

Sistemas de control de escorrentía: Techos verdes vs. Tanques de almacenamiento

Stormwater runoff control systems: Green roofs vs. Storage tanks

Laura Carolina Vega¹, Juan Saldarriaga²

¹Ingeniera Civil e Ingeniera Ambiental, Asistente graduada de docencia - Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, lc.vega173@uniandes.edu.co.

²MSc en Ingeniería Hidráulica, Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, jsaldarr@uniandes.edu.co.

Página
64

ESING

FECHA DE RECEPCIÓN DEL ARTÍCULO: 09/08/2017 FECHA DE ACEPTACIÓN DE ARTÍCULO: 01/11/2017

RESUMEN

El sistema convencional de drenaje pluvial y sanitario predominante en la mayoría de ciudades del mundo afronta hoy en día grandes desafíos asociados con la rápida impermeabilización de superficies, sobredensificación poblacional y expansión urbana, así como el incremento en la precipitación debido al Cambio Climático. Respecto a esto, a pesar de que existe una gran variedad de sistemas alternativos de control y/o manejo de escorrentía pluvial alrededor del mundo, como los conocidos Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS), para ciudades altamente densificadas dichas posibilidades se reducen sustancialmente por la limitada disponibilidad de espacio, restringiendo el adecuado funcionamiento y efectividad de tales sistemas. En el presente estudio, se desarrolló el análisis de dos de los sistemas de control de escorrentía pluvial más empleados en el caso de ciudades altamente densificadas: Techos Verdes y Tanques de Almacenamiento por medio de un modelo de lluvia-escorrentía con el programa EPA SWMM. Este se desarrolló con la red pluvial del sector Chicó Norte de la Ciudad de Bogotá (Colombia), simulando la implementación de ambos tipos de estructuras, con el fin de identificar y comparar el nivel de efectividad de cada sistema en el control de escorrentía pluvial ante un escenario de cambio climático.

PALABRAS CLAVES

Sistemas de Control de Escorrentía, Sistemas de

Drenaje Urbano Sostenibles, modelo de lluvia-escorrentía, techos verdes, tanques de tormenta.

ABSTRACT

The conventional rainwater and wastewater urban drainage systems commonly used in most of the cities around the world, recently face a great challenge related with the fast waterproofing of surfaces, urban overexpansion, high densification, as with the precipitation changes arising from the climate change. In spite of the large variety of stormwater runoff control and management alternatives proposed around the world, as the known Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), for the highly densified urban areas this alternative solutions are limited due to the lack of available area to guarantee an adequate and effective operation of such a systems. Thus, considering the Green Roofs and Storm Tanks as the most widely used stormwater runoff control systems in highly densified urban areas, a rainfall-runoff model was developed in EPA SWMM with the stormwater drainage system of *Chicó Norte* sector in Bogotá City (Colombia) in order to compare and analyze the performance and effectiveness of these control systems before a scenario of climate change.

KEYWORDS

Runoff Control Systems, Sustainable Urban Drainage Systems, rainfall-runoff model, green roofs, storm tanks.

Para citar este artículo / To cite this article

L. C. Vega; J. Saldarriaga. Sistemas de control de escorrentía: Techos verdes vs. Tanques de almacenamiento. Revista Ingenieros Militares. No. 12, pp. 64, 2017.

INTRODUCCIÓN

El incremento de la población urbana fue ampliamente promovido luego del proceso de industrialización; no obstante, la tasa máxima de crecimiento poblacional en zonas urbanas se ha evidenciado sobre los últimos 50 años, donde hoy en día cerca del 50% de la población mundial vive en las ciudades [1]. Esto, sin mencionar que en casos particulares como Colombia dicha cifra tiende a incrementarse cerca de un 75%. El desarrollo urbano ha derivado en una continua y creciente interacción del hombre con los recursos que le rodean, afectando las diversas dinámicas naturales que le proporcionan estabilidad al ambiente. En lo que respecta al agua, diversos componentes del ciclo hidrológico han sido afectados por dos tipos de interacciones principales: la extracción de agua para abastecimiento y desarrollo de múltiples actividades económicas, y la construcción de superficies artificiales impermeables que desvían el curso del agua del sistema natural de drenaje [2]. En este sentido, ha derivado en el incremento sustancial de escorrentía por la impermeabilización de superficies, así como la disminución de infiltración impidiendo la recarga de acuíferos. En términos de calidad, la generación de vertimientos domésticos e industriales con altas cargas contaminantes, así como el lavado de superficies por efectos de primer aseo han deteriorado en gran medida la calidad de diversos cuerpos de agua.

