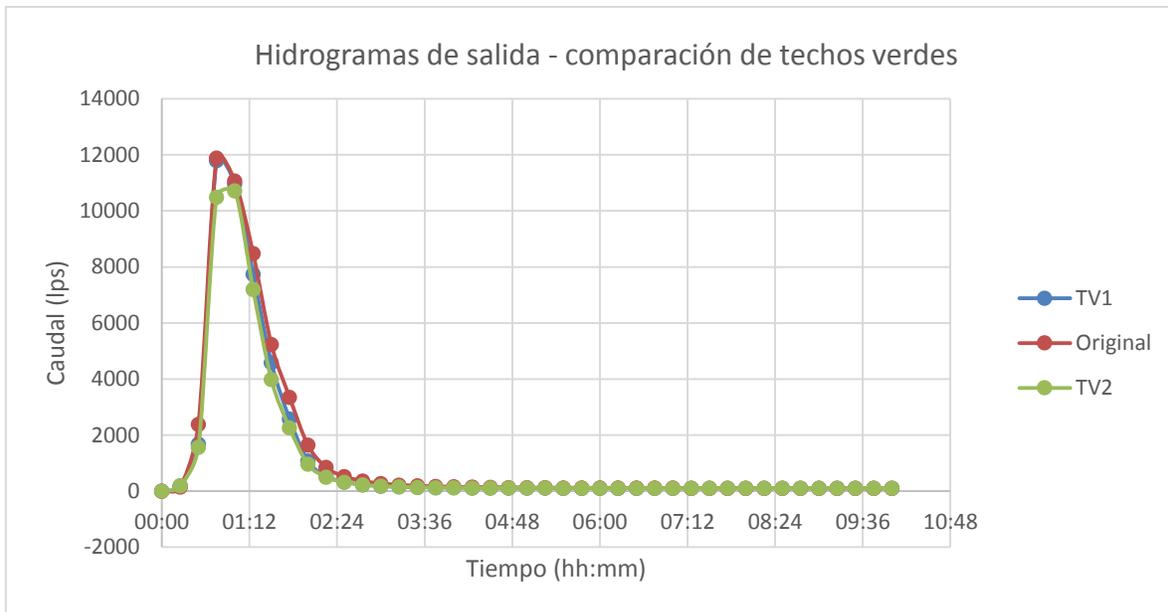
**Tabla 18. Reducción del caudal pico – escenarios de control.**

Escenario	Original	Techos Verdes	Tanques
Caudal pico (lps)	11889.13	11803.0	11777.1
Diferencia relativa	-	0.72%	0.94%
Caudal reducido (lps)	-	86.1	112.1

Por otro lado, durante las pruebas realizadas en el escenario de control con techos verdes, se identificó que la variable berma de la superficie del techo tiene una alta incidencia en la cantidad del volumen retenido por el sistema, lo cual se vio reflejado en una reducción del caudal pico en un 9.8% cuando se empleó una berma de 30 mm (Techo Verde T2 en la Gráfica 4).



**Gráfica 3. Hidrogramas de salida de los escenarios de control y modelo original.**



**Gráfica 4. Hidrogramas de salida con escenario de techos verdes con berma de 2 y 30 mm (TV1 y TV2).**

Como se puede ver en la Gráfica 4, existe la posibilidad de generar un mayor control sobre el caudal pico a la salida del sistema en el escenario de techos verdes, lo que deja de manifiesto la necesidad de evaluar las propiedades descritas para el techo verde estándar “TV1” definidas en el modelo. Por otro lado, cabe decir que a pesar de la gran cantidad de escenarios modelados con tanques de almacenamiento, no fue posible identificar cambios importantes en el control del caudal pico, lo que puede deberse a la forma en que fue configurado el sistema de tanques, considerando su cantidad, ubicación y capacidad de los mismos. Dado que existe una amplia posibilidad de escenarios apropiados para el control de la escorrentía, se recomienda acudir a metodologías de optimización; algunas de estas descritas por el CIACUA (2014) en el Informe de la Fase 1 del proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: Hacia los sistemas de Alcantarillado del Futuro”.

#### 4.2.2 Inundaciones

Al acudir a la información suministrada en la tabla “Node Flooding” de la sección de Resumen de Resultados brindado por SWMM se ha sumado el volumen total de inundación de todos los nodos de la red bajo los escenarios propuestos y modelo original. Al desarrollar este procedimiento se encuentra un volumen de inundación de 296484 m<sup>3</sup> en el modelo original, de los cuales 14300 m<sup>3</sup> (4.8%) son evitados en el escenario de tanques de almacenamiento, mientras que en el escenario de techos verdes dicho volumen aumentó en 8885 m<sup>3</sup> (3%) (Ver Tabla 19). Respecto a esto, puede concluirse que si bien los techos verdes permiten cierta reducción del volumen de agua precipitado por medio de la evapotranspiración y retención en el sustrato, estos mecanismos no resultan efectivos para el almacenamiento de un volumen apreciable de agua lluvia de tal manera que se reduzca el volumen de inundación. Contrariamente a lo esperado, los techos verdes parecen afectar negativamente el sistema de drenaje pluvial incrementando las inundaciones, lo que puede ser explicado por el tiempo y forma de reacción de este mecanismo, el cual evidenció reducciones de caudal a la salida del sistema solo después de la generación del caudal pico.

