

Comparación de metodologías de localización óptima de tanques de tormenta considerando Cambio Climático. Casos de estudio: Bogotá y Medellín, Colombia

Comparison of storm tanks optimal location methodologies considering Climate Change. Case studies: Bogotá and Medellín, Colombia

Laura Enríquez^{a1}, Laura Pulgarín^{ib a2}, Jorge A. Garzón^{a3}, Danna Velásquez^{a4}, Juan Saldarriaga^{ib b*}

^a Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Carrera 1 Este N° 19A – 40, Bogotá, Colombia.

^b Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Carrera 1 Este N° 19A – 40, Bogotá, Colombia.

E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co

*Autor para correspondencia

Recibido: 16/03/2022

Aceptado: 14/05/2022

Publicado: 31/07/2022

Citar como: Enríquez, L., Pulgarín, L., Garzón, J.A., Velásquez, D., Saldarriaga, J. 2022. Comparison of storm tanks optimal location methodologies considering Climate Change. Case studies: Bogotá and Medellín, Colombia. *Ingeniería del agua*, 26(3), 139-155. <https://doi.org/10.4995/la.2022.17360>

RESUMEN

La impermeabilización del suelo debida al crecimiento urbano implica un cambio en las condiciones hidrológicas locales; adicionalmente, se espera que el Cambio Climático genere un incremento en la frecuencia de periodos intensos de lluvia en algunas regiones. Para evitar sobrecargas en los sistemas de drenaje urbano se ha propuesto el uso de tanques de tormenta para el almacenamiento temporal de agua. De esta forma, el presente trabajo busca evaluar y comparar el desempeño de dos metodologías de localización óptima de tanques de tormenta bajo escenarios de precipitación que consideran los efectos del Cambio Climático en dos ciudades de Colombia. Las metodologías usadas fueron OptSU y OptiTank, donde la primera incluye un control hidráulico y la segunda no. Así, se verificó que ambos métodos lograron reducciones mayores al 60% en las inundaciones. Asimismo, se encontró que OptSU presenta mejor desempeño en redes de alta pendiente, mientras que OptiTank tiene buenos resultados para cualquier pendiente.

Palabras clave | inundaciones urbanas, alcantarillados, tanques de tormenta, optimización de sistemas de drenaje urbano.

ABSTRACT

The reduction of soil permeability due to urban growth implies a change in local hydrological conditions; additionally, Climate Change is expected to generate an increase in the frequency of events of heavy rain in some regions. Storm tanks to temporarily store water have been proposed to avoid overloading of drainage systems. The present work aims to evaluate and compare the performance of two storm tanks optimal location methodologies under a rainfall scenario that considers Climate Change effects on two cities of Colombia. The methodologies used were OptSU and OptiTank, where the first includes a hydraulic control and the second does not. Thus, it was verified that both methods achieved flood reductions by over 60%. Furthermore, it was found that OptSU has a better performance in networks with steep slopes, whereas OptiTank has good results for any slope.

Key words | urban floods, sewers, storm tanks, urban drainage systems optimization.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas se han convertido en una de las principales preocupaciones relacionadas con la gestión del agua en las ciudades por el impacto que pueden tener en la salud pública y las pérdidas económicas que generan. En primer lugar, esta problemática se ha acrecentado por el aumento en la producción de escorrentía a causa del incremento de la población, que ha traído consigo el crecimiento de las ciudades y su densificación, lo que implica un incremento de las superficies impermeables (Du *et al.*, 2015). En segundo lugar, se espera que el Cambio Climático genere un aumento en la frecuencia de eventos de lluvia intensa y en la precipitación total (Myhre *et al.*, 2019). Esta hipótesis fue comprobada en el proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro” realizado por la Universidad de los Andes entre los años 2014 y 2016.

En este estudio se hizo una simulación del efecto que el Cambio Climático iba a tener sobre la intensidad y duración de los eventos extremos de lluvia que son los utilizados para los diseños de los sistemas de drenaje urbano. En el proyecto se utilizaron 4 modelos climatológicos globales y se usaron técnicas de downscaling para poder generar nuevos hietogramas de lluvia. En todos los casos se encontró que para los países tropicales en la cordillera de los Andes (Venezuela, Colombia, Ecuador y norte de Perú) lo que se espera como efecto del Cambio Climático es un aumento en la intensidad y duración de los eventos extremos de lluvias. (Solman *et al.*, 1999; Prudhomme *et al.*, 2002; Nie *et al.*, 2009; Berggren *et al.*, 2011; Khazaei *et al.*, 2012; Ruitter *et al.*, 2012; Willems *et al.*, 2012; Camilloni, 2014). Sumado a lo anterior, la falta de mantenimiento y monitoreo de los sistemas de drenaje, como es el caso de algunas zonas en Colombia, aumenta la probabilidad de que se presenten inundaciones, principalmente debido a obstrucciones o fallas estructurales no solucionadas (EPA Office of Wastewater Management, 2015).

De acuerdo con lo anterior, se ha propuesto el uso de estructuras y metodologías de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS), tales como pavimentos permeables, techos verdes o azules, zanjas de infiltración, etc., los cuales buscan reducir la escorrentía producida por un evento de lluvia. El uso de estas estructuras SUDS disminuye el riesgo de inundaciones y, en caso de que el sistema de drenaje requiera el bombeo de agua lluvia, los costos correspondientes al caudal bombeado (Gordon-Walker *et al.*, 2007). Así se evita incurrir en altos costos relacionados con la rehabilitación o incremento de la capacidad de las tuberías de drenaje (Gordon-Walker *et al.*, 2007). Así, los SUDS son una alternativa viable para actualizar sistemas de drenaje existentes, de forma que un incremento en el caudal de escorrentía por Cambio Climático, no aumente la frecuencia de inundaciones.

Los tanques de tormenta se definen como estructuras del alcantarillado diseñadas para retener el agua lluvia cuando la precipitación posee gran intensidad y sobrepasa la capacidad del sistema de drenaje, de forma que estos elementos logran evitar inundaciones. Adicionalmente, los tanques de tormenta pueden llegar a reducir la contaminación vertida en el cuerpo receptor al almacenar la primera porción de la escorrentía (Llopart-Mascaró *et al.*, 2015). Asimismo, estos elementos ayudan a regular el caudal que llega a las plantas de aguas residuales, de modo que este es cercano al de diseño (Llopart-Mascaró *et al.*, 2015). Incluso, algunos autores han encontrado que el costo de tanques de tormenta diseñados de forma óptima puede ser hasta una tercera parte del costo de reemplazar tuberías existentes (Cimorelli *et al.*, 2016). De esta manera, las ventajas anteriormente mencionadas evidencian la necesidad de realizar un estudio detallado del diseño hidráulico óptimo de estas estructuras y de los beneficios de instalarlas en diferentes ciudades.

En este orden de ideas, autores como Andrés-Doménech, Montanari y Marco (2011) han estudiado cómo cambia la eficiencia de tanques de tormenta en sistemas de drenaje urbano bajo condiciones de variabilidad climática con un enfoque estocástico. Los autores concluyen en su caso de estudio que se esperan reducciones en la eficiencia de los tanques dado el incremento de la precipitación, pero estos elementos pueden mantener su resiliencia si se rediseñan (Andrés-Doménech *et al.*, 2011). Esto evidencia la importancia de incluir el efecto del Cambio Climático en el diseño. Asimismo, el estudio establece un precedente en cuanto al análisis de la precipitación bajo Cambio Climático al usar una aproximación estocástica, en vez de escenarios determinísticos.

Ahora bien, con referencia a las metodologías de diseño óptimo de tanques de tormenta existentes, autores como Oxley y Mays (2014) desarrollaron un modelo con una única función objetivo que minimiza el volumen de los tanques usando HEC-HMS acoplado con un algoritmo de *Simulated Annealing*. Por su parte, Li, Duan, Yan y Tao (2015) crearon un modelo de optimización multiobjetivo acoplado con SWMM usando el algoritmo *Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimizer* (NSPSO). Las funciones objetivo minimizan los costos de construcción y los riesgos de inundación y permiten incorporar restricciones locales de la zona de estudio. Adicionalmente, consideran escenarios de precipitación con diferentes periodos de retorno. Por otro lado,

Cimorelli *et al.* (2016) emplearon algoritmos genéticos para encontrar el número, la posición y los tamaños óptimos de tanques de tormenta en redes de drenaje urbano con el objetivo de reducir las profundidades máximas y las velocidades de escorrentía para un periodo de retorno dado. Incluso, Duan, Li y Yan (2016) realizaron una optimización multiobjetivo de tanques de tormenta junto con otros sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Sin embargo, aún no se ha evaluado el efecto comparativo de la inclusión o exclusión de un control hidráulico en un tanque de tormenta sobre la mitigación de la inundación.