Como respuesta a las problemáticas asociadas con el drenaje urbano, han surgido diversas alternativas de solución; entre estas se destaca el sistema de drenaje convencional adoptado en la mayoría de asentamientos urbanos como un resultado de ingeniería de alta intervención (*hard engineering*); no obstante, con el ánimo de mitigar algunos impactos negativos asociados a esta, también han surgido estrategias de control alternativas al sistema convencional (*soft engineering*) que buscan incorporar estructuras de alto valor paisajístico cuya finalidad es generar control de calidad y cantidad de escorrentía en puntos estratégicos de la superficie urbana, un ejemplo puntual de este son los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Dado que la implementación de SUDS en ciudades altamente densificadas se ve limitado por diversas restricciones, se ha propuesto la simulación de uno de los SUDS más factibles de emplear en

este tipo de zonas urbanas: los Techos Verdes en contraste con los Tanques de Tormenta como solución de alta intervención.

MARCO TEÓRICO

Drenaje Urbano

Los primeros desarrollos de infraestructura de drenaje, en ciudades como Londres, consistieron en la construcción de sistemas artificiales de drenaje que buscaban reemplazar la función del sistema natural de drenaje pluvial 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 residuales con el sistema de drenaje de la ciudad [2]. Hoy en día, dicho sistema, en la mayoría de ciudades, se concibe de tipo subterráneo con múltiples interconexiones entre tuberías y pozos, donde el agua fluye por gravedad y a flujo libre, conformando generalmente sistemas separados, combinados o mixtos (sistema convencional de drenaje urbano).

A pesar de que estos sistemas proporcionan seguridad ante inundaciones urbanas y principalmente permiten el adecuado mantenimiento de la salud pública, la rápida generación de altos volúmenes drenados debida a la impermeabilización de superficies implica mayores caudales de descarga y caudales pico a la salida del sistema sobre los cuerpos de agua receptores, lo que ha incrementado el riesgo de inundación en los cuerpos de agua, así como el deterioro de los canales por erosión. Adicionalmente, la calidad del recurso se ha visto drásticamente disminuido debido a la poca infraestructura de tratamiento, lo que hace de este tipo de sistemas lo que se conoce como una “solución a final de tubo”, donde la mitigación del impacto ambiental es muy baja.

De acuerdo con el documento “*Integrated Urban Water Management in Humid Tropics*” desarrollado por la UNESCO la evolución del drenaje urbano en países desarrollados ha pasado por las etapas: pre-higienista, higienista,

correctiva y sostenible [3]. La etapa “higienista” corresponde a la introducción del sistema convencional de drenaje y la etapa “sostenible” implica la colaboración y coordinación 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 [4].

Dado que la implementación del sistema convencional de drenaje implica a grosso 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, esta nueva etapa se basa en el concepto de Planeación de Bajo Impacto (Low Impact Development – LID), donde se ha generado un enfoque centrado en el manejo del volumen de escorrentía, a partir del cual se considera que una reducción del volumen en la fuente, a escala local o regional, implica a su vez la reducción de contaminantes, velocidades, caudales máximos, erosión y sedimentación de forma previa a su ingreso al sistema de drenaje convencional. Esto por medio de mecanismos de recolección, almacenamiento, tratamiento, redistribución, y/o reciclaje de aguas lluvias [5].

En particular, puede decirse que un SUDS es aquella medida de aproximación holística que provee un balance entre el control de la calidad del agua, cantidad de agua y servicios ambientales [6], [7]. Dentro de las medidas estructurales más empleadas de SUDS se encuentran: tanques domiciliarios de almacenamiento, cunetas verdes, drenajes filtrantes, zonas de bioretención, humedales artificiales, cuencas de infiltración, pavimentos porosos, franjas infiltrantes, sumideros tipo alcorque, pondajes húmedos, cuenca seca de drenaje extendida y techos verdes. No obstante, para ciudades altamente densificadas dicho grupo puede verse drásticamente disminuido incluyendo solo algunas tipologías como zanjas de infiltración, alcorques inundables, cunetas verdes y techos verdes.