Tabla 19. Reducción en el volumen de inundación - escenarios de control.

Escenario	Original	Techos Verdes	Tanques
Volumen total de inundación (m3)	296484	305369	282184
Diferencia relativa	-	-3.0%	4.8%
Volumen reducido (m3)	-	-8885	14300

## 5 CONCLUSIONES

Con el proceso de urbanización se ha generado la transformación del espacio natural, incrementando la superficie impermeable y generando nuevas necesidades de evacuación tanto del agua lluvia como del agua residual para evitar su concentración en zonas urbanas y prevenir la afectación de la salud pública. Por lo anterior, con el paso de los años se han creado diversos sistemas de drenaje urbano, pasando por sistemas de evacuación de aguas lluvias en canales abiertos y empleo de pozos sépticos para el manejo de aguas residuales en ciudades como Londres, hasta los sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario convencionales que se conocen hoy en día: sistema combinado y sistema separado. A pesar de que el sistema convencional logró solucionar el problema de la rápida evacuación de aguas urbanas para prevenir inundaciones, esta solución implicó a su vez la generación de nuevos problemas ambientales y de salud pública, esta vez asociados a la contaminación, erosión de cauces y mayor propensión de inundación de los cuerpos de agua receptores. Por lo anterior, en las últimas décadas se ha venido evaluando la posibilidad de implementar nuevos elementos o sistemas de control complementarios al sistema convencional que permitan una concepción del drenaje urbano de forma más integral y sostenible.

Los diversos mecanismos de control de escorrentía propuestos con la nueva aproximación del drenaje urbano como los conocidos SUDS o BMP, implican en su mayoría sistemas de instalación en áreas abiertas, y en ocasiones extensas, que buscan integrarse con el espacio urbano, aportando valor estético y recreativo además de la mejora en la calidad y reducción de la cantidad de escorrentía generada por la zona urbana. Por otro lado, el uso de varios de estos mecanismos se ve restringido por la disponibilidad de espacio en áreas urbanas altamente densificadas, por lo que su número se ve drásticamente reducido en estos casos. Uno de estos mecanismos factibles de implementación en zonas altamente densificadas corresponde a los techos verdes, que por su gran atractivo y reconocimiento a nivel internacional ha sido seleccionado para el análisis en el modelo de lluvia-escorrentía. Adicional a este tipo de sistemas, surgen los tanques de tormenta, los cuales prometen altas capacidades de almacenamiento, sin alterar el suelo urbano en su superficie. Dado que también se constituyen en un mecanismo fiable de retención y a su vez permiten su operación y control en conjunto con la dinámica del sistema de drenaje, también fueron seleccionados para su análisis en el modelo y posterior contraste con los techos verdes.

En la búsqueda bibliográfica sobre las características de estos sistemas se identificaron algunas ventajas adicionales al mecanismo de control de escorrentía en el caso de los techos verdes, tales como la capacidad para regular la temperatura de las edificaciones, reducir la incidencia de la luz ultravioleta sobre el techo incrementando la vida útil del mismo, mitigar el efecto de isla de calor asociado a las zonas urbanas y crear espacios de alto valor paisajístico, en contraste con los tanques de tormenta. No obstante, el conocimiento y difusión del uso de estos sistemas en la ciudad es

limitado y requiere de importante atención para su mantenimiento. En el caso de los tanques, estos no presentan beneficios adicionales como los mencionados para techos verdes y a su vez representan altos costos de instalación y mantenimiento; no obstante a diferencia de los techos verdes estos brindan la oportunidad de trabajar con sistemas de control y operación en conjunto con el sistema de alcantarillado de la ciudad.

Al respecto del software empleado (SWMM), se considera que es una herramienta práctica, completa y versátil para su uso en el análisis de la información relacionada a redes de drenaje urbano, pues permite la exportación e introducción de datos en formatos de texto, lo que facilitó el manejo de la amplia base de datos en la parametrización del modelo. Por otra parte, el modelo de infiltración seleccionado para el análisis fue el Número de Curva, el cual se consideró apropiado por la reducida cantidad de parámetros requeridos: tiempo de secado, CN y conductividad hidráulica; de los cuales solo el CN influyó en el modelo, pues la conductividad hidráulica se considera innecesaria por SWMM, y a su vez se identificó una influencia nula de la variable tiempo de secado en el análisis de sensibilidad.