De acuerdo con lo anterior, el principal objetivo del presente trabajo es evaluar y contrastar el desempeño de dos metodologías de localización óptima de tanques de tormenta bajo distintos escenarios de precipitación que consideran los efectos del Cambio Climático en las ciudades de Bogotá y Medellín, Colombia. De esta manera, se pretende cuantificar y verificar el efecto de mitigación de inundación en los casos de estudio y con base en ello identificar las ventajas y limitaciones de cada método de optimización. Las dos metodologías empleadas localizan y dimensionan los tanques de tormenta de forma óptima. Sin embargo, la herramienta OptSU supone un control hidráulico donde la salida está regulada por el tamaño del orificio y el nivel de agua aguas arriba (Cunha *et al.*, 2016). Por el contrario, en el software OptiTank la regulación está dada por el nivel del agua y no tiene control hidráulico (Iglesias *et al.*, 2014). Estas herramientas fueron desarrolladas en el proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro”, realizado en la Universidad de los Andes (Universidad de los Andes PAVCO, 2014).

Asimismo, cabe aclarar que el presente documento se concentra en dos casos de estudio: la red Chicó Sur en Bogotá, y la red Prado en Medellín, Colombia. En 2020 la primera red fue considerada en investigaciones realizadas por Saldarriaga *et al.* (2020), dónde también se planteó la posibilidad de almacenar el agua dentro del sistema y liberarlo a un ritmo controlado. Retomando el estudio actual, las redes mencionadas se escogieron debido a que en estas zonas se han generado frecuentes inundaciones a causa de la insuficiente capacidad del sistema de drenaje. Por ejemplo, en 2017 en un paso vehicular a desnivel ubicado en la calle 94 en la red Chicó Sur se produjeron dos inundaciones de una duración superior a dos horas, que generaron grandes pérdidas económicas e impidieron la movilidad. Además de ello, si se suman los efectos del Cambio Climático, que se estiman en un incremento futuro de alrededor de 10% a 40% en la precipitación total para 2040 en las zonas de estudio (IDEAM *et al.*, 2015), se evidencia la necesidad de incrementar la capacidad de los sistemas de drenaje existentes. Adicionalmente, dado que las redes presentan características distintas en términos de pendiente y tamaño, se consideraron adecuadas con el fin de realizar un análisis comparativo para una misma metodología.

METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación está dividida en tres grandes partes. La primera está relacionada con el modelo hidráulico de la red de estudio, la segunda con la precipitación con la que se va a simular y encontrar la inundación asociada y la tercera con la localización de los tanques de tormenta en la red.

Modelo Hidráulico de la Red

El Modelo Hidráulico de la Red se obtuvo de la empresa encargada de la gestión del alcantarillado pluvial de la zona de estudio. En el caso de Bogotá esta información le pertenece a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y en Medellín las Empresas Públicas de Medellín (EPM) son las que administran la información. Algunas zonas se construyeron hace muchos años, por lo cual presentan información incompleta o inconsistente, por ejemplo, nudos sin tubería de salida, por lo cual se resolvieron estas deficiencias en los modelos.

Lo mínimo con lo que se debe contar para realizar el modelo hidráulico de la red son las coordenadas de los nudos y las tuberías, las cotas de fondo y rasantes de cada uno de los nudos, las cotas de batea, el diámetro, longitud y el material de las tuberías, además del tipo de sección de los conductos (circular o rectangular). Esta información generalmente es proporcionada en formato *ESRI Shapefile* (shp), el cual es el formato de archivo que utiliza ArcGIS (Esri Inc, 2018). A partir de esta información se delimitaron las cuencas de drenaje utilizando polígonos de Thiessen en ArcGIS (Esri Inc, 2018), de modo que a cada nudo le correspondiera una cuenca. Después, para cada cuenca se definió el porcentaje de área impermeable a partir de un mapa de usos de suelo y ortofotos, seguido del cálculo del ancho aproximado de la cuenca. Posteriormente, para cada una de estas se encontró

la pendiente promedio en porcentaje a partir de un modelo digital terreno (MDT) en ArcGIS (Esri Inc, 2018). Luego, se realizó el cálculo de la infiltración usando el método del Soil Conservation Service (SCS) (United States Department of Agriculture (USDA), 1986). Seguidamente, se realizó el cálculo de la profundidad máxima de cada uno de los nudos al restar la cota rasante de la cota de fondo. Finalmente, para cada tubería se define nudos de entrada y salida y se establecen sus propiedades (longitud, rugosidad, sección transversal y coordenadas X y Y).

Una vez se tiene esta información, se puede generar un archivo de entrada que represente la red en el programa Stormwater Management Model (SWMM) creado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US Environmental Protection Agency (EPA), 2011). Este es un modelo dinámico de simulación de lluvia-escorrentía, utilizado para un único evento o para realizar una simulación continua principalmente en zonas urbanas (Rossman, 2015). En el caso de la red Chicó Sur, el modelo parte de la información dada por la EAAB, por lo cual se considera confiable, pero no se validó. Para Prado no fue necesario construir el modelo hidráulico de la red debido a que fue directamente otorgado por EPM, es decir, que el modelo es confiable. A pesar de ello, se debería realizar un estudio para verificar la calibración de los modelos, pero no se estima que la exactitud de los modelos afecte el objetivo del presente estudio, que es contrastar los métodos de optimización OptSU y OptiTank.

Red Chicó Sur (Bogotá)

La primera red que se seleccionó en esta investigación es una red del alcantarillado pluvial de la ciudad de Bogotá, denominada Chicó Sur, la cual cuenta con 571 tuberías y 574 nudos. Esta red se ubica entre la Calle 92 y la Calle 100 (sentido Sur – Norte), y entre la Avenida 7ª y la Autopista Norte (sentido Oriente – Occidente). En este caso se consideró necesario realizar la modelación de la red dividiendo el área de estudio en cinco zonas, cuya localización corresponde a las Unidades de Gestión del Alcantarillado (UGA) de la red. Estas unidades fueron creadas por la EAAB con el fin de mejorar la gestión del sistema de alcantarillado de Bogotá. De esta forma, en la Figura 1 se evidencia la Red Chicó Sur y su ubicación en la ciudad.

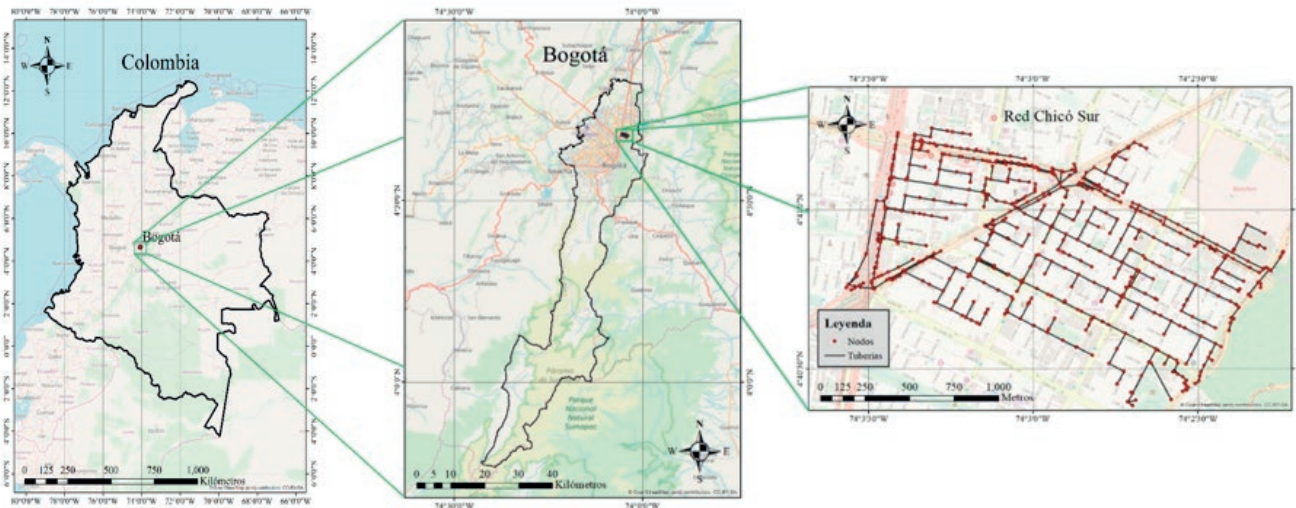


Figura 1 | Ubicación de la Red Chicó Sur.

Las cuencas aferentes urbanas de la red tienen un área de 250.8 ha. Adicionalmente, la pendiente promedio de las cuencas urbanas es 1.87% y aquella correspondiente a las rurales es 34.70%, donde la desviación estándar es alrededor de 3.98% para las cuencas urbanas. De esta red se puede destacar que presenta altas pendientes en los extremos del lado este, mientras que en el centro y en el lado oeste las pendientes son bajas. Además, la red tiene pocas caídas (desniveles en las tuberías de salida). Por otro lado, se puede afirmar que tiene un porcentaje de área impermeable muy alto de alrededor de 94.17% en promedio, dada la alta densificación urbanística de la zona, lo que desfavorece la infiltración del agua lluvia e incrementa la escorrentía de la zona de estudio. En este aspecto, los números de curva promedio son 91 y 74 para las superficies impermeables y permeables, respectivamente, de acuerdo

con la clasificación de la SCS (United States Department of Agriculture (USDA), 1986). Igualmente, se usó un tiempo de secado igual a 7 días dadas las características de la cuenca.

