

02-035

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DRAINAGE NETWORKS REHABILITATION PROJECTS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Ngamaliou-Nengoue, Ulrich Aurele<sup>(1)</sup>; Iglesias-Rey, Pedro L.<sup>(1)</sup>; Martinez-Solano, F. Javier<sup>(1)</sup>;  
Saldarriaga-Valderrama, Juan G.<sup>(2)</sup>; Mora-Melia, Daniel<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Universitat Politècnica de València, <sup>(2)</sup>Universidad de Los Andes, <sup>(3)</sup>Universidad de Talca

Drainage networks are currently experiencing a significant increase in runoff flows, mainly caused by waterproofing of the soil and the effects of climate change. This results in properly designed networks presenting floods with return periods much higher than those considered in the design phase.

This paper presents a methodology for the rehabilitation of these drainage networks based on three stages: a study of the design rainfall obtained from climate change models; a hydraulic analysis model of the network and a heuristic optimization model. The recursively used of the optimization model allows the pre-location of retention tanks and pipes that potentially should be rehabilitated. Subsequently, the same optimization method is used for the detail design of tanks and ducts. The methodology developed has been applied to a sector of the drainage network of the city of Bogotá network. The results show the pre-localization phase reduces the search space and increases the convergence towards the final solution. Likewise, the method shows how joint use of tanks and pipe rehabilitation involves projects with a lower investment cost.

**Keywords:** *Climate change; optimization; rehabilitation; urban drainage*

## DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE REHABILITACIÓN DE REDES DE DRENAJE PLUVIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las redes de drenaje experimentan en la actualidad un creciente aumento de los caudales de escorrentía, originados principalmente por la impermeabilización del suelo y los efectos del cambio climático. Esto origina que redes originalmente diseñadas correctamente presenten inundaciones con periodos de retorno muy superiores a los considerados en la fase de diseño.

En este trabajo se presenta una metodología de rehabilitación de estas redes de drenaje basada en tres etapas: un estudio de la lluvia de diseño obtenida a partir de modelos de cambio climático; un modelo de análisis hidráulico de la red y un modelo heurístico de optimización. El modelo de optimización utilizado recursivamente permite la pre-localización de los tanques de retención y de las tuberías que potencialmente deberían ser rehabilitadas. Posteriormente el mismo método de optimización se emplea para el diseño de detalle de tanques y conductos. La metodología desarrollada ha sido aplicada a un sector de la red de drenaje de Bogotá (Colombia). Los resultados muestran la fase de pre-localización reduce el espacio de búsqueda y aumenta la convergencia hacia la solución final. Asimismo el método muestra como utilización conjunta de tanques y conductos supone proyectos de menor coste de inversión.

**Palabras clave:** *Cambio climático; Optimización; rehabilitación; drenaje urbano*

Correspondencia: Pedro L. Iglesias (piglesia@upv.es)



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Desde siempre, la humanidad ha tenido presente la importancia de evacuar las aguas tanto pluviales como residuales de sus asentamientos. Para ello, se construían redes de evacuación cuya misión principal era llevar las aguas precipitadas o servidas hasta puntos de vertido donde no constituyeran riesgos ni contra las personas ni contra las construcciones. Sin embargo, debido a las condiciones cambiantes tanto de la población como del clima, estas redes de alcantarillado presentan deficiencias respecto de los objetivos de funcionamiento con los que fueron diseñados en el momento de su construcción.

Como sucede con cualquier otra infraestructura, las redes de alcantarillado urbano se diseñan con un propósito y unos criterios definidos en un determinado momento. En el caso de las redes saneamiento, los criterios empleados se derivan de la capacidad de transporte de las conducciones y su relación con una serie de eventos de lluvia obtenidos a partir del análisis histórico de precipitaciones (Ngamalieu et al., 2017).

El efecto combinado del aumento de la urbanización, la impermeabilización del terreno y el aumento de las precipitaciones por causas antropogénicas (cambio climático y efecto de isla de calor) han hecho que las inundaciones en las áreas urbanas sean cada vez más frecuentes en los últimos tiempos (Yazdi et al., 2015).