Techos verdes y tanques de tormenta

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 [8]. Dentro de estos se pueden encontrar diversas configuraciones como techos intensivos o extensivos donde los techos intensivos manejan mayores espesores de sustrato, mayor diversidad y tamaños en especies vegetales y demandan de mayores cuidados y frecuencia de mantenimiento. La estructura del techo verde consiste en una configuración por capas compuesta típicamente por el soporte estructural, una membrana impermeabilizante, una barrera aislante contra la intrusión de raíces, una membrana protectora o de filtración, el medio de crecimiento o sustrato y finalmente la vegetación. Adicionalmente, se incluyen elementos complementarios para permitir el adecuado drenaje de la estructura como la tubería de drenaje y lastre de grava alrededor. Dentro de su función en términos hidrológicos, el techo verde tiene la capacidad de retener cierto volumen de precipitación en su sustrato hasta alcanzar su capacidad de campo, adicionalmente provee reducción del volumen drenado por evapotranspiración; no obstante, su acción se limita al volumen precipitado y no al volumen evacuado por escorrentía superficial y su capacidad depende ampliamente del área cubierta por el mismo.

Alternativamente a las medidas de control de bajo impacto, una medida de alta intervención que resulta bastante llamativa son los tanques de tormenta los cuales prometen elevadas capacidades de almacenamiento y amortiguación tras la generación de tormentas, y a su vez pueden ser acoplados y operados de forma conjunta y en tiempo real con el sistema de drenaje existente. Puntualmente, los tanques de tormenta son depósitos de retención empleados para contener temporalmente el agua de escorrentía pluvial evitando con ello problemas de inundaciones urbanas o fluviales, y pueden ser clasificados de acuerdo con su funcionalidad, tipología constructiva o tipo de conexión con el sistema de drenaje [9]. 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. Los tanques de tormenta a los que se hará alusión corresponden a los depósitos subterráneos de gran capacidad (volumen de almacenamiento entre 1 y 250 m³ por unidad), preferiblemente sintéticos.

Modelo hidrológico del Soil Conservation Service – SCS

El modelo hidrológico del Natural Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos introduce una variable cuantitativa (el Número de Curva) que indica la proporción de escorrentía generada en una zona particular de acuerdo con el 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. Las expresiones empleadas para su cálculo se muestran en las ecuaciones (1) y (2).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{S + P - I_a} \quad (1)$$

$$S = \left[\frac{1000}{CN} - 10 \right] * 25. \quad (2)$$

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 considerada como la profundidad de lluvia a partir de la cual se genera escorrentía [9].

METODOLOGÍA

Se desarrolló un modelo de lluvia-escorrentía en la versión 5.1 del software SWMM de la USEPA (United States Environmental Protection

Agency). Dado que el objetivo principal del modelo es verificar el comportamiento y efectividad de dos sistemas de control de escorrentía pluvial únicamente se trabajó con la red pluvial del sector *Chicó Norte* de Bogotá - Colombia, la cual contó con 1275 conductos, 1300 cámaras de inspección y 1 punto de descarga. Para su desarrollo fue necesario el análisis espacial de la información característica del área de estudio y red de drenaje, lo cual fue posible mediante el software ArcGIS 10.1. La recopilación y análisis de información se desarrolló en tres etapas. 1. Caracterización del modelo hidráulico, 2. Caracterización de las subcuencas drenaje, y 3. Definición de parámetros del modelo de infiltración y evento de lluvia. La red de alcantarillado pluvial de *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 Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA– de la Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia, donde se desarrolló un estudio de alternativas de control de escorrentía incluyendo un análisis hidrológico de precipitaciones con efecto del cambio climático y el previo desarrollo del modelo hidrológico de las redes incluidas (Chicó Norte, Chicó Sur y Mini-Chicó Sur) [10].*

La red Chicó Norte, ubicada al Nor-Oriente de la ciudad de Bogotá, se definió en torno al área delimitada por las 8 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 (Ver figura 1). Las UGAs de Bogotá 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 lo concerniente a la caracterización del área de estudio, se ahondó en 5 grupos de información: configuración urbana, uso del suelo urbano, tipo de suelo por zonificación geológica, topografía del terreno y estratificación socio-económica, los cuales fueron indispensables para la parametrización del modelo.