Red Prado (Medellín)

La segunda red que se seleccionó para esta investigación es una red del alcantarillado combinado de la ciudad de Medellín, denominada Prado, la cual cuenta con 51 tuberías, 49 nudos y dos descargas. Esta red está ubicada entre la Calle 63 y la Calle 22 en sentido Sur – Norte, y entre la Avenida Regional y la Avenida Venezuela en sentido Oriente – Occidente. En la Figura 2 se muestra el esquema de la red y su localización en donde es posible observar que la red drena al Río Medellín y tiene una configuración alargada. El área total de las cuencas aferentes a la red corresponde a 32.95 ha. La pendiente promedio de la cuenca corresponde a 6.4% y la desviación estándar es de 4.7%.

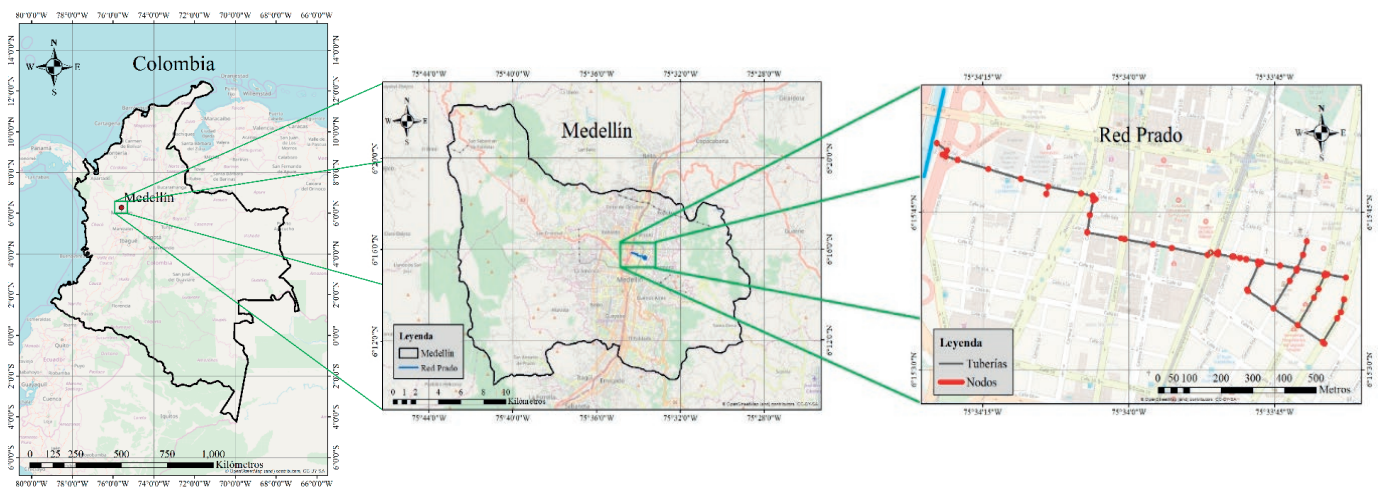


Figura 2 | Ubicación de la Red Prado

Esta red se caracteriza por tener altas pendientes y contar con numerosas caídas (desniveles en las tuberías de salida). Además, tiene un porcentaje de área impermeable alto de alrededor de 80% y números de curva promedio de 84 y 75 para zonas impermeables y permeables, respectivamente. Igualmente, se usó un tiempo de secado igual a 3 días dadas las características. A diferencia de la red Chicó Sur, esta red sólo cuenta con tuberías circulares, cuyo diámetro varía entre 0.25 m y 2 m. La diferencia del tiempo de secado de los dos casos de estudio se debe a la diferencia de tamaño y de pendiente promedio de las redes.

Eventos de Precipitación

Después de contar con el modelo de la red se procede a seleccionar el evento de precipitación que se va a emplear para utilizar los programas. Esto se hace con el objetivo de encontrar la inundación asociada con ese evento de lluvia. En esta investigación se usó el procedimiento descrito por los autores Saldarriaga *et al.* (2020) y Universidad de los Andes PAVCO (2014), con el fin de considerar los efectos de Cambio Climático. Este proceso se describe en detalle a continuación.

En general, el procedimiento consiste en utilizar Modelos de Circulación General (MCGs), los cuales permiten realizar predicciones climatológicas con base en el incremento de los gases de efecto invernadero en todo el planeta. Sin embargo, estos modelos no simulan con la misma precisión las condiciones climáticas en todo el mundo. En consecuencia, es necesario realizar un proceso de validación en el cual se determine qué modelos representan de forma más apropiada las condiciones climáticas de la zona de estudio. La validación se realiza contrastando las curvas IDF actuales de la zona con las curvas IDF con una duración de 24 horas elaboradas a partir de las series de precipitación histórica dadas por los MCGs. Para obtener las curvas IDF considerando los MCGs se ajustan los datos con la Función Generalizada de Valores Extremos (GEV, por sus siglas en inglés), se determina la

precipitación diaria correspondiente a 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años de período de retorno y finalmente es posible calcular las curvas IDF para los MCGs (Universidad de los Andes PAVCO, 2014). Estas últimas se comparan con las curvas IDF actuales mediante el cálculo del error cuadrático medio (ECM) y se selecciona aquél MCG con el mínimo ECM. Luego, dado que los MCGs se obtienen en ciertos puntos con una resolución de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (grillas de $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$, aproximadamente), se debe trasladar la información a las estaciones pluviométricas de la zona de estudio, donde se cuenta con tres tanto para Chicó Sur como para Prado. Para ello, se realiza una ponderación por el inverso de la distancia. Así, una vez se obtiene una serie de precipitación diaria en estos puntos, las series se ajustan nuevamente a la distribución GEV con sus parámetros calculados con el método de los L-momentos. A continuación, se obtienen las curvas IDF de 24 horas correspondiente a diferentes periodos de retorno.

Después, se convierten las curvas anteriores en curvas IDF para diferentes duraciones. Para la conversión de la precipitación diaria a duraciones inferiores se usaron dos métodos debido a la incertidumbre asociada a este proceso: el primero fue ideado por la Universidad Nacional de Colombia en 2009 (Pulgarín Dávila, 2009) y se desarrolló para ser aplicado principalmente en la Región Andina Colombiana. La ecuación del método Pulgarín se muestra a continuación:

$$I_t^T = \begin{cases} \left(\left[0.88 * I_{24h} - 0.004 \right] + \left[0.12 * \frac{I_{24h}}{0.5772} * -\ln \left[-\ln \left(1 - \left(\frac{1}{T} \right) \right) \right] \right] \right) * \left(\frac{t}{1440} \right)^{-0.829} & \text{si } t \geq 60 \\ I_{60} * (0.54t^{0.25} - 0.5) & \text{si } t < 60 \end{cases} \quad (1)$$

En la ecuación anterior I_{24h} corresponde a la intensidad promedio diaria en mm/hr, T es el periodo de retorno considerado en años, t es la duración para la cual se quiere determinar la intensidad en minutos e I_{60} corresponde a la intensidad para un evento de precipitación con una duración de una hora. El segundo método fue creado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), en el cual se calibran parámetros específicos de la zona de estudio a partir de la curva IDF obtenida con la Ecuación 1. La aproximación del método CIACUA se presenta en la Ecuación 2, donde I_T es la intensidad de un evento de 24 horas, I_t es la intensidad de un evento de menor duración y B , n y α son los parámetros calibrados (Universidad de los Andes PAVCO, 2014):

$$\frac{I_t}{I_T} = \frac{\alpha}{\left(\frac{t}{T} + B \right)^n} \quad (2)$$

Finalmente, se encontraron los hietogramas de precipitación a partir de la intensidad hallada para la duración y el tiempo de retorno de diseño. En este caso, la normativa colombiana recomienda un periodo de retorno de 10 años dada la vida útil del sistema y una duración igual al tiempo de concentración (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2016), que se estimó en 1 hora 35 min. para Chicó Sur y Prado. La obtención de hietogramas de precipitación se realizó utilizando el método de la intensidad instantánea, el cual consiste en suponer que la lámina de agua es igual al valor dado por la intensidad promedio para un periodo de duración T_d alrededor del pico de la tormenta, asumiendo que la intensidad varía de manera continua durante el evento de precipitación (Universidad de los Andes PAVCO, 2014). Respecto a la distribución del hietograma, se estimó un coeficiente de retardo, definido como la relación entre el tiempo antes del pico y la duración total, a partir de registros pluviográficos de mediciones cercanas a la zona de estudio. En este caso se encontró una gran variabilidad del coeficiente, pero se usó el valor promedio para considerar todas las mediciones. Así, tanto para Chicó Sur como para Prado se empleó un valor de 0.4.

De acuerdo con el anterior procedimiento, en la Figura 3 se presentan los hietogramas empleados en la red Chicó Sur y en la red Prado. En el caso de Chicó Sur, sólo se presenta el hietograma de la UGA 3, que presenta el pico máximo de intensidad respecto a otras UGA y se considera representativo para la zona de estudio. Sin embargo, para el procedimiento realizado se emplearon diferentes hietogramas para cada UGA con el fin de considerar la variabilidad espacial en la intensidad de precipitación, a pesar de que la diferencia máxima entre una y otra es sólo 8.05%.