La preocupación por el cambio climático está plenamente justificada. De la misma forma, es evidente la relación existente entre el cambio climático y el cambio del régimen de precipitaciones tanto en intensidad como en frecuencia en algunas zonas del planeta. Según algunos modelos climático, la probabilidad de ocurrencia de lluvias intensas aumentará en un futuro debido al aumento de las condiciones de los gases de efecto invernadero (Mailhot y Duchesne, 2010). Resulta evidente que si cambian las condiciones de lluvia con respecto a las utilizadas en su día para el diseño de las redes de evacuación, éstas no podrán funcionar de manera eficaz en el futuro (Kirshen et al., 2015).

En cualquier caso, culpar de la falta de capacidad de las redes de alcantarillado exclusivamente al cambio climático o a la impermeabilización del suelo no sería del todo correcto. Existen otros aspectos como el envejecimiento de las infraestructuras, la falta de mantenimiento y el consecuente deterioro de algunos conductos que también generan una disminución en la capacidad de transporte los sistemas de drenaje. Es aquí donde surge la necesidad de un adecuado programa de rehabilitación y adaptación de las redes de alcantarillado a las condiciones cambiantes tanto climatológicas como hidrológicas. El enfoque tradicional por el cual la rehabilitación pasa necesariamente por el incremento en la capacidad de transporte de las conducciones puede resultar poco acertado e incluso anti-económico. Este enfoque se debe combinar con enfoques más novedosos como la utilización del control en tiempo real (RTC), la utilización de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) o el empleo de depósitos de retención.

Entre los diferentes trabajos que se han publicado en referencia con la rehabilitación de redes de alcantarillado destacan los presentados por Reyna, Vanegas y Khan (1994) sobre las tecnologías de construcción para la rehabilitación de redes de alcantarillado. Por su parte, Abraham et al. (1998) plantean como estrategia de rehabilitación la gestión integrada de los sistemas de drenaje. Estos autores incluyen en su concepto de gestión integrada aspectos tales como la identificación y clasificación de los elementos de la red, los mecanismos de control del estado de la red, el desarrollo de un modelo predictivo de lluvias y el uso de técnicas

de optimización que permiten priorizar unas estrategias de rehabilitación frente a otras, buscando la maximización del beneficio y la minimización del coste.

En este sentido, se presenta una metodología para optimizar las inversiones destinadas a la rehabilitación de redes de alcantarillado, pensando en escenarios derivados de las predicciones asociadas al cambio climático. El objetivo de este trabajo consiste en proponer una metodología para la rehabilitación de redes de alcantarillado considerando tanto los costes de instalación como los costes asociados a los daños provocados por las inundaciones. El análisis hidráulico de las redes de alcantarillado deberá incluir condiciones de lluvias extremas. Por ello, se han de utilizar modelos de cálculo hidráulico que incluyan situaciones derivadas de tales precipitaciones, como pueden ser la entrada en carga o la posibilidad de inundación. Estos modelos requieren en muchas ocasiones un análisis en periodo extendido con intervalos de cálculo muy pequeños, lo cual alarga las simulaciones. Por ello, con el objetivo de reducir los tiempos de cálculo, se ha optado por una metodología que permite reducir el número de variables de decisión sin comprometer por ello la calidad de las soluciones. Para ello se combina un algoritmo genético basado en una codificación entera Mora-Melia et al. (2013) conectado con el simulador hidráulico SWMM5 (Rossman, 2015) mediante una librería de conexión desarrollada para agilizar el acceso a los distintos elementos de la red (Martínez-Solano et al., 2016). Esto permite un análisis rápido y eficaz del comportamiento de la red objeto de estudio.

Finalmente, esta metodología se ha contrastado aplicándola a la red de alcantarillado del distrito de Chicó en Bogotá (Colombia).

## 2. Objetivos

### 2.1. Formulación del problema

Cuando una red de alcantarillado presenta problemas de inundación, las causas pueden ser diversas. Por una parte, la propia precipitación tiene un carácter casi aleatorio debido al elevado número de parámetros de los que depende. Esto se traduce en diseños que no pueden garantizar al 100% su funcionamiento sin riesgos. Así, las causas de la inundación pueden ser:

- La lluvia resulta objetivamente excesiva. Para compensar este problema, los protocolos de diseño deben incluir el concepto de riesgo en el diseño. Normalmente, en el campo de las redes de alcantarillado esto se trata a través de la selección del periodo de retorno. A mayor periodo de retorno menor riesgo de inundación y viceversa. Por ello, una de las fases del proyecto de rehabilitación ha de ser la selección de un periodo de retorno o, en su defecto, un nivel de riesgo asumible.
- La propia red de alcantarillado tiene una cierta capacidad de transporte. Sin ánimo de entrar en detalles hidráulicos, en régimen permanente hay una relación entre las condiciones internas de los conductos, su tamaño y el caudal que son capaces de transportar. Esta relación viene dada por la ecuación de Manning.
- Por último, se puede valorar la posibilidad de almacenar temporalmente el exceso de agua procedente de la lluvia con el fin de facilitar su posterior tratamiento y no trasladar el problema hacia aguas abajo, a puntos donde la cota pueda ser inferior y, por lo tanto, los problemas asociados a una posible inundación resulten más graves. Para ello, (Sánchez-Beltrán et al., 2017)

Con estos antecedentes, el problema se puede plantear como un problema de optimización en el que se busca minimizar los problemas asociados a las inundaciones con el mínimo coste de inversión, tanto en conducciones como en depósitos de retención. Esto conduce a una

función objetivo compuesta a su vez de tres términos o funciones de coste y sujeta a una serie de restricciones.

Las restricciones son principalmente las asociadas a las relaciones hidráulicas dentro de la propia red. Para ello, se hace necesario disponer de un modelo matemático de la misma que debe cumplir varios requisitos:

- Al tratarse de una rehabilitación para un horizonte futuro, deben incluirse escenarios que tengan en cuenta la posible variación de las condiciones de lluvia en eventos de cambio climático. Así, Gulizia y Camilloni, (2015) proponen el empleo de Modelos Globales de Cambio Climático para la obtención de tormentas de proyecto que tengan en cuenta estos escenarios.
- Dentro del ciclo hidrológico, el agua de lluvia sufre una serie de transformaciones desde que cae hasta que ingresa en la red de alcantarillado. Esto obliga a incorporar modelos de transformación de la lluvia en escorrentía. En este caso se empleará el modelo de depósitos no lineales incluido en el programa SWMM (Rossman y Huber, 2015).
- A diferencia de otros planteamientos similares (Mays y Yen, 1975; Meredith, 1971; Moeini y Afshar, 2012), que emplean aportes constantes y directos a la red de alcantarillado, en este proyecto se ha buscado estudiar la variación de la precipitación a lo largo del tiempo. Por ello, se ha resuelto el problema completo utilizando el modelo de resolución de la Onda Dinámica incluido en el mencionado SWMM.

## 2.2. Funciones de coste

El objetivo de la rehabilitación debe ser el de minimizar los problemas asociados a las inundaciones con el mínimo coste de inversión. Por lo tanto, además de las restricciones anteriores, de carácter principalmente hidráulico, es necesario definir una serie de funciones de coste. Para ello se utilizarán las presentadas por Navarro-Planas, Iglesias-Rey, Martínez-Solano y Saldarriaga Valderrama (2016) y que se reproducen brevemente a continuación:

1. Coste asociado a los daños provocados por las inundaciones en función del nivel alcanzado por las mismas ( $y$ ). Este coste se ha determinado a partir de estudios realizados en la ciudad de Bogotá (Colombia) y relaciona el nivel alcanzado por el agua durante la inundación y el daño asociado a la misma ( $C_i$ ). A partir de un cierto nivel ( $y_{max}$ ) el daño se considera irreparable y por tanto, la función deja de crecer y el coste alcanzará su máximo valor ( $C_{max}$ ):

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N_N} C_i(y_k) = \sum_{i=1}^{N_N} C_{max} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot \frac{y_i}{y_{max}}}\right) \quad (1)$$

2. Coste de inversión asociado al volumen de almacenamiento de los tanques ( $C_T$ ) que eventualmente fuese necesario instalar para absorber el exceso de agua que no es posible evacuar a través de la red de alcantarillado. Esta función tiene un término fijo ( $C_{min}$ ) que recoge los costes fijos mínimos asociados a la obra y un término variable que depende del volumen total construido ( $V$ ):

$$F_2 = \sum_{j=1}^{N_T} C_T(V_{DR,j}) = \sum_{j=1}^{N_T} (C_{min} + C_{var} \cdot V_j^n) \quad (2)$$