La configuración urbana fue analizada de acuerdo con la información catastral suministrada por el Grupo de Investigación

en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) de la Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia, donde fue posible distinguir la parcelación del área urbana por lotes, manzanas y área construida. Esto fue fundamental para identificar el nivel de impermeabilidad y el potencial de área disponible para la instalación de techos verdes. El tipo de suelo fue caracterizado gracias al Mapa de Zonas Geotécnicas de Bogotá adoptado por el Decreto 523 de 2010, donde fue posible distinguir 7 tipos de suelo en el sector analizado. Dicha información resultó de gran utilidad para los parámetros asociados con el modelo hidrológico del SCS. La información de uso de suelo, también suministrada por el SUR, permitió la clasificación de usos en 4 categorías, fundamentales en la definición del número de curva del modelo hidrológico. De estas categorías, predomina en una proporción mayor al 70% el uso de suelo residencial. La topografía del área se definió por medio de curvas de nivel del terreno, encontrando una altura media de 2555 m.s.n.m. con mayores pendientes al costado derecho, donde la altura máxima dentro del perímetro urbano fue de 2728 m.s.n.m.

En lo concerniente a los parámetros y variables hidráulicas necesarias para el modelo, gracias al modelo hidráulico en SWMM previamente desarrollado en el CIACUA, se contó con la configuración topológica de la red, así como las características propias de pozos y tuberías del sistema (diámetros, profundidad de pozos, rugosidad, longitud, sección transversal y cotas). No obstante, fue necesaria su revisión y corrección respecto a la adecuada conectividad de elementos y cotas. Este modelo se desarrolló y corrigió con base en información catastral suministrada por la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB) y el visor geográfico del Acueducto, mediante la cual fue posible la depuración y esqueletización de la red real para su aplicación a la modelación. De la red cabe destacar la presencia del Canal Molinos como parte de la red troncal, ubicado en sentido oriente-occidente sobre la mitad de la red y área de estudio (ver imagen superior derecha - figura 1).

Dado que SWMM modela la hidrología a partir de subcuencas de drenaje, éstas fueron definidas en torno a los pozos de drenaje de la red con polígonos de Thiessen a través de ArcGIS. Adicionalmente, dado que el costado oriental

de la red cuenta con una zona rural extensa de alta pendiente, se consideró apropiada la inclusión de subcuencas rurales aferentes a los pozos colindantes con esta zona. La estimación de estas áreas de drenaje fue posible gracias a la herramienta "Watersheds" de ArcGIS, la cual delimita cuencas de drenaje a partir de la identificación de direcciones de flujo y patrones de acumulación de agua en función de la topografía del terreno. La creación de dichas cuencas dio lugar a una nueva delimitación del área de estudio (ver tercera imagen de la figura 1.) A partir de estas áreas de drenaje, es posible conocer nuevos atributos. El área y ancho se estimaron con la herramienta "Zonal Geometry as Table" la cual da el área por subcuenca y permite conocer el ancho máximo descrito por el eje mayor de la elipse inscrita en el área definida. La pendiente media del terreno se encontró por medio de la herramienta "Zonal Statistics as Table", donde fue posible interpolar la información de curvas de nivel y obtener a partir de ellas el porcentaje de pendiente media asociado a cada subcuenca.

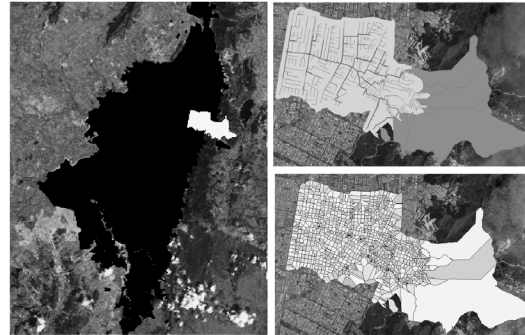


Figura 1. Área metropolitana de Bogotá y sector Chicó Norte (izquierda), red pluvial - Chicó Norte (sup. der.) y Subcuencas de drenaje - Chicó Norte (inf. der.).