Adicionalmente, cabe aclarar que en la Figura 3 se muestran los hietogramas para tres aproximaciones: EAAB o Prado, CIACUA y PULGARÍN. En este sentido, los escenarios EAAB o Prado no consideran efectos de Cambio Climático ya que se calcularon a partir de la información de las curvas IDF actuales de la zona; mientras que CIACUA y PULGARÍN sí los incluyen. Lo anterior se evidencia en la Figura 3, donde las intensidades de los escenarios CIACUA y PULGARÍN siempre son superiores a aquellas de EAAB o Prado. Ahora bien, al contrastar los escenarios CIACUA y PULGARÍN entre sí se encuentra que el primero presenta mayores intensidades en la mayor parte de la duración del evento en la red Prado; mientras que el segundo es dominante en la red Chicó Sur.

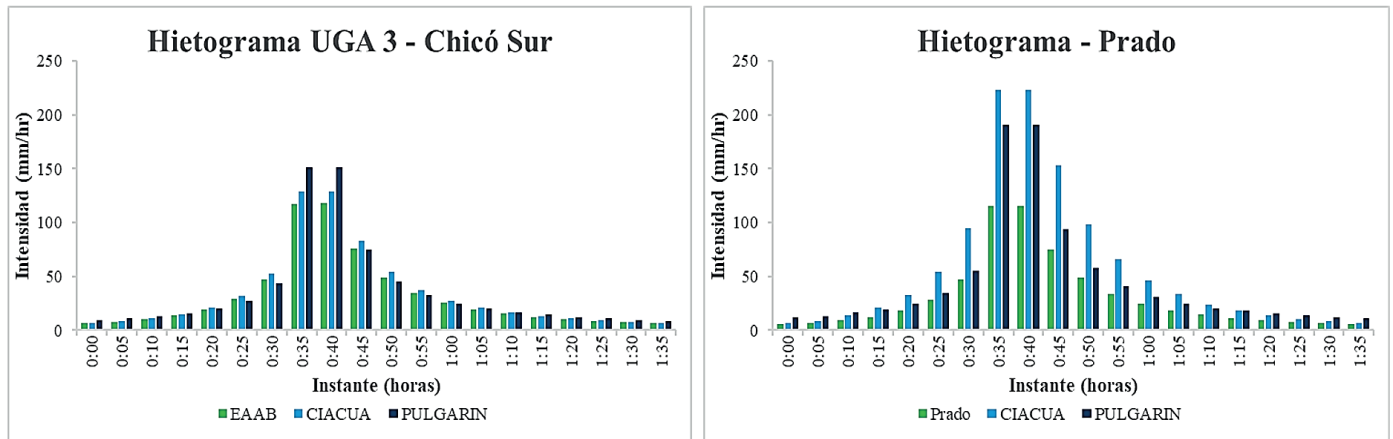


Figura 3 | Hietogramas empleados en la red Chicó Sur y en la red Prado.

Localización de tanques de tormenta

Para localizar los tanques de tormenta en la red se usaron dos herramientas, la primera se conoce como OptSU y la segunda como OptiTank. Estos dos programas fueron diseñados para correr la red de la zona de estudio internamente utilizando el programa SWMM, específicamente la versión 5.0 en español. De acuerdo con la Figura 3, con el fin de comparar los resultados con y sin inclusión del efecto climático, para OptiTank se emplearon los tres escenarios de precipitación: mientras que para OptSU sólo se simularon los escenarios CIACUA y PULGARÍN debido al alto costo computacional de este algoritmo.

Antes de utilizar OptSU u OptiTank es posible restringir el espacio de solución indicando en cuáles nudos se pueden instalar tanques de tormenta. Para ello, se pueden tener en cuenta varios criterios como la disponibilidad de espacio, el uso del suelo, la facilidad de construcción, entre otros. De igual manera, los algoritmos pueden encontrar una solución de forma automática considerando todos los nudos. En el presente trabajo, en algunos casos se restringió el espacio de solución teniendo en cuenta los anteriores factores y los nudos inundados, para lo cual se realizó una simulación con la precipitación obtenida empleando la ecuación del CIACUA, como se muestra en la Figura 4.

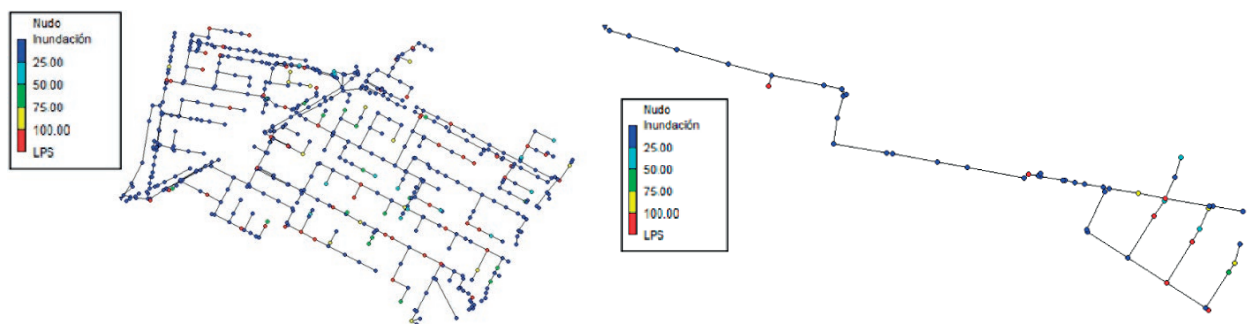


Figura 4 | Nudos inundados en la red Chicó Sur y red Prado.

Optimización con control hidráulico (OptSU)

El programa OptSU (Cunha *et al.*, 2016) fue desarrollado por expertos de la Universidad de Coímbra en Portugal y es un modelo de optimización que busca instalar tanques de almacenamiento en la red de drenaje pluvial de forma inteligente. En

este sentido, optimiza la localización y el tamaño de los tanques de tormenta, así como el diámetro del orificio de salida, que se establece como control hidráulico. Para ello emplea un algoritmo denominado *Simulated Annealing* que se acopla con SWMM para la evaluación de escenarios. Este algoritmo presenta cuatro parámetros, relacionados con el proceso de enfriamiento, que deben ser calibrados: α , γ , λ y σ (Zeferino *et al.*, 2009). El parámetro α se refiere a la tasa de aceptación inicial para posibles soluciones con un valor 10% inferior al de la solución inicial, γ establece la tasa de decrecimiento de la temperatura, λ define el número mínimo de posibles soluciones que deben ser evaluadas para cada temperatura y σ es el máximo número de reducciones de la temperatura que pueden ocurrir sin que exista una mejora en la mejor solución encontrada hasta el momento (Zeferino *et al.*, 2009). La calibración de estos parámetros asegura que el algoritmo encuentre soluciones óptimas en un tiempo razonable (Universidad de los Andes PAVCO, 2014).

El método OptSU tiene una única función objetivo que busca minimizar los volúmenes de los tanques y el volumen de inundación, que corresponden al primer y segundo término de la Ecuación 3, respectivamente (Cunha *et al.*, 2016). El factor se refiere al peso de la inundación en la función objetivo, que puede considerarse como una penalización debida a los impactos de inundación o como una aproximación a los costos asociados a los daños esta última y se encuentra en el rango de 0 a 100 (Cunha *et al.*, 2016). En el presente estudio, se tomará la Ecuación 3 como una aproximación de costos en euros.

$$\text{Mín} \sum_{j \in N_u} V_j + \theta \sum_{i \in N} V_i^{\text{Surch}} \quad (3)$$

Adicionalmente, esta metodología tiene en cuenta las restricciones hidráulicas, de espacio y normativas asociadas con cada red. Las restricciones del algoritmo incluyen un volumen máximo de inundación, un número máximo de tanques de tormenta, volúmenes mínimos y máximos de los tanques de tormenta, diámetros mínimos y máximos de los orificios y un caudal máximo en el nudo de salida (Cunha *et al.*, 2016).

Optimización sin control hidráulico (OptiTank)

Este programa fue desarrollado por expertos de la Universidad Politécnica de Valencia (Iglesias *et al.*, 2014) en España y busca minimizar el tamaño y el número de tanques de tormenta dentro de una red de drenaje pluvial. El programa optimiza la localización y el volumen de los tanques simultáneamente considerando restricciones hidráulicas y de espacio. Además, tiene la opción de rehabilitar ciertas tuberías de la red. Para este fin usa un algoritmo pseudo-genético acoplado con SWMM para la evaluación de soluciones. Los parámetros del algoritmo son la probabilidad de mutación, la probabilidad de cruzamiento, el tamaño de población y el número de generaciones sin cambio.