En lo relacionado con la Metodología, fue indispensable iniciar con la recopilación de información geográfica que permitiera la adecuada caracterización del área de estudio, insumo para el posterior análisis espacial y definición puntual de los parámetros del modelo. En este proceso es fundamental contar con información actualizada, así como acudir a fuentes de información fiables para procurar el mayor acercamiento posible del modelo con las condiciones reales. Para el análisis espacial se hizo uso del software ArcGIS, el cual cuenta con herramientas apropiadas para la delimitación y caracterización de las cuencas de drenaje. En cuanto al modelo hidráulico, es importante verificar la adecuada conectividad del sistema y la correcta recreación topológica de la red en conformidad con los registros o información catastral disponible. Este proceso es fundamental para la adecuada representación del funcionamiento hidráulico real de la red y con ello lograr resultados fiables sobre el volumen de inundaciones e hidrogramas de salida.

Respecto al análisis de sensibilidad se identificó una baja influencia de algunas variables características del área impermeable como rugosidad del terreno, agua almacenada en depresiones y proporción del área que no permite almacenamiento en depresiones, las cuales se definen de acuerdo a las características propias del entorno urbano. No obstante, a pesar de la baja influencia de este grupo de parámetros, el Número de Curva, cuyo valor depende de la configuración urbana en los usos del suelo, influyó en gran medida el modelo. El modelo fue altamente sensible a las variables topológicas, topográficas y aquellas que definen la facilidad de paso, estancamiento o infiltración del agua en el suelo de las subcuencas (área, ancho, pendiente, CN y rugosidad de la superficie permeable); las cuales se encuentran estrechamente relacionadas.

Con respecto a los resultados obtenidos en los escenarios incluidos en el modelo de infiltración, se encontró una muy baja influencia de los mecanismos de control en la reducción del caudal pico de escorrentía del sistema, logrando reducciones inferiores al 1% para ambos sistemas. Lo anterior, en el caso de techos verdes, pudo deberse a los parámetros identificados como estándar para su caracterización, pues como se vio, al modificar la berma de la superficie del techo verde se logró reducir el caudal pico a la salida del sistema en un 9.8%. En el caso de los tanques tal situación pudo darse por la distribución y capacidad dada a los mismos. Por otra parte, se encontraron tiempos de respuesta diferentes y contrarios entre los mecanismos analizados. Mientras los tanques parecen tener un mecanismo de acción temprano (previo a la generación del caudal pico), los techos verdes permitieron la reducción del caudal drenado luego de la generación del caudal pico. Por lo anterior, al inicio de la serie de tiempo, actuando de forma contraria a los tanques, el hidrograma producido por los techos verdes mostró mayores caudales en comparación con el hidrograma del sistema original, lo que pudo influir en el aumento del volumen de inundación en un 3%. Caso contrario, los tanques permitieron una reducción del 4.8% del volumen de inundación.

## 6 RECOMENDACIONES

Dado que el análisis de sensibilidad abordado en el presente trabajo tuvo en cuenta la influencia en el modelo de cada variable de forma independiente, se recomienda desarrollar un futuro análisis donde se tenga en cuenta las distintas interacciones multiparamétricas en el funcionamiento del modelo; en especial, de las variables topológicas, topográficas y de aquellas que definen el nivel de retención, movilización y filtración del agua en el suelo, las cuales parecen tener un alto nivel de interdependencia. Así mismo, se reconoció como una limitación el conjunto de datos sobre los cuales se desarrolló el análisis de sensibilidad, el cual se estableció conforme a los valores definidos previamente en cada variable de las subcuencas de infiltración. Por lo anterior, se recomienda ampliar el rango de análisis en las variables cuyos valores no variaron en mayor medida al ser definidos. Finalmente, se recomienda hacer una previa verificación de las variables más influyentes en la definición de sistemas de control LID o unidades de almacenamiento (*Storage Units*) con el fin de definir con mayor precisión aquellas que sean determinantes en los resultados arrojados por el modelo.