Respecto a las variables que no dependen de la geometría de las cuencas, fue necesario incluir la información previamente identificada sobre la caracterización del área de estudio (usos de suelo, tipo de suelo, configuración urbana, uso del suelo urbano, tipo de suelo por zonificación geológica, y estratificación socioeconómica). El porcentaje de área impermeable se calculó por medio de los valores recomendados por el Natural Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, donde se dan unos porcentajes de área impermeable por uso de suelo. Dado que existen diversos usos de suelo por subcuenca,

el valor asignado correspondió al promedio ponderado por el área. Estos valores fueron luego corroborados y corregidos con fotografías satelitales actualizadas e información recopilada de zonas verdes y espacios recreativos. El coeficiente de rugosidad o n de Manning de la zona permeable e impermeable se calculó con base en los valores especificados en la Guía de Diseño *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile* donde se dan valores recomendados por tipo de superficie [11]. Dichos valores se asignaron de forma aleatoria con una función de distribución de probabilidad normal considerando los siguientes rangos: para la zona urbana entre 0.011 y 0.035 y para la zona rural entre 0.03 y 0.16. Para estimar el almacenamiento en depresiones se acudió a valores típicos recomendados por académicos con gran experiencia en el uso de EPASWMM [12]. De manera similar, se generaron valores aleatorios entre 1.25 y 2.5 mm en zonas impermeables y entre 2.5 y 5 mm para zonas permeables. Finalmente, dado que en el área de estudio predominan estratos socio-económicos altos se consideraron condiciones apropiadas de drenaje para la mayoría de superficies impermeables, por lo que el porcentaje de área impermeable sin almacenamiento en depresiones varió aleatoriamente entre el 75 y

100%.

Aunque SWMM da la posibilidad de escoger entre varios modelos de infiltración, se seleccionó el modelo hidrológico del Soil Conservation Service (Número de Curva) por su simplicidad y razonable precisión en la estimación de escorrentía para un evento de lluvia dado [13]. El parámetro tiempo de secado se encuentra dentro de un rango de 2 a 14 días [12]; no obstante, se definió para cada subcuenca un valor recomendado de 7 días. Respecto al número de curva, dado que este depende del uso de suelo urbano y zona geológica, fue necesario asignar a los tipos de suelo incluidos en el área de estudio un número de curva según el uso de suelo dado en cada una; posteriormente, se ponderó el valor del número de curva por unidad de área para cada tipo de suelo incluido en cada subcuenca. Respecto a la precipitación, se tuvo en cuenta el estudio [14], desarrollado por el CIACUA, en el cual se incluye el análisis de 5 escenarios de cambio climático para producir diversas variaciones del hietograma de diseño de los sectores Chicó Norte y Chicó Sur de Bogotá [14]. Para incluir cierto grado de variación espacial de la lluvia, se incluyeron 2 hietogramas los cuales se asignaron a cada subcuenca de forma aleatoria (ver figura 2.).