3. Coste de rehabilitación de aquellas conducciones que bien por estar en malas condiciones interiores, bien por tener una capacidad de transporte insuficiente, fuese necesario

reemplazar. En este caso, a partir de datos reales procedentes de fabricantes se ha ajustado la función que relaciona el coste unitario de las conducciones con su diámetro:

$$F_3 = \sum_{k=1}^{N_C} C_C(D_{N,k}) \cdot L_k = \sum_{i=1}^{N_C} L_k \cdot (A \cdot D_k + B \cdot D_k^2) \quad (3)$$

### 2.3. Función objetivo

El objetivo de la rehabilitación debe ser el de minimizar los problemas asociados a las inundaciones con el mínimo coste de inversión. Por lo tanto, esta función objetivo estará compuesta a su vez de tres términos o funciones de coste:

La función objetivo debe minimizar los tres términos y para ello Navarro-Planas et al. (2016) proponen plantear dicha función objetivo mediante multiplicadores de Lagrange:

$$F.O. = \lambda_1 \sum_{i=1}^{N_N} C_I(y_i) + \lambda_2 \sum_{j=1}^{N_T} C_T(V_{DR,j}) + \lambda_3 \sum_{k=1}^{N_C} C_C(D_{N,k}) \cdot L_k \quad (4)$$

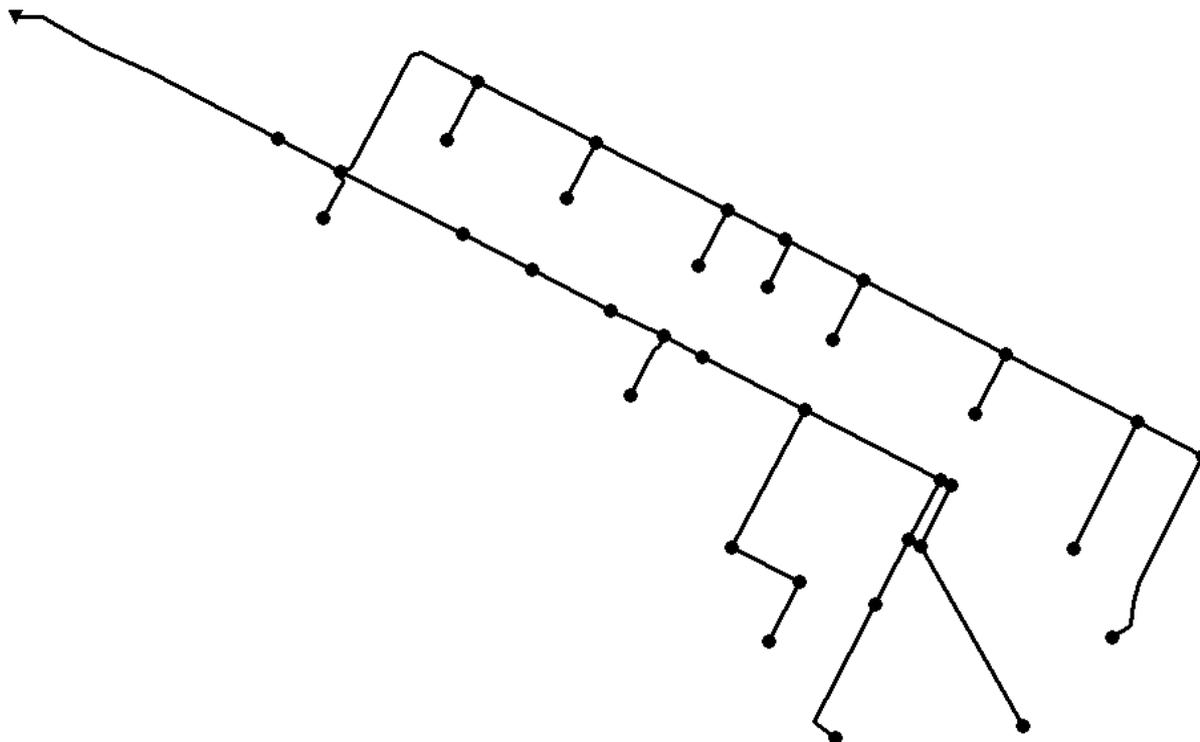
En la función objetivo, cada uno de los términos definidos va precedido de un multiplicador de Lagrange ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$ ). Estos multiplicadores permiten decidir qué sumandos de la función objetivo se considerarán en cada proyecto de rehabilitación. Además, permite asignar importancias relativas a cada término. Ha de tenerse en cuenta que se están sumando términos que se han de ejecutar (los costes de inversión asociados a la rehabilitación de conducciones e instalación de depósitos de retención,  $C_C$  y  $C_T$ ) con otros que incluyen el concepto de riesgo y probabilidad de ocurrencia, como es el caso de las inundaciones.