## 7 REFERENCIAS

- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water Air Soil Pollution*, 223: 4253-4273.
- Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaría Distrital de Planeación. (Diciembre de 2010). Mapa No 1 - Zonas Geotécnicas (Escala 1:40.000). Bogotá, Colombia: Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (16 de Diciembre de 2010). Decreto 523 de 2010 - Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D. C. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Banco Mundial. (2012). *Colombia Urbanization Review: amplifying gains form urbanization*. Obtenido de [openknowledge.worldbank.org](https://openknowledge.worldbank.org):  
<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/11955/724620PUB0Publ067926B09780821395226.pdf?sequence=1>
- Burszta-Adamiak, E., & Mrowiec, M. (2013). Modelling of Green Roofs' Hydrologic Performance using EPA's SWMM. *Water Science & Technology*, 68 (1): 36-42.
- Butler, D., & Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Abingdon (UK): Spon Press.
- Camilloni, I., Bohórquez, J. M., Páez, D., Uribe, M. J., & Saldarriaga, J. (Agosto de 2004). Determinación de eventos de precipitación en ciudades Colombianas con escenarios de Cambio Climático. *XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago de Chile*.
- Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA. (2014). *Drenaje Urbano y Cambio Climático: Hacia los Sistemas de Alcantarillado del Futuro - Informe Final Fase I*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental - CIIA. (2015). Informe Producto 1: Estudio de los antecedentes e información de las tecnologías y/o tipologías de SUDS existentes. En *Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D. C.* Bogotá: Universidad de los Andes.
- CIRA. (2007). *The SUDS manual*. Dundee, Scotland: CIRA Report No. C697.
- Clean Water Services. (2009). *Low Impact Development Approaches - Handbook*. Washington.

- Credit Valley Conservation - CVC & Toronto and Region Conservation Authority - TRCA. (2010). Appendix A - Low Impact Development Stormwater BMP Fact Sheets. En *Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide (LID Guide)*. Toronto.
- Dietz, M. E. (2007). Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water Air Soil Pollut*, 186: 351-363.
- EPA Victoria. (2005). *Water Sensitive Urban Design: Engineering Procedures - Stormwater*. Melbourne, Victoria, Australia: CSIRO Publishing.
- Hawkins, R. H., Ward, D. E., Woodward, D. E., & Van Mullem, J. A. (eds) (2009). *Curve Number Hydrology: State of the Practice*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Iglesias, P., & Martínez, F. (Junio de 2013). Análisis de Redes de Alcantarillado mediante el programa SWMM 5. En *Curso de Verano*. Bogotá: Universidad Politécnica de Valencia.
- Karamouz, M., Moridi, A., & Nazif, S. (2011). *Urban Water Engineering and Management*. Boca Raton - Estados Unidos: CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Louisiana Department of Environmental Quality - LDEQ. (2010). *Storm Water BMP Guidance Tool: A Stormwater Best Management Practices Guide for Orleans and Jefferson Parishes*. New Orleans, Louisiana, Estados Unidos.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. (1997). *Guía de Diseño - Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos*. Santiago, Chile.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS) - United States Department of Agriculture. (2004). Part 630 - Hidrology, Cap. 10 - Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. En NRCS, *National Engineering Handbook* (págs. "10-5"). Estados Unidos.
- Premier Tech - Aqua. (2015). *Conder Storage Tanks Brochure*. Durham, UK.
- Riverside County Flood Control and Water Conservation District. (2011). *Design Handbook for Low Impact Development Best Management Practices*. Riverside, California, Estados Unidos.
- Roehr, D., & Fassman-Beck, E. (2015). *Living Roofs in Integrated Urban Water Systems*. New York, Estados Unidos: Routledge - Taylor & Francis Group.
- Stovin, V., Poe, S., & Kasmin, H. (2013). A Modelling Study of Long Term Green Roof Retention Performance. *Journal of Environmental Management*, 131: 206-215.

- Texas A&M University. (2015). *Interdisciplinary Green Roof Research Group*. Obtenido de <http://faculty-legacy.arch.tamu.edu/bdvorak/index.htm>
- The City of Edmonton. (2011). *the Low Impact Development - Best Management Practices Design Guide*. Edmonton, Alberta, Canada.
- U. S. Environmental Protection Agency - EPA. (2010). *Storm Water Management Model - User's Manual, Versión 5.0*. Cincinnati, Ohio, Estados Unidos.
- UNESCO y Taylor & Francis Group. (2010). *Integrated Urban Water Management: Humid Tropics*. Paris (Francia): The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- UN-HABITAT. (Diciembre de 2015). *Temas mundiales - Asentamientos humanos*. Obtenido de <http://www.un.org/es/globalissues/habitat/>
- Urban Drainage and Flood Control District. (2010). *Urban Storm Drainage - Criteria Manual: Best Management Practices* (Vol. 3). Denver: Water Resources Publications, LLC.
- Virginia Department of Transportation. (2013). *BMP Design Manual of Practice*. Richmond, Estados Unidos.
- Wavin. (2015). *Water management - Product and Installation Manual: AquaCell Systems*. UK: Wavin.
- WHO & UNICEF. (2000). *The Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000*. Geneva: World Health Organization.
- Wild, T., Jefferies, C., & D'Arcy, B. (2007). SUDS in Scotland - the Scottish SUDS database. *Scotland & Northern Ireland Forum for Environmental Research - SNIFFER*.
- Zhen, J., Shoemaker, L., Riverson, J., Alvi, K., & Cheng, M. S. (2006). BMP analysis for watershed-based stormwater management. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 41, 1391-1403.