La metodología posee una única función objetivo (Ecuación 4) que es la sumatoria de cuatro funciones: el costo asociado con el nivel de inundación en los nudos, el costo de los tanques de tormenta que se van a instalar, el costo de cambiar conductos en la red y el costo asociado con el volumen de almacenamiento máximo de agua en la red, respectivamente. Cabe aclarar que N corresponde al número de nudos, N_o al número de tanques y M a las tuberías cambiadas. En el presente trabajo no se consideró una penalización por el volumen de almacenamiento máxima de agua en la red, es decir, $\lambda_4=0$ y $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1$.

$$\text{Mín} \lambda_1 \sum_{i=1}^N C(V_I(i)) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_o} C(V_{DR}(i)) + \lambda_3 \sum_{i=1}^M C(D_N(i))L_i + \lambda_4 \sum_{i=1}^M C(V_{m\acute{a}x}(i)) \quad (4)$$

En primer lugar, el costo de la inundación se aproximó mediante una función de costos polinómica mostrada en la Ecuación 5, en la cual se determina el costo de inundación por metro cuadrado de superficie $C(V_I)$ en función del nivel del agua (y). Los coeficientes A_1 , B_1 , C_1 y D_1 se calibraron para distintos estratos socioeconómicos y usos del suelo y para el presente trabajo se usaron los valores promedio considerando un nivel máximo igual a 1.4 m.

$$C(V_I) = A_1 y^4 + B_1 y^3 + C_1 y^2 + D_1 y \quad (5)$$

En segundo lugar, la metodología debe tener en cuenta el costo de las estructuras de almacenamiento temporal de aguas de escorrentía. Estas estructuras pueden ser depósitos de hormigón conocidos usualmente como tanques de tormenta, depósitos construidos con tuberías plásticas de gran diámetro (GRP, PVC, PEAD), o depósitos que usan estructuras modulares o depósitos reticulares tipo SUDS. Para este estudio, el costo de los depósitos $C(V_{DR})$ se determinó mediante la Ecuación 6 en función de sus volúmenes V_{DR} y de los coeficientes de ajuste A_2 , B_2 y C_2 . Los coeficientes se calibraron a través de un estudio de costos que considera los costos de excavación, los costos de implantación de un geotextil de impermeabilización y los costos de instalación de un depósito con estructuras modulares en Colombia.

$$C(V_{DR}) = A_2 + B_2 V_{DR}^{C_2} \quad (6)$$

Por otro lado, el costo del reemplazo de los conductos se calculó a partir de la Ecuación 7, donde el costo de las tuberías $C(D_N)$ está en función del diámetro de las mismas D_N y los coeficientes A_3 , B_3 y C_3 . Los coeficientes se determinaron a partir de un análisis comparativo entre los costos de adquisición e instalación de las tuberías en España y Colombia, de forma que los valores se adaptaran al caso colombiano.

$$C(D_N) = A_3 + B_3 D_N + C_3 D_N^2 \quad (7)$$

RESULTADOS

En primer lugar, se presentan los resultados de la red Chicó Sur en Bogotá, donde se encontraron reducciones de la inundación entre 63% y 68% utilizando OptSU, con unos costos asociados entre 1.4 y 1.6 millones de euros. Por su parte, utilizando OptiTank se lograron reducciones entre 70% y 99% con unos costos asociados entre 4 y 11 millones de euros.

En cuanto a la red Prado los resultados obtenidos con OptSU se ven fuertemente influenciados por el peso que se da a la inundación, encontrando mayores reducciones y mayores costos al incrementar la importancia de la inundación en las simulaciones. Utilizando esta metodología las reducciones en las inundaciones varían entre 7% y 90.5% con unos costos asociados entre 8823 euros y 85 700 euros. Por otro lado, al implementar OptiTank los porcentajes de reducción varían entre 60% y 99% con unos costos asociados entre 89 100 euros y 331 000 euros.

Red Chicó Sur (Bogotá): Resultados con OptSU

Para utilizar OptSU es necesario contar con caídas en los nudos con el fin de poder instalar tanques en estos. Infortunadamente, en esta red sólo uno de los nudos potenciales presentaba caída, razón por la cual se modificó la pendiente de los tubos que entraban a los nudos potenciales para generar caídas. Lo anterior implica que esta red ya no representa la realidad y no se puede comparar con los resultados para Chicó Sur usando OptiTank, pero es posible contrastar los resultados con la red Prado.

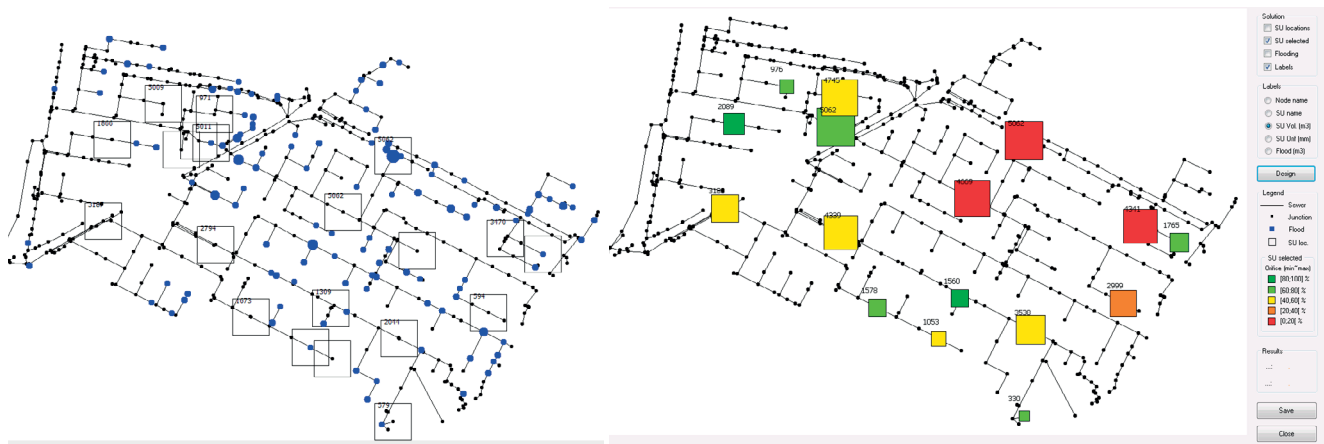
La localización de los tanques de tormenta se realizó priorizando la reducción de la inundación usando un peso de inundación (θ) igual a 100. Esta variable no se cambió debido a que resultaba complejo obtener resultados para distintos escenarios dado que la simulación de esta red tarda en promedio 22 días. Por otro lado, se realizaron dos tipos de simulaciones, en el caso 1 se utilizaron los parámetros por defecto de OptSU ($\alpha=0.5$, $\lambda=45$, $\gamma=0.25$, $\sigma=15$) y en el caso 2 se utilizaron los parámetros que fueron calibrados por la Universidad de Coimbra ($\alpha=0.2$, $\lambda=30$, $\gamma=0.8$, $\sigma=15$). Para esta red sólo se realizó la optimización de los casos que consideraban los efectos de Cambio Climático (CIACUA y Pulgarín) debido al alto costo computacional del programa. Los resultados de ambos casos y escenarios de precipitación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 | Resultados de inundaciones con OptSU en red Chicó Sur.

Caso	Escenario	Volumen de inundación inicial (m ³)	Número de tanques	Volumen tanques (m ³)	Volumen de inundación final (m ³)	Porcentaje de reducción (%)	Costo (€)
1	CIACUA	4.22·10 ⁴	14	6.43·10 ⁴	1.35·10 ⁴	68	1.40·10 ⁶
	Pulgarín	4.26·10 ⁴	16	6.06·10 ⁴	1.45·10 ⁴	66	1.51·10 ⁶
2	CIACUA	4.22·10 ⁴	17	6.61·10 ⁴	1.34·10 ⁴	68.2	1.41·10 ⁶
	Pulgarín	4.26·10 ⁴	16	6.39·10 ⁴	1.53·10 ⁴	63.9	1.61·10 ⁶

En la parte izquierda de la Figura 5 se muestra la ubicación y el volumen de los tanques de tormenta obtenidos con el programa OptSU al utilizar la ecuación del CIACUA para el caso 1, donde se usaron los parámetros por defecto de OptSU. Los tanques de tormenta están delimitados por recuadros y en su interior se encuentra el valor del volumen de cada uno. Los recuadros que no tienen ningún valor en su interior corresponden a nudos potenciales que no fueron seleccionados por el programa para albergar un tanque de tormenta. De igual forma, se muestra la inundación marcada con círculos azules en cada uno de los nudos. En la parte derecha de la Figura 5 se observa la ubicación y el volumen de los tanques obtenidos al utilizar la ecuación de Pulgarín, además se distingue con cuatro colores diferentes el tamaño del orificio seleccionado en cada caso, como porcentaje del área del tubo de descarga.

Si se comparan los resultados de las simulaciones obtenidos con los parámetros calibrados y los parámetros por defecto, se encuentra que, en el caso de la ecuación de Pulgarín, los resultados obtenidos con los parámetros por defecto son ligeramente mejores a los encontrados con los parámetros calibrados porque se logra una mayor reducción de la inundación. En cuanto a la ecuación del CIACUA los resultados son similares. Aunque son soluciones muy diferentes, en donde en una se prioriza la reducción en el nivel de inundación (calibración) y en la otra el tamaño de los tanques (defecto), al final se encuentra una solución similar en términos de costos y reducción de inundación.