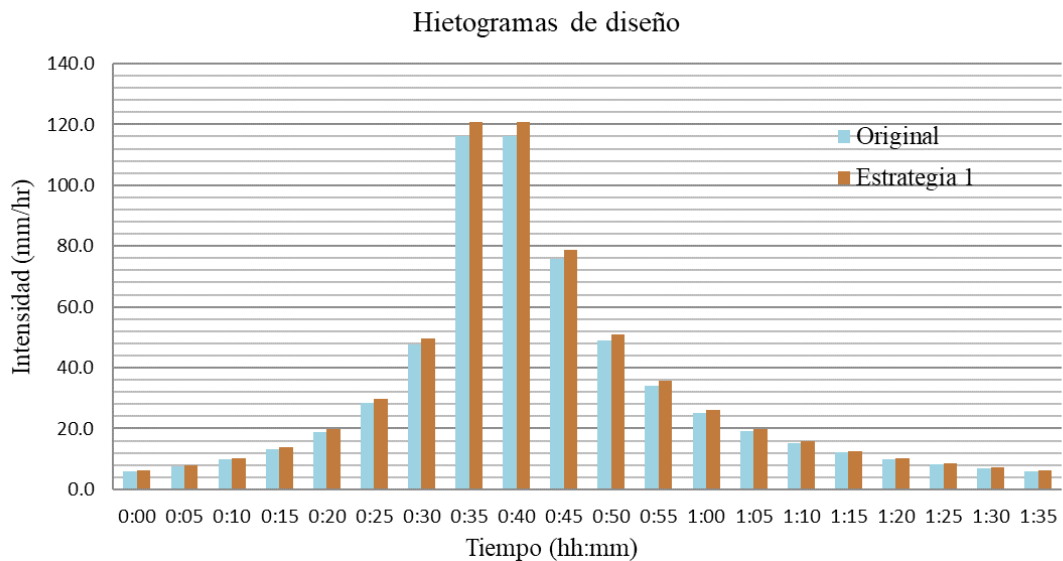


Figura 2. Hietogramas de diseño - Chicó Norte.

Con la finalidad de conocer la respuesta del modelo ante las diversas variables características de las cuencas y del modelo de infiltración seleccionado, se desarrolló un análisis de sensibilidad donde cada una de las variables fue analizada de forma independiente. La metodología empleada consistió en definir grupos de datos clasificados por percentiles con base en la información consignada 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 creación de grupos de datos, se generaron números aleatorios de los mismos con el rango de datos comprendido en cada grupo, teniendo en cuenta una distribución normal (ver Ecuación 3 y Ecuación 4.). 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

$$v_{min_i} = \bar{x}_i - 4\sigma_i \quad (3)$$

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

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 σ_i = desviación estándar del conjunto de datos.

En la simulación del escenario de techos verdes se hizo una revisión bibliográfica previa con el fin de identificar las variables y parámetros típicos de este sistema según la caracterización requerida por SWMM. Con lo anterior, se definió en el modelo un techo verde típico para todas las subcuencas variando únicamente su cantidad. Los parámetros seleccionados fueron: fracción del volumen de la vegetación (0.2), rugosidad o n de manning de la superficie (0.035), pendiente superficial (1%), espesor del

sustrato o suelo (150 mm), porosidad del sustrato (0.73), capacidad de campo del sustrato (0.29), punto de marchitamiento (0.12), conductividad del sustrato (2.95 mm/hr), pendiente de conductividad del sustrato (10), cabeza de succión del sustrato (3.5 mm), espesor del material drenante (70 mm), relación de vacíos del material drenante (0.55), rugosidad o n de manning del material de drenaje (0.3), área (250 m²) y ancho, cuyo valor se calculó como la raíz cuadrada del área (15.8 m) (Distrito de control de inundaciones y drenaje urbano de Denver, 2010). Dado que se quiere verificar la efectividad y capacidad de control de estos sistemas, se consideró que el 100% del área construida es área factible de implementación de techos verdes, esto también sustentado por el hecho de tratarse de un sector de estrato alto.

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 superficie de almacenamiento en función de la altura considerando área constante y dejando fija la profundidad del pozo. La ubicación de tanques se realizó analizando el volumen de inundación generado en los pozos en todo el tiempo de simulación. Se identificó el estado más crítico en el minuto 45 donde se presentaron 21 pozos con inundaciones superiores a los 800 l/s. Con estos pozos, inicialmente se definió la ubicación de tanques. 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 m², tres de 850 m², dos de 800 m², cuatro de 500 m² y seis de 350 m². El criterio final de selección de tanques tuvo en cuenta la generación de un cambio gradual de inundación de pozos en el lapso de tiempo más crítico: de 0:45 a 1:25.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En lo que respecta al análisis de sensibilidad, se resumió la influencia de cada una de las variables analizadas en el hidrograma de salida comparando el cambio del caudal pico del sistema con respecto al caudal pico del modelo original. Se encontró una alta incidencia de las variables geométricas de las cuencas (área, ancho y pendiente), de la rugosidad en zonas permeables