### 2.4. Análisis del espacio de soluciones

Los objetivos antes descritos se aplicarán a una versión simplificada del modelo de la red de alcantarillado del distrito de Chicó en Bogotá (Colombia). Este modelo simplificado, mostrado en la Figura 1, se compone de 35 conducciones y otros tantos nudos de conexión.

El problema de rehabilitación planteado inicialmente incluye la opción de rehabilitar cualquiera de las 35 conducciones y de instalar depósitos de retención en cualquiera de los 35 nudos. Disponemos por tanto de un total de 70 variables de decisión. A esto hay que añadirle la variabilidad de las mismas. En el caso de las conducciones, se dispone de 24 diámetros comerciales distintos, variando desde un mínimo desde 300 hasta 3000 mm. Además se ha incluido la posibilidad de no modificar el diámetro, lógico por otra parte si se trata de un problema de rehabilitación. Esto nos deja un total de 25 alternativas para cada uno de las 35 conducciones. Por su parte, la instalación de los depósitos de retención pasa por definir su volumen. El planteamiento realizado se ha basado en la definición que hace el programa SWMM del almacenamiento en estos elementos.

Figura 1: Esquema de la red de Chicó (Bogotá, Colombia) utilizada como caso de estudio.



Para SWMM, el volumen de almacenamiento se calcula a través del nivel alcanzado por el agua ( $z$ ) y la sección del propio depósito. Esta sección ( $S$ ) se puede hacer variar en función del nivel:

$$S = A * z^B + C \quad (5)$$

Los coeficientes A, B y C son parámetros de ajuste de la curva de almacenamiento. De cara a la obtención de alternativas, se decidió trabajar solo con el coeficiente A. Además, los algoritmos utilizados en distintas fases del proyecto fueron de tipo heurístico (algoritmos genéticos, evolución diferencial y algoritmo genético multiobjetivo). Esto obliga a discretizar las soluciones. Por ello, se utilizó un área máxima, función de la superficie disponible con mínima afectación urbana y se dividió en particiones. Como primera aproximación se tomaron 40 particiones. Esta división, junto con las alternativas previstas para el caso de las conducciones nos deja un problema cuyo espacio de soluciones (esto es, el número de posibles soluciones que se pueden alcanzar) es de:

$$ES = N_C^{ND} \cdot N_T^{Np} = 35^{25} \cdot 35^{40} = 2,3 \cdot 10^{100}$$

Con tal cantidad de soluciones posibles, la probabilidad de alcanzar soluciones viables es escasa. Además, se desea que estas soluciones, además de viables, presenten costes bajos o, lo que es lo mismo, valores mínimos de la función objetivo. Todas estas circunstancias obligan a reducir de alguna forma el tamaño del problema. Dentro de la metodología que se expone a continuación se proponen algunas modificaciones al planteamiento del mismo que reducen el tamaño y consiguen mejoras en los resultados obtenidos.

### 3. Metodología

Para resolver el problema asociado a minimizar la función objetivo presentada en la ecuación (4) se ha optado por un algoritmo pseudo-genético (PGA), el cual cambia la codificación

binaria tradicional por una codificación entera (Mora-Melià et al., 2013). La familia de los algoritmos evolutivos entre los cuales se incluyen los genéticos se basan en la evaluación de una cierta población de individuos los cuales representan distintas soluciones al problema. Al igual que sucede con las leyes de la selección natural descritas por Charles Darwin, de entre todos los individuos, aquellos mejor preparados (los que tienen mejores valores de la función objetivo) tendrán mayores probabilidades de supervivencia y de reproducción. Son por tanto algoritmos basados en el concepto de población y de generaciones. Esto hace que requieren de una intensidad de cálculo importante y, consecuentemente, precisan de grandes tiempos de simulación. Obviamente, cuanto mayor es la población, mayores será las probabilidades de encontrar buenas soluciones (Mora-Melià et al., 2016).