**Figura 5** | Localización de tanques en la red Chicó Sur empleando OptSU para el caso 1, escenario CIACUA y Pulgarín.

Red Chicó Sur (Bogotá): Resultados con OptiTank

La optimización sin control hidráulico no requiere de caídas en los nudos, por lo tanto, la red que utilizada en estas simulaciones no fue modificada respecto a la proporcionada por la EAAB. Cada simulación duró en promedio sólo 5 días. Adicionalmente, se analizaron cuatro casos: en el caso 1 se permitía al programa instalar tanques de tormenta únicamente en los nudos potenciales definidos anteriormente; en el caso 2 se le indicaba al programa que podía colocar tanques de tormenta en todos los nudos; en el caso 3 se permitían tanques en los nudos potenciales y la rehabilitación de tuberías (cambiar las tuberías existentes por otras de diferente diámetro) y en el caso 4 se admitían tanques en todos los nudos y la rehabilitación de tuberías. Los resultados para los

casos simulados se evidencian en la Tabla 2, donde el número de nudos cambiados se refiere al número de tanques y el número de tuberías cambiados, a las tuberías rehabilitadas y este se indica seguido de una barra oblicua (/).

Tabla 2 | Resultados de inundaciones con OptiTank en red Chicó Sur.

Caso	Escenario	Volumen de inundación inicial (m ³)	Nudos / Tuberías cambiados	Volumen tanques (m ³)	Volumen de inundación final (m ³)	Porcentaje de reducción (%)	Costo (€)
1	EAAB	3.03·10 ⁴	25	2.93·10 ⁴	9059	70.1	4.31·10 ⁶
	CIACUA	3.78·10 ⁴	27	3.81·10 ⁴	1.13·10 ⁴	70	5.26·10 ⁶
	Pulgarín	3.81·10 ⁴	39	4.11·10 ⁴	7897	79.2	6.84·10 ⁶
2	EAAB	3.03·10 ⁴	101	5.01·10 ⁴	1637	94.6	5.87·10 ⁶
	CIACUA	3.78·10 ⁴	101	5.09·10 ⁴	2968	95.7	6.22·10 ⁶
	Pulgarín	3.81·10 ⁴	122	5.46·10 ⁴	2579	95.7	6.50·10 ⁶
3	EAAB	3.03·10 ⁴	57/400	3.75·10 ⁴	280	99.1	1.10·10 ⁷
	CIACUA	3.78·10 ⁴	65/75	4.01·10 ⁴	4329	88.5	7.98·10 ⁶
	Pulgarín	3.81·10 ⁴	63/73	4.44·10 ⁴	5266	86.2	7.69·10 ⁶
4	EAAB	3.03·10 ⁴	71/50	3.88·10 ⁴	3224	89.4	7.25·10 ⁶
	CIACUA	3.78·10 ⁴	127/63	5.25·10 ⁴	3270	91.3	9.96·10 ⁶
	Pulgarín	3.81·10 ⁴	112/34	5.56·10 ⁴	2579	93.2	8.61·10 ⁶

Los resultados obtenidos muestran una reducción significativa en la inundación, la cual varía entre el 70.0% y el 99.1%. Si se comparan los resultados de las simulaciones obtenidos en los cuatro casos, es evidente que el escenario en el que se encuentra la mayor reducción es en el caso 2 (tanques en todos los nudos de la red), ya que la inundación se disminuye más de un 95%. En la Figura 6 se muestra la ubicación de los tanques de tormenta obtenidos con el programa OptiTank para el caso 1 en el escenario EAAB. Los tanques de tormenta se encuentran encerrados en círculos rojos.

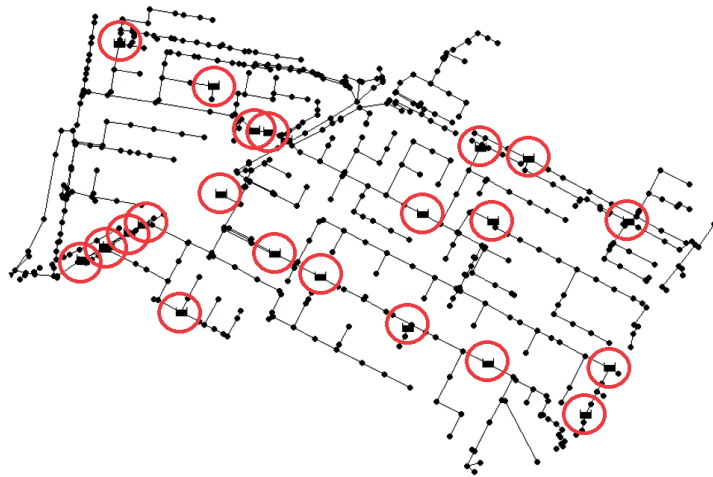


Figura 6 | Localización de tanques en la red Chicó Sur empleando OptiTank para el caso 1, escenario EAAB.

Red Prado: Resultados con OptSU

La localización de los tanques de tormenta se realizó cambiando el peso de inundación entre tres valores: 1.5, 10 y 100. Lo anterior fue posible gracias a que el tiempo computacional empleado en las simulaciones fue en promedio 8 horas debido al reducido tamaño de la red.

Por otro lado, se realizaron dos tipos de simulaciones: en el primero se utilizaron los parámetros por defecto y en el segundo se utilizaron los parámetros que fueron calibrados por la Universidad de Coimbra. Además, para cada configuración de parámetros se realizaron simulaciones de los escenarios CIACUA y Pulgarín. Los resultados se evidencian en la Tabla 3.

Tabla 3 | Resultados de inundaciones con OptSU en red Prado.

Caso	Parámetros	Peso de inundación	Escenario	Volumen de inundación inicial (m ³)	Número de tanques	Volumen tanques (m ³)	Volumen de inundación final (m ³)	Porcentaje de reducción (%)	Costo (€)
1	Defecto	1.5	CIACUA	8377	5	5181	5972	28.7	1.42·10 ⁴
			Pulgarín	4429	2	1040	4122	6.9	8823
2	Defecto	10	CIACUA	8377	12	9746	4045	51.7	5.02·10 ⁴
			Pulgarín	4429	11	1.01·10 ⁴	1843	58.4	2.26·10 ⁴
3	Defecto	100	CIACUA	8377	13	1.53·10 ⁴	2572	69.3	2.93·10 ⁵
			Pulgarín	4429	13	1.19·10 ⁴	1223	72.4	1.42·10 ⁵
4	Calibrados	1.5	CIACUA	8377	4	3183	7466	10.9	1.44·10 ⁴
			Pulgarín	4429	2	2315	4076	7.97	8430
5	Calibrados	10	CIACUA	8377	10	1.02·10 ⁴	4142	50.6	5.16·10 ⁴
			Pulgarín	4429	7	6240	2339	47.2	2.96·10 ⁴
6	Calibrados	100	CIACUA	8377	14	2.39·10 ⁴	1415	83.1	8.57·10 ⁴
			Pulgarín	4429	13	1.94·10 ⁴	421	90.5	6.15·10 ⁴

Los resultados obtenidos muestran una reducción en la inundación que varía entre el 6.9% y el 90.5%. Las reducciones más bajas se presentan cuando el peso de inundación es de 1.5, lo que era de esperarse porque en la función objetivo sólo se está penalizando el costo de inundación un 50% más. Por lo tanto, se espera que la reducción más alta se dé cuando el peso sea 100 y la reducción intermedia cuando el peso sea 10, lo que se refleja efectivamente en los resultados obtenidos. Adicionalmente, en la Figura 7 se presenta la ubicación de los tanques y el volumen de estos referido al caso 3, escenario Pulgarín.

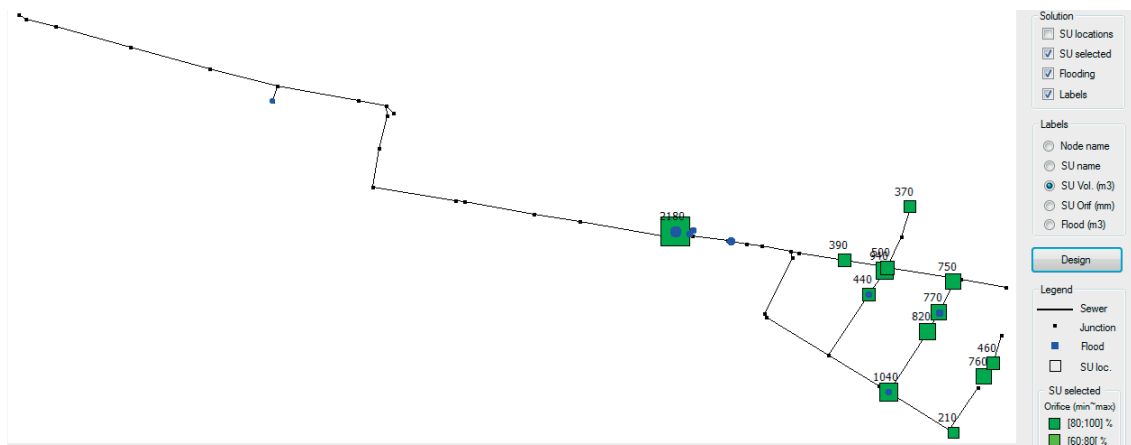


Figura 7 | Localización de tanques en la red Prado empleando OptSU para el caso 3, escenario Pulgarín.