## 8 ANEXOS

### 8.1 Número de Curva en áreas urbanas – NRCS (2004)

**Table 9-5** Runoff curve numbers for urban areas <sup>1/</sup>

Cover description cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area <sup>2/</sup>	-- CN for hydrologic soil group --			
		A	B	C	D
Fully developed urban areas (vegetation established)					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) <sup>3/</sup>					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way)		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only) <sup>4/</sup>		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses)	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82
Developing urban areas					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation)		77	86	91	94

<sup>1/</sup> Average runoff condition, and  $I_a = 0.25$ .

<sup>2/</sup> The average percent impervious area shown was used to develop the composite CNs. Other assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition.

<sup>3/</sup> CNs shown are equivalent to those of pasture. Composite CNs may be computed for other combinations of open space type.

<sup>4/</sup> Composite CNs for natural desert landscaping should be computed using figures 9-3 or 9-4 based on the impervious area percentage (CN=98) and the pervious area CN. The pervious area CNs are assumed equivalent to desert shrub in poor hydrologic condition.

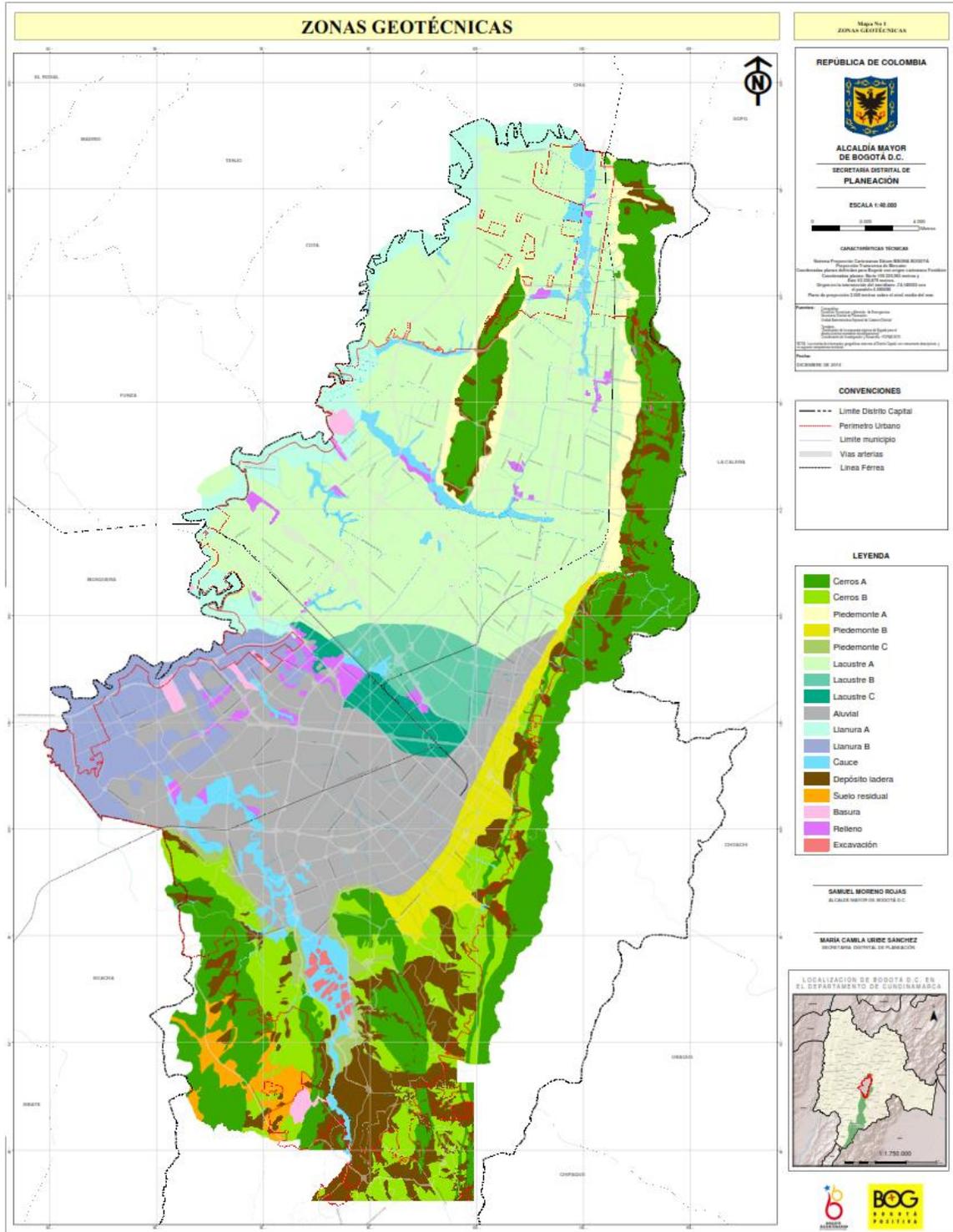
## 8.2 Valores recomendados de n de Manning de acuerdo al tipo de superficie – Ministerio de vivienda y urbanismo de Chile (1997)

Valores del coeficiente de rugosidad n para ser empleados en la fórmula de Manning.