La metodología propuesta para la resolución del problema de rehabilitación de redes de alcantarillado se basa en las siguientes fases o etapas:

1. Elaboración de un modelo matemático fiable de la red de alcantarillado. Este modelo ha de servir para comprobar el efecto de las acciones realizadas sobre el funcionamiento de la red y para ello se partirá de un modelo realizado sobre la base del programa SWMM en el cual se modificarán distintos parámetros de la red (diámetros de conducciones y volumen de los depósitos) mediante la librería previamente desarrollada. Dicho modelo incluye las tormentas de diseño previamente obtenida teniendo en cuenta los efectos del cambio climático.
2. Definición de las variables de decisión. En este punto se han de fijar los potenciales puntos de la red en los que podría instalarse un depósito de retención, así como sus dimensiones máximas. Igualmente, se han de definir y definir los posibles conductos a ser rehabilitados y sustituidos por otros nuevos con mayor capacidad de transporte.
3. Definición de los parámetros de las distintas funciones de coste mostradas en las ecuaciones (1), (2) y (3). Estos parámetros deben ajustarse a la realidad de la red objeto de estudio.
4. Como se ha comentado, incluso una red pequeña como la empleada como caso de estudio puede representar un problema de grandes dimensiones. Por ello, una de las partes más importantes (y novedosas) de la metodología propuesta consiste en la realización de una localización inicial de los posibles elementos a incluir en la rehabilitación. Esta pre-localización afecta tanto a posibles ubicaciones de las estructuras de almacenamiento como a los conductos a rehabilitar. Durante esta fase, los resultados son más cualitativos que cuantitativos ya que se busca ante todo la velocidad para alcanzar soluciones fiables.
5. Por último, con las posibles ubicaciones ya fijadas, se llega a un problema con unas dimensiones notablemente inferiores lo que conduce bien a tamaños de población menores, bien a mayores probabilidades de obtener soluciones mejores. En esta última fase de la optimización el objetivo es dimensionar con la máxima precisión los elementos seleccionados. El resultado de dicha optimización se presenta como resultado final de diseño de la red.

Las tres primeras fases de la metodología ya fueron presentadas por los autores en ediciones previas de este congreso (Navarro-Planas et al., 2016) y se remite a dicha publicación para más detalles. A continuación, se presentan los detalles del proceso de reducción del tamaño del problema, ya particularizado para el caso de estudio.

#### **4. Caso de estudio**

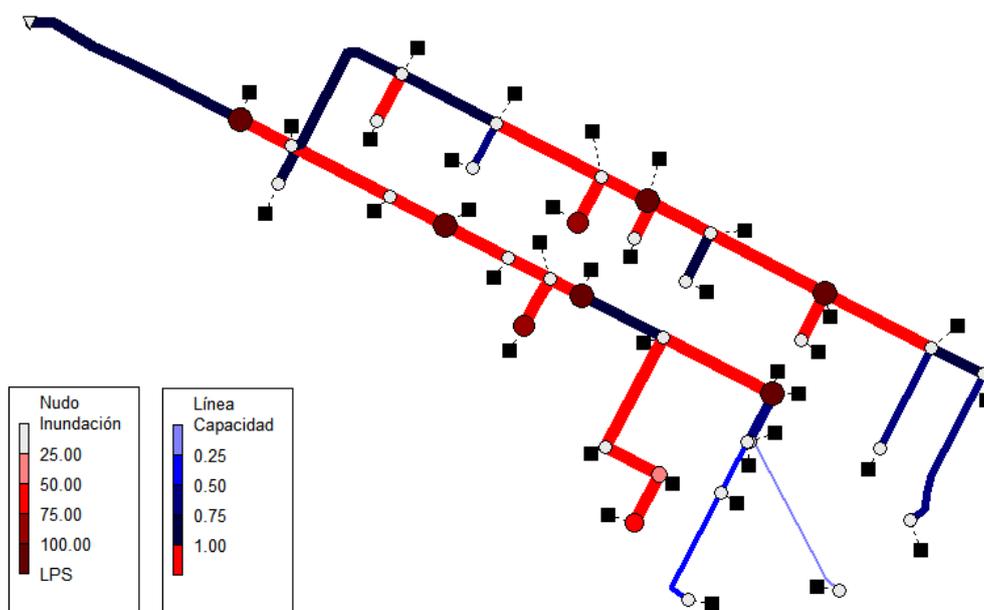
La metodología descrita en el apartado anterior se aplicará a la red simplificada de Chicó (Bogotá, Colombia), la cual se puede ver en la Figura 1. Esta red está dividida en 35

subcuencas (una por cada nudo de la red) y recoge las aguas pluviales de una cuenca de 51 ha. Todas las conducciones de la red son de geometría circular con diámetros que varía desde 300 a 1400 mm. La longitud total de la red está en torno a los 5000 m. Toda la red trabaja por gravedad debido principalmente a hallarse en las faldas de los cerros de los Andes. La diferencia de cotas entre el punto más elevado y el más bajo es de unos 40 m.