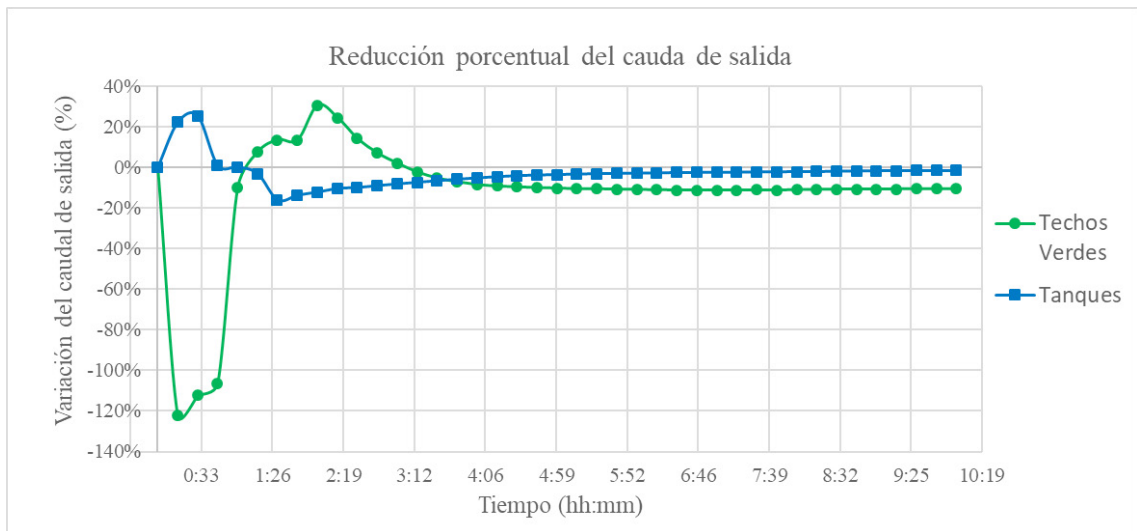


Figura 3. Variación del hidrograma de salida de los escenarios de control sobre el sistema original.

y del número de curva; donde el área y el número de curva fueron las variables más sensibles. Por otra parte, las variables de la rugosidad y almacenamiento en zonas impermeables, así como el porcentaje de área impermeable sin almacenamiento en depresiones presentaron una influencia muy baja. La variable tiempo de secado resultó insensible para el modelo. Llama la atención la baja influencia de las variables representativas de la zona impermeable y la gran importancia de las variables topológicas y topográficas de las cuencas, así como del grado de permeabilidad y almacenamiento de las mismas, lo que deja de manifiesto una posible alta interacción e interdependencia entre ellas. Debe decirse que este análisis se limitó al rango de valores contenido en el conjunto de variables inicialmente definidas en el modelo, lo que puede ignorar importantes variaciones del modelo ante otros órdenes de magnitud. También, se excluye del análisis la influencia de diversas interacciones entre variables en el comportamiento del modelo.

Reconociendo que los principales impactos ambientales a cuerpos de agua receptores se generan por los altos volúmenes de agua vertidos, así como por los caudales pico generados, la evaluación de los escenarios se basó en el análisis de los hidrogramas de salida del sistema y la reducción del volumen de inundación. Respecto a los hidrogramas

de salida, al comparar el cambio del caudal drenado en el sumidero de descarga de la red a partir de su variación relativa en el tiempo respecto al hidrograma de salida original, es posible identificar el tiempo de reacción de los mecanismos de control (ver figura 3). En esta se puede evidenciar que los tanques ejercen control sobre los caudales drenados hasta en un 24% antes de la generación del caudal pico (minuto 0:45), mientras que los techos verdes reducen los caudales drenados posterior a la generación del caudal pico hasta en un 34%. Se demuestra también un comportamiento opuesto entre ambos sistemas durante toda la serie de tiempo, donde mientras uno de los sistemas reduce el caudal drenado, el otro lo incrementa. Respecto al caudal pico ninguno de los sistemas modelados generó una reducción mayor al 1%, lo que evidencia la limitada capacidad de estos para atenuar altos caudales durante eventos de lluvia de gran magnitud. En términos del volumen de inundación, de los 296484 m³ de agua inundada se identificó una reducción del 4.8% en el escenario de tanques de tormenta, mientras que en el escenario de techos verdes éste incrementó en un 3%. El incremento de este volumen debe estar asociado con la configuración superficial de los techos verdes, pues en caso de excederse la capacidad del sistema, este puede generar problemas de evacuación y por ende inundación de la zona urbana.