Red Prado: Resultados con OptiTank

En las siguientes tablas se resumen los resultados obtenidos al utilizar OptiTank para localizar los tanques de tormenta en la red del Prado en cada uno de los casos descritos anteriormente en la sección de resultados de OptiTank para la red Chicó Sur.

Los resultados para los casos simulados se evidencian en la Tabla 4, donde el número de nudos cambiados se refiere al número de tanques y el número de tuberías cambiados, a las tuberías rehabilitadas y este se indica seguido de una barra oblicua (/).

Tabla 4 | Resultados de inundaciones con OptiTank en red Prado.

Caso	Escenario	Volumen de inundación inicial (m ³)	Nudos / Tuberías cambiados	Volumen tanques (m ³)	Volumen de inundación final (m ³)	Porcentaje de reducción (%)	Costo (€)
1	Prado	1349	5	502	544	59.7	2.72·10 ⁵
	CIACUA	8377	5	8206	2364	71.8	6.48·10 ⁵
	Pulgarín	4429	7	4152	1438	67.5	6.80·10 ⁵
2	Prado	1349	3	244	96	81.9	8.91·10 ⁴
	CIACUA	8377	8	2656	19	99.8	3.31·10 ⁵
	Pulgarín	4429	2	3628	540	87.8	1.59·10 ⁵
3	Prado	1349	4/3	973	36	97.3	2.24·10 ⁵
	CIACUA	8377	10/5	8258	395	95.3	5.66·10 ⁵
	Pulgarín	4429	4/5	3899	298	93.3	2.49·10 ⁵
4	Prado	1349	1/11	231	112	91.7	9.59·10 ⁴
	CIACUA	8377	10/13	1.54·10 ⁴	188	97.8	6.70·10 ⁵
	Pulgarín	4429	2/6	8113	267	94	2.74·10 ⁵

Los resultados obtenidos muestran una reducción significativa en la inundación, la cual varía entre el 59.7% y el 99.8%. Si se comparan los resultados de las simulaciones obtenidos en los cuatro casos, es evidente que los escenarios en los que se encuentra la mayor reducción son los casos 3 y 4, con excepción del caso 2 escenario CIACUA. Además, para este último caso se muestra la ubicación de los tanques, encerrados en círculos rojos, en la Figura 8.

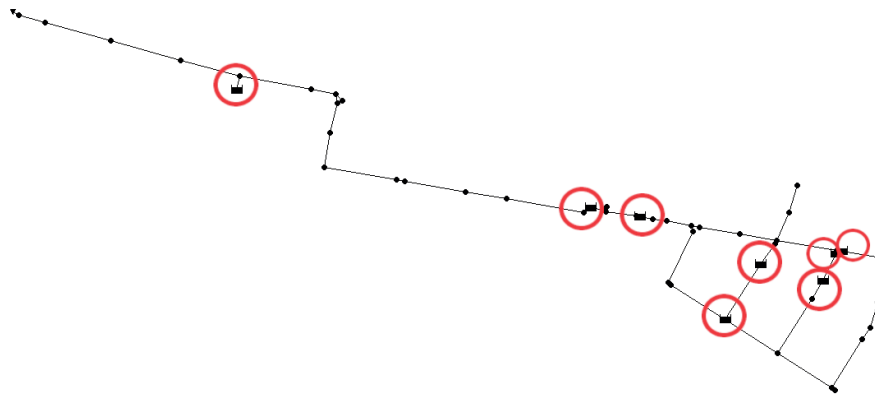


Figura 8 | Localización de tanques en la red Prado empleando OptiTank para el caso 2, escenario CIACUA.

DISCUSIÓN

En primer lugar, al comparar los escenarios que incluyen Cambio Climático y aquellos que no, se observa que en Chicó Sur los volúmenes iniciales de inundación no presentan una gran diferencia, pero en todos los casos son muy altos y mayores a 30000 m³. Lo anterior indica que es necesario implementar alternativas como las presentadas en el presente trabajo para reducir el riesgo de pérdidas económicas importantes en la zona. Por su parte, en Prado se presentan volúmenes iniciales de inundación

representativamente superiores en los escenarios que incluyen Cambio Climático, mientras que la simulación sin incluir los efectos de este último tiene una inundación baja (1349 m³). Por lo tanto, es recomendable adaptar la red al aumento de la intensidad de las lluvias.

Por otro lado, se evidencia una gran diferencia entre el costo obtenido con OptSU y con OptiTank para una misma red, lo cual es coherente con la función objetivo de cada modelo. En este sentido, para OptiTank se plantea una función de costos que logra brindar una idea de los costos reales de ejecución. Por el contrario, OptSU no incorpora una función de costos reales, sino aproximados a partir del factor de importancia de la inundación θ . Por consiguiente, el porcentaje de reducción de la inundación es el indicador más adecuado para realizar un contraste entre las metodologías. De acuerdo con ello, OptSU logró reducciones en el volumen de inundación hasta un valor máximo de 68.2% en la red Chicó Sur y 90.5% en la red del Prado, es decir, que esta metodología presenta un mejor desempeño en la red Prado. En cuanto a OptiTank, la máxima reducción de la inundación fue 95.7% para Chicó Sur y 99.8% para Prado considerando únicamente los escenarios con Cambio Climático. De igual forma, este método presenta mejores resultados en términos de mitigación de la inundación para la red Prado.

Lo anterior puede deberse principalmente a dos factores que diferencian estas redes: el tamaño y el tipo de red. Chicó Sur tiene aproximadamente 12 veces los nudos de la red Prado, lo cual indica que el espacio de solución de la primera es considerablemente superior. Este hecho dificulta la exploración de las soluciones factibles y disminuye la posibilidad de hallar una solución óptima satisfactoria. Adicionalmente, es posible que la configuración de la red, considerando una clasificación como malla abierta o cerrada, influya en la efectividad de la búsqueda de la solución óptima. Asimismo, cabe destacar que la pendiente de la red tiene una gran influencia pues OptSU tiene mejor desempeño para redes de alta pendiente como Prado al compararla con Chicó Sur; mientras que OptiTank puede ser aplicado para redes de alta y baja pendiente con excelentes resultados.

Adicionalmente, al comparar los resultados de las dos metodologías para la red Prado, se encuentra que el volumen de los tanques y el porcentaje de reducción encontrados con OptiTank son comparables a OptSU sólo cuando el peso de la inundación es 100. De lo contrario, el volumen de los tanques de OptSU es inferior a OptiTank, al igual que el porcentaje de reducción de la inundación. Lo anterior es entendible si se considera que OptSU presenta mayores restricciones debido a que el volumen de los tanques depende de la altura máxima disponible, es decir, la caída en las cámaras. Por su lado, OptiTank puede presentar mayor libertad dado que la limitante es el área disponible para instalar el tanque. Además, para los mayores porcentajes de reducción de OptSU, que se presentan con $\theta=100$, los volúmenes de los tanques son un orden de magnitud mayores a los casos 1 y 3 de OptiTank y, por ende, OptSU resulta en mayores costos a pesar de tener menores porcentajes de mitigación. Por consiguiente, en general OptiTank presenta un mejor desempeño para la red Prado.

Respecto al conjunto de parámetros utilizados para OptSU, se pudo evidenciar que aquellos por defecto y aquellos calibrados dieron resultados muy similares en términos de la inundación y los costos. La única diferencia apreciable se presentó en la red del Prado cuando el peso de inundación empleado fue 100. En este caso, la máxima diferencia entre los parámetros calibrados y aquellos por defecto se presentó para el escenario Pulgarín, donde los primeros mostraron una reducción de 90.5% en comparación con un 72.4% para los segundos. Lo anterior indica que es recomendable calibrar adecuadamente los parámetros del algoritmo cuando se usan altos pesos de inundación.

Con referencia a OptiTank, los casos 2 y 4 presentan mayor porcentaje de reducción de la inundación, sin implicar un mayor costo respecto a los casos 1 y 3 en algunos escenarios. Respecto a los casos 1 y 3, que son los más realistas al tener en cuenta sólo los nudos potenciales, se observan comportamientos distintos en ambas redes. El caso 3, que incluye rehabilitación de tuberías, implica un mayor porcentaje de reducción, pero mayor costo que el caso 1 en Chicó Sur. Por el contrario, en el caso 3 para algunos escenarios en Prado se alcanzan mayores porcentajes con menores costos respecto al caso 1.

Respecto a otros métodos, se han encontrado 11.1 tanques/km² en metodologías de optimización multiobjetivo sin restringir nudos potenciales para una lluvia con 20 años de periodo de retorno en una cuenca urbana de más de 4.4 km² (Li *et al.*, 2015). A pesar de que esta referencia no es directamente comparable al presente trabajo debido a que estudian redes distintas, en OptSU se encontraron relaciones de 5 tanques/km² para Chicó Sur y para OptiTank se halló una magnitud de 7.3 tanques/km² en Chicó Sur en el caso 1, escenario EAAB. En la red Prado las relaciones fueron superiores respecto a la referencia posiblemente debido a que presenta un área significativamente inferior a la fuente consultada. De este modo, OptSU y OptiTank se establecen como sistemas de apoyo a la decisión de alto desempeño. En este sentido, estos algoritmos permiten encontrar con mayor facilidad soluciones con

menores costos y menores volúmenes de inundación al compararlo con la simulación de sólo algunos escenarios y alternativas a criterio del diseñador en las que difícilmente se explora eficientemente el espacio de solución.