Por su parte, la tormenta de proyecto se calculó sobre la base de los Modelos Globales de Cambio Climático propuestos por Gulizia y Camilloni, (2015). Estos prevén un incremento de las precipitaciones para el horizonte 2050 en torno al 35% sobre el valor actual. El periodo de retorno empleado fue de 10 años y lña tormenta se determinó mediante el método de los bloques alternos.

Tras un análisis inicial de comportamiento de la red, los resultados obtenidos vaticinan un volumen de inundación total para dicha tormenta de 3835 m<sup>3</sup> (un 16% de la escorrentía total generada, 23690 m<sup>3</sup>). Esto implica que el 70% de los nudos presentan inundación en mayor o menor medida. Estos resultados son parcialmente compatibles con las observaciones realizadas en dicho distrito recientemente y se muestran en la Figura 2. En definitiva, la red se mostró insuficiente para hacer frente a posibles incrementos en el régimen de precipitaciones y se consideró adecuada para poner a prueba el método propuesto.

**Figura 2: Resultados iniciales obtenidos antes del proceso de rehabilitación.**



## 5. Resultados

Una vez detectados los posibles problemas, se procedió a buscar soluciones de rehabilitación empleando tres escenarios distintos:

1. Modificación de los diámetros de los conductos. Este escenario tiene 35 variables de decisión (las 35 conducciones de la red) cuyos diámetros se dejan como incógnitas.
2. Inclusión exclusivamente de tanques de retención, considerando 40 particiones sobre el área máxima previamente definida. Este escenario también tiene 35 variables de decisión,

correspondiente a los 35 nudos de la red en los que se puede instalar tanques de retención.

3. Estudio de rehabilitación completo, incluyendo tanto los 35 conductos como los 35 nudos. Este escenario representa un problema con 70m variables de decisión y un tamaño del espacio de soluciones de  $2,3 \cdot 10^{100}$ , tal y como se ha comentado anteriormente.

Tras estos escenarios iniciales, se planteó la estrategia de reducción del problema. Para ello, se realizaron las siguientes operaciones:

- Se realizaron simulaciones por separado de optimización de depósitos y de conductos.
  - Por una parte, partiendo del escenario 1, se realizaron simulaciones exclusivamente modificando diámetro. En el caso de los conductos se redujo la cantidad de diámetros con el fin de reducir el tamaño del problema y así obtener soluciones en un tiempo razonable y con tamaños de población reducidos. Se realizaron 100 simulaciones distintas con el algoritmo genético. Debido al tamaño del espacio de soluciones, manejar los 100 resultados se tradujo en que prácticamente todos los conductos cambiaban en alguna ocasión. Por ello, las 100 simulaciones se clasificaron en función del valor de sus respectivas funciones objetivo. Tras esta clasificación, se seleccionaron las 10 mejores soluciones y de ellas se seleccionaron como conductos candidatos aquellos que habían cambiado en alguna ocasión. De esta forma, se pasó de 35 a 15 conductos. Para comprobar el funcionamiento del método, se realizó un proceso similar sólo con las 5 mejores soluciones, quedando en esta ocasión 8 conductos.
  - Por otra parte, se realizó un proceso análogo con los depósitos de retención siguiendo las premisas del escenario 2, esto es, sin modificar ningún diámetro. En este caso y también para permitir la obtención de resultados en tiempo razonable se realizaron 10 particiones sobre la superficie total disponible para la construcción de los depósitos. Se realizaron 100 simulaciones sin modificar el diámetro de los conductos, se clasificaron en función del valor de la función objetivo y se seleccionaron las 10 mejores soluciones. De estas 10 soluciones, se seleccionaron exclusivamente aquellos nudos en cuya ubicación se proponía la instalación de tanques. Esto arrojó un total de 12 nudos. Para complementar esta selección se seleccionaron aquellos nudos donde el problema de inundación era significativo, quedando una selección final de 15 posibles ubicaciones.
  - Por último, como alternativa al escenario 3 se definieron dos nuevos escenarios resultantes de combinar los depósitos y los conductos obtenidos anteriormente. En estos dos nuevos escenarios se recuperó de nuevo el problema original, con 25 posibilidades para los diámetros y 40 particiones de la superficie para los depósitos. También para estos nuevos escenarios se realizaron 100 simulaciones de cada uno para observar la repetitividad de los resultados. Los escenarios 4 y 5 se describen a continuación:
4. Combinación de los 15 nudos seleccionados para la instalación de depósitos junto con los 15 conductos obtenidos de seleccionar las 10 mejores soluciones derivadas de sustituir solo diámetros. Esto supuso trabajar con 30 variables de decisión (15 nudos y 15 conductos).
  5. Combinación de los 15 nudos seleccionados para la instalación de depósitos junto con los 8 conductos obtenidos de seleccionar las 5 mejores soluciones derivadas de sustituir solo diámetros. Esto supuso trabajar con 23 variables de decisión (15 nudos y 8 conductos).