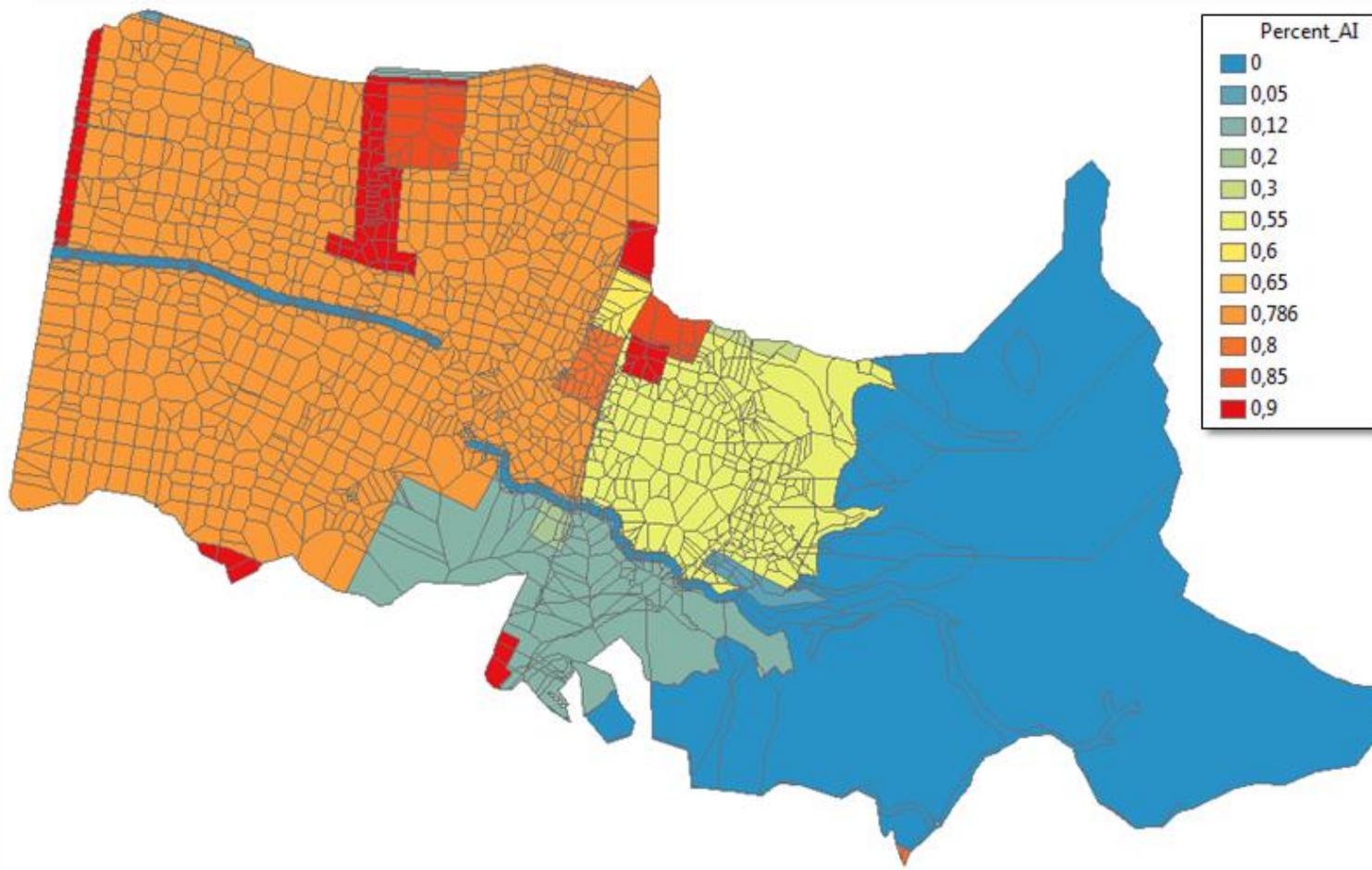
Tipo de canal y superficie	mínimo	normal	máximo
<b>A.- Canales construidos</b>			
Revestimiento metálico, de acero, sin pintar	0,011	0,012	0,014
Revestimiento metálico, pintado	0,012	0,013	0,017
Metal corrugado, alcantarillas corrugadas	0,021	0,024	0,030
Cemento y mortero afinado	0,011	0,013	0,015
Asfalto suave, bien terminado	0,012	0,014	0,015
Concreto con moldaje	0,013	0,015	0,017
Ladrillos, sin cantería	0,012	0,015	0,018
Mamostería de piedra emboquillada	0,017	0,025	0,030
Piedras sueltas, enrocados menores	0,020	0,030	0,035
<b>B.- Canales excavados o dragados</b>			
En tierra, rectos y uniformes recién construidos	0,016	0,018	0,020
Profundos, con vegetación y plantas acuáticas	0,030	0,035	0,040
En roca irregulares	0,035	0,050	0,060
<b>C.- Cauces naturales</b>			
De poca pendiente, limpios y rectos	0,025	0,030	0,035
Poca pendiente, rectos pero piedras, plantas	0,075	0,100	0,150
De montaña, sin vegetación con ripios	0,030	0,040	0,050
De montaña con peñascos y ripios, sin plantas	0,040	0,050	0,070
<b>D.- Zonas inundadas</b>			
Pastizales, planicies, pastos corto	0,030	0,035	0,050
Zonas cultivadas, cultivos anuales	0,030	0,040	0,050
Matorrales y pocos árboles	0,045	0,070	0,110
Arboles densos, bosques, suelo limpio	0,040	0,070	0,100
Arboles y matorrales, ramas	0,100	0,120	0,160