CONCLUSIONES

Las dos metodologías, OptSU y OptiTank, utilizadas para localizar los tanques de tormenta en la red de Chicó Sur y la red del Prado, dieron como resultado altos porcentajes de reducción de la inundación y se puede afirmar que presentan un mejor desempeño general respecto a otros métodos. Sin embargo, es importante destacar que el programa OptiTank encontró cada solución en un menor tiempo comparado con OptSU. Esta diferencia se notó principalmente en las simulaciones realizadas en la red Chicó Sur, donde OptiTank tardó aproximadamente 5 días, mientras OptSU tardó aproximadamente 22 días. Además de ello, OptiTank en general alcanza mayores porcentajes de reducción de inundación respecto a OptSU.

Sin embargo, es posible que el desempeño de los algoritmos dependa de las características de la red analizada en términos del tamaño y tipo de red, es decir, si es abierta o cerrada. En este caso no se logró dilucidar el efecto separado de cada uno de estos factores, por lo cual se recomienda comparar redes con tamaños similares, pero tipologías distintas y viceversa para evaluar de forma detallada las limitaciones de los métodos de optimización empleados. A pesar de ello, en esta investigación se evidenció que OptSU es recomendable para redes con altas pendientes y no se debería usar en redes planas donde la caída en las cámaras es muy baja. Con referencia a OptiTank, se encontró que presenta un excelente resultado en redes con alta y baja pendiente.

Por otro lado, es recomendable realizar más simulaciones en el programa OptSU cambiando el conjunto de parámetros del programa con el fin de calibrar estos valores en la red de estudio, especialmente si se trata de una red pequeña, donde se garantiza que el tiempo de simulación es razonable. De lo contrario, se puede realizar en una porción de la red o una simplificación de esta para reducir el costo computacional antes de realizar la simulación con la red real.

De igual forma, es útil cambiar los parámetros del algoritmo pseudo-genético de OptiTank cuando se incrementa el espacio de solución con el fin de disminuir la probabilidad de quedarse estancado en un mínimo local. Por otro lado, dado que OptiTank es un algoritmo pseudo-genético, los resultados de cada simulación pueden ser diferentes, por lo cual es recomendable realizar múltiples simulaciones de un mismo caso con el fin de escoger aquella solución con el mínimo costo.

Finalmente, es aconsejable explorar un algoritmo para definir de forma automática los nudos potenciales en función del espacio disponible, el volumen de inundación, la disponibilidad del suelo, las restricciones legales y las condiciones geográficas del área de estudio. De este modo, se evitaría realizar este proceso de forma manual, lo cual puede conllevar la inclusión o exclusión de nudos potenciales errados. Este proceso garantizaría mayor confiabilidad al usar OptSU y OptiTank dado que son sensibles a la localización de los nudos potenciales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Mexichem de Colombia por financiar la presente investigación a través del proyecto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro. Fase II”, sin el cual no habría sido posible completar este estudio.

REFERENCIAS

Andrés-Doménech, I., Montanari, A., Marco, J.B. 2011. Efficiency of Storm Detention Tanks for Urban Drainage Systems under Climate Variability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(1), 36-46. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000144](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000144)

- Berggren, K., Olofsson, M., Viklander, M., Svensson, G., Gustafsson, A.M. 2011. Hydraulic impacts on urban drainage systems due to changes in rainfall caused by climatic change. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), 92-98. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000406](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000406)
- Camilloni, I. 2014. Reunión Aproximación Delta Change. Bogotá. (Octubre de 2014).
- Cimorelli, L., Morlando, F., Cozzolino, L., Covelli, C., Della Morte, R., Pianese, D. 2016. Optimal positioning and sizing of detention tanks within urban drainage networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(1), 04015028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000927](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000927)
- Cunha, M.C., Zeferino, J.A., Simões, N.E., Saldarriaga, J.G. 2016. Optimal location and sizing of storage units in a drainage system. *Environmental Modelling & Software*, 83, 155-166. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2016.05.015>
- Du, S., Shi, P., Van Rompaey, A., Wen, J. 2015. Quantifying the impact of impervious surface location on flood peak discharge in urban areas. *Natural Hazards*, 76, 1457-1471. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1463-2>
- Duan, H.F., Li, F., Yan, H. 2016. Multi-Objective Optimal Design of Detention Tanks in the Urban Stormwater Drainage System: LID Implementation and Analysis. *Water Resources Management*, 30(13), 4635-4648. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1444-1>
- EPA Office of Wastewater Management. 2015. *Why Control Sanitary Sewers Overflows?* https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/sso_casestudy_control.pdf
- Esri Inc. 2018. *ArcGIS Desktop* (10.7). Environmental Systems Research Institute Inc.
- Gordon-Walker, S., Harle, T., Naismith, I. 2007. *Cost-benefit of SUDS retrofit in urban areas (Science Report-SC060024)*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290993/scho0408bnxz-e-e.pdf
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería. 2015. *Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones-Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/escenarios_cambioclimaticodepartamental/Estudio_tecnico_completo.pdf
- Iglesias, P., Martínez, J., Saldarriaga, J., Vallejo, D. 2014. Localización de tanques de tormenta para control de inundaciones mediante un algoritmo pseudo- genético. *XIII Simposio Iberoamericano de Redes de Agua*.
- Khazaei, M.R., Zahabiyou, B., Saghafian, B. 2012. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. *International Journal of Climatology*, 32, 1997-2006. <https://doi.org/10.1002/joc.2416>
- Li, F., Duan, H.F., Yan, H., Tao, T. 2015. Multi-Objective Optimal Design of Detention Tanks in the Urban Stormwater Drainage System: Framework Development and Case Study. *Water Resources Management*, 29(7), 2125-2137. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0931-0>
- Llopart-Mascaró, A., Farreny, R., Gabarrell, X., Rieradevall, J., Gil, A., Martínez, M., Puertas, J., Suárez, J., Río, H. del, Paraira, M. 2015. Storm tank against combined sewer overflow: Operation strategies to minimise discharges impact to receiving waters. *Urban Water Journal*, 12(3), 219-228. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.868499>
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. 2016. *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TITULO D. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias / Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico*.
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C.W., Hodnebrog, M., Marelle, L., Samset, B.H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M., Stohl, A. 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9(16063). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- Nie, L., Lindholm, O., Lindholm, G., Syversen, E. 2009. Impacts of climate change on urban drainage systems –a case study in Fredrikstad, Norway. *Urban Water Journal*, 6(4), 323-332. <https://doi.org/10.1080/15730620802600924>

- Oxley, R.L., Mays, L.W. 2014. Optimization - Simulation Model for Detention Basin System Design. *Water Resources Management*, 28, 1157-1171. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0552-z>
- Prudhomme, C., Reynard, N., Crooks, S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: Where are we now? *Hydrological processes*, 16, 1137-1150. <https://doi.org/10.1002/hyp.1054>
- Pulgarín Dávila, E.G. 2009. *Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad - frecuencia - duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (región andina colombiana)*. <http://bdigital.unal.edu.co/2467/>
- Rossmann, L. 2015. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 - manual*.
- Ruiter, A. 2012. Delta-change approach for CMIP5 GMCs. *De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute*.
- Saldarriaga, J., Salcedo, C., Solarte, L., Pulgarín, L., Rivera, M.L., Camacho, M., Iglesias-Rey, P.L., Martínez-Solano, F.J., Cunha, M. 2020. Reducing Flood Risk in Changing Environments: Optimal Location and Sizing of Stormwater Tanks Considering Climate Change. *Water*, 12(9), 2491. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12092491>
- Solman, S., Nuñez, M. 1999. Local estimates of global climate change: A statistical downscaling approach. *International Journal of Climatology*, 19, 835-861. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19990630\)19:8%3C835::AID-JOC401%3E3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19990630)19:8%3C835::AID-JOC401%3E3.0.CO;2-E)
- United States Department of Agriculture (USDA). 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Universidad de los Andes PAVCO. 2014. *Drenaje Urbano y Cambio Climático FASE I-II: Hacia los sistemas de alcantarillado del futuro*. Bogotá. Informe final no publicado.
- US Environmental Protection Agency (EPA). 2011. *Storm Water Management Model (SWMM) (5.0.022)*. Environmental Protection Agency (EPA).
- Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., Nguyen, V. 2012. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric research*, 103, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.003>
- Willems, P., Olsson, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Beecham, S., Pathirana, A., Bulow Gregersen, I., et al. 2012. Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems. *IWA Publishing*. <https://doi.org/10.2166/9781780401263>
- Zeferino, J.A., Antunes, A.P., Cunha, M.C. 2009. An efficient simulated annealing algorithm for regional wastewater system planning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00594.x>