CONCLUSIONES

Del análisis de sensibilidad se puede concluir que el procedimiento de delimitación de cuencas y el cálculo del Número de Curva deben ser desarrollados con mayor detenimiento y precisión con el fin de tener una mayor certidumbre en la veracidad de los resultados simulados. Adicionalmente, es importante reconocer en futuros análisis la interacción de las distintas variables, así como el comportamiento del modelo ante otros rangos de variables posibles. Respecto a la simulación de escenarios, fue notorio un ejercicio de control opuesto entre mecanismos, donde los tanques de tormenta permitían generar reducción de caudales previamente a la generación del caudal pico, mientras que los techos verdes ejercían control luego de la generación del caudal pico. Ningún mecanismo probó ser apropiado para la reducción del caudal pico del evento de diseño, lo que puede ser producto de los parámetros característicos definidos, en el caso de los techos verdes, y la configuración de tanques seleccionada. Por lo anterior, para futuros trabajos se recomienda realizar una profundización en dichos aspectos.

Si se analiza la aplicación de este estudio a un caso real, sería indispensable conocer con mayor precisión la factibilidad de implementación de techos verdes en el área de estudio, así como las diversas configuraciones de los mismos. En este sentido, sería necesario un estudio riguroso de optimización que permita definir apropiadamente la ubicación y dimensiones pertinentes de los tanques. Adicionalmente, sería de mucha utilidad contemplar un rango más amplio de eventos de lluvia donde sea posible conocer el efecto de control sobre diversos volúmenes de agua precipitada. Finalmente, si este ejercicio quisiera replicarse en otros casos, debe tenerse en cuenta las diversas condiciones socio-económicas, urbanas y climáticas propias del contexto, las cuales serán determinantes en la caracterización del modelo.

REFERENCIAS

- [1] UN-HABITAT, “Temas mundiales - Asentamientos humanos,” diciembre 2015. [En línea]. Disponible en: www.un.org/es/globalissues/habitat/.
- [2] D. Butler y J. W. Davies, *Urban Drainage*, Abingdon: Spon Press, 2011.
- [3] UNESCO, “Integrated Urban Water Management: Humid Tropics,” Taylor & Francis Group, Paris, 2010.
- [4] M. Karamouz, A. Moridi y S. Nazif, *Urban Water Engineering and Management*, Boca Ratón, FL: Taylor & Francis Group, 2010.
- [5] L. Ahiablame, B. Engel y I. Chaubey, «Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research,» *Water, Air & Soil Pollution*, nº 223, pp. 4253-4273, 2012.
- [6] CIRA, “Low Impact Development Approaches - Handbook,” de CIRA Report N° C697, *The SUDS manual*, Dundee, Clean Water Services, 2009.
- [7] T. Wild, C. Jefferies y B. D’Arcy, “SUDS in Scotland - the Scottish SUDS database,” de *Scotland & Northern Ireland Forum for Environmental Research - SNIFFER*, UK, 2007.
- [8] Urban Drainage and Flood Control District, *Urban Storm Drainage - Criteria Manual: Best Management Practices*, vol. 3, Denver: Water Resources Publications, LLC, 2010.
- [9] Natural Resources Conservation Service -NRCS-, “Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall,” de *Part 630 Hydrology - National Engineering Handbook*, Washington D.C., U.S. Department of Agriculture (USDA), 2004, pp. 10-5 a 10-8.
- [10] Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados -CIACUA-, «Informe Fase I,» de *Drenaje Urbano y Cambio Climático: Hacia los Sistemas de Alcantarillado del Futuro*, Bogotá, Universidad de los Andes, 2014.
- [11] Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, “Guía de Diseño - Técnicas Alternativas para soluciones de Aguas

Lluvias en Sectores Urbanos,” Santiago, 1997.

- [12] P. Iglesias y F. J. Martínez, “Análisis de Redes de Alcantarillado mediante el programa SWMM 5,” de *Curso de Verano*, Universidad de los Andes, Bogotá, 2013.
- [13] American Society of Civil Engineers -ASCE-, Curve Number Hydrology: State of Practice, R. H. Hawkins, D. E. Ward y J. A. Van Mullem, Eds., Reston, VA, 2009.
- [14] I. Camilloni, J. Bohórquez, D. Páez, M. Uribe y J. Saldarriaga, “Determinación de eventos de precipitación en ciudades colombianas con escenarios de cambio climático,” de *XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile, 2014.