Se recomienda emplear el valor mínimo para estimar velocidades y pendientes frente a problemas de erosión. El valor máximo para estimar alturas de agua y para dimensionar la sección y revancha.

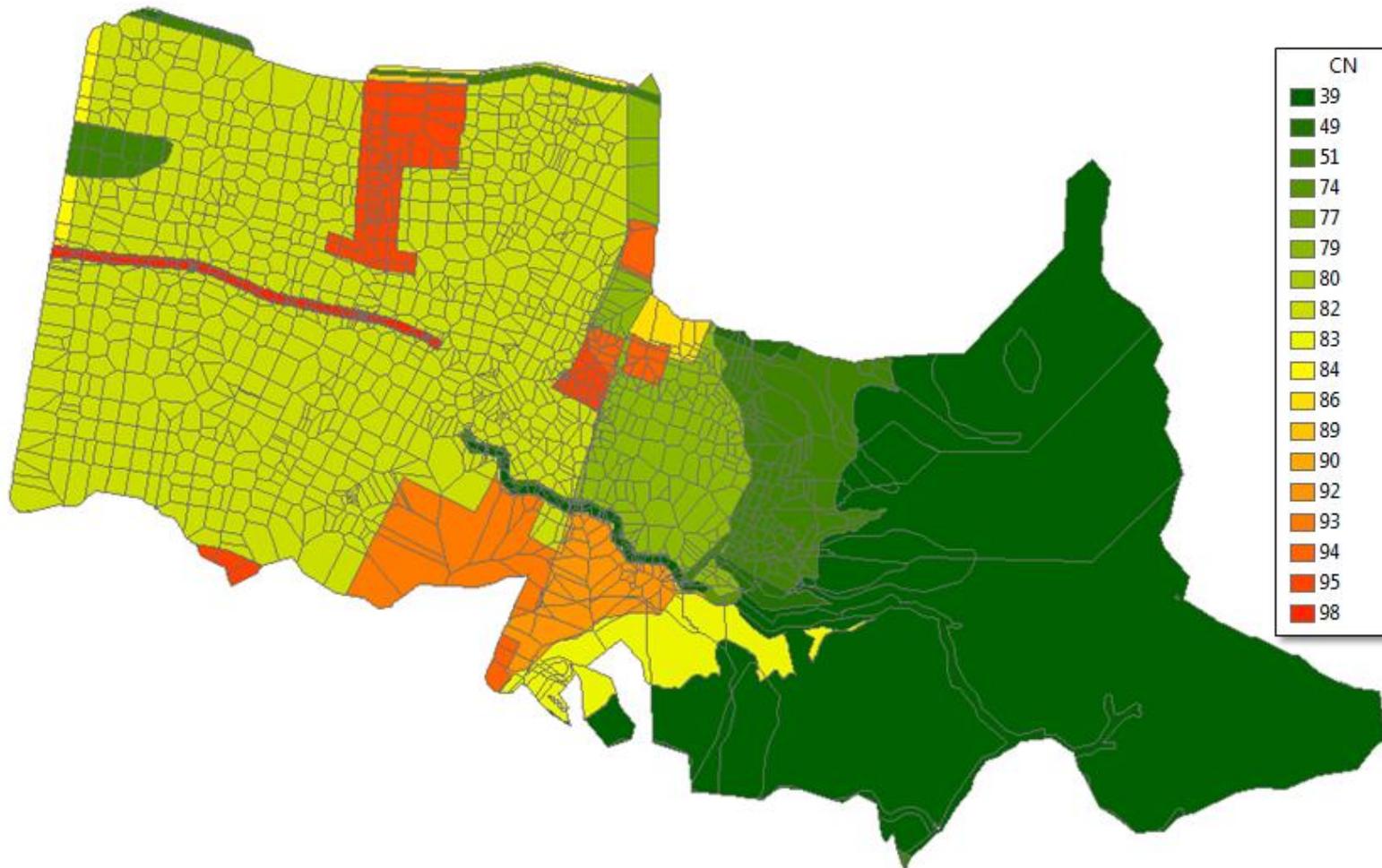
### 8.3 Mapa Zonas Geotécnicas de Bogotá (Decreto 523 de 2010)



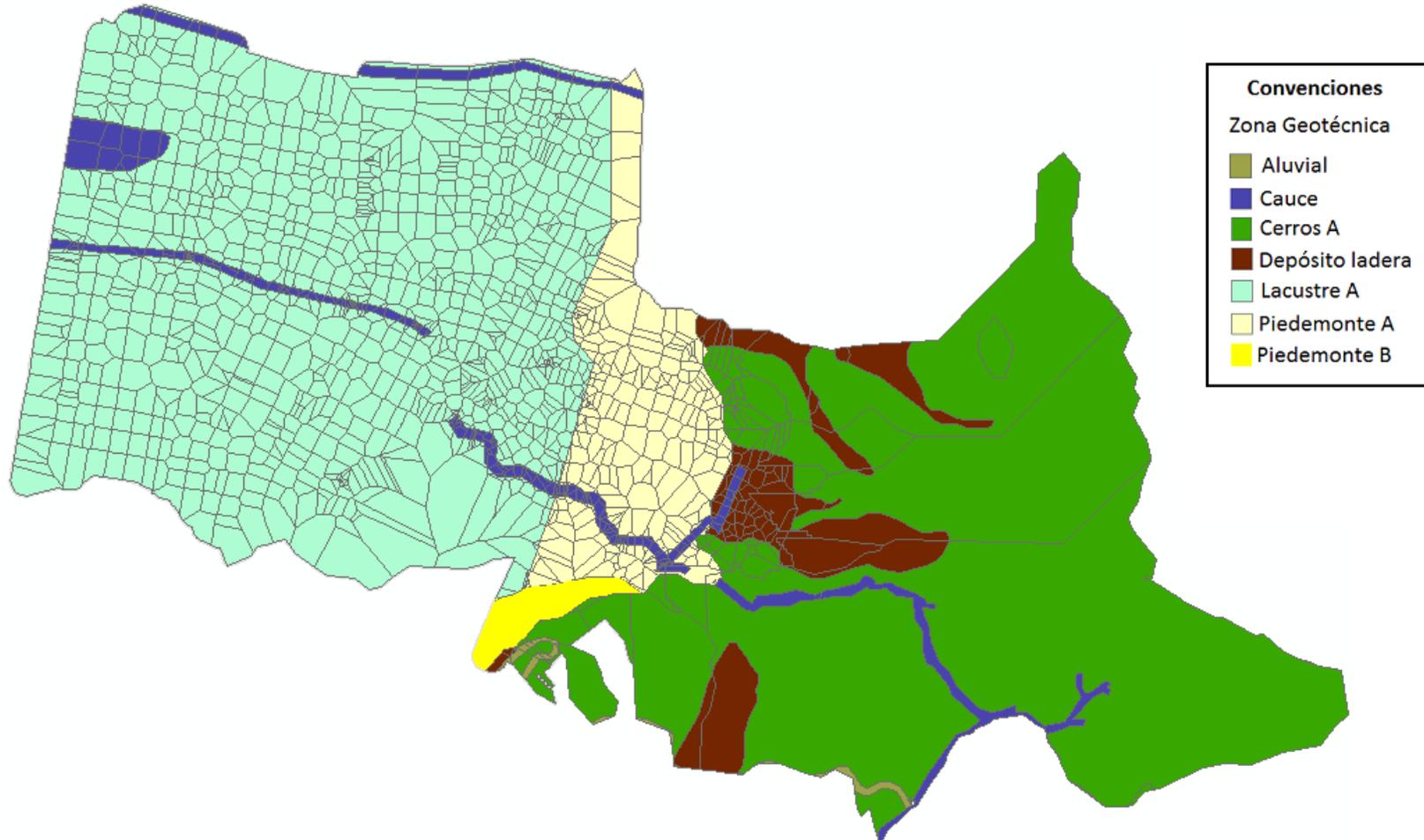
### 8.4 Asignación del porcentaje de área impermeable por subcuenca (capa vectorial)



### 8.5 Asignación del CN por subcuena (capa vectorial)



## 8.6 Zonas Geotécnicas por subcuenca en el área de estudio (capa vectorial)



## 8.7 Hidrogramas de salida por variable evaluada en el análisis de sensibilidad