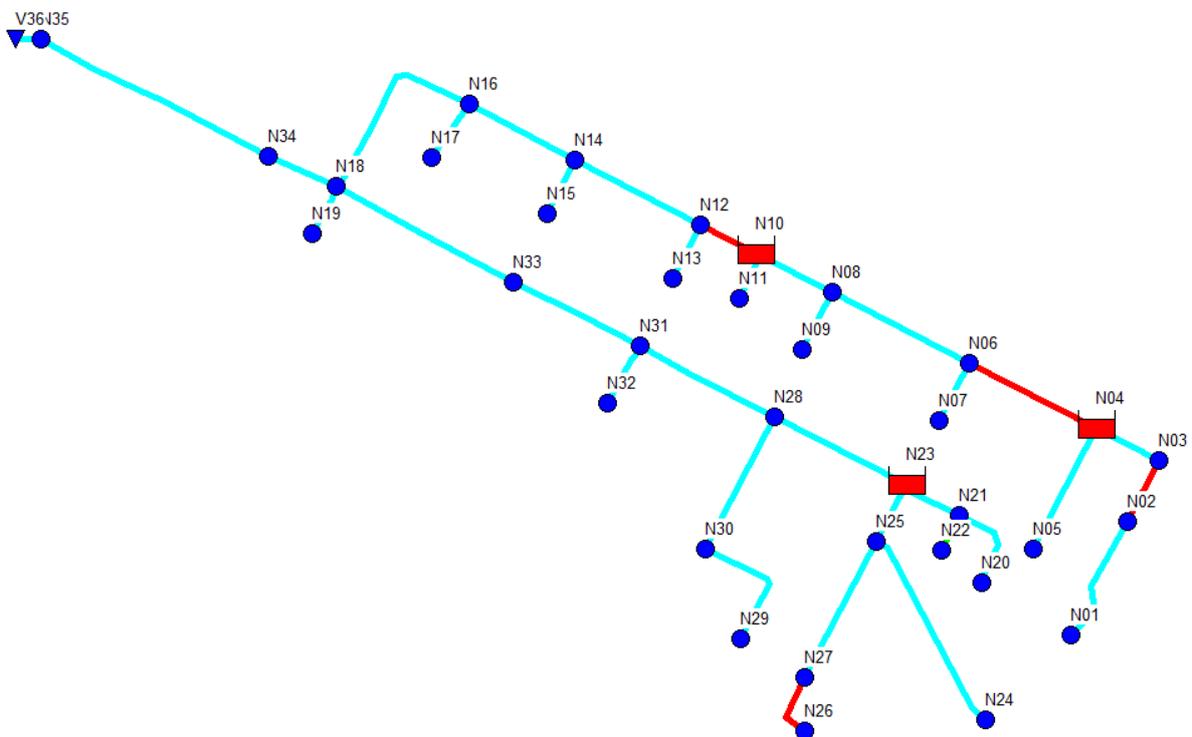
Los resultados obtenidos en los 5 escenarios se muestran en la tabla 1:

**Tabla 1: Resultados obtenidos para cada uno de los 5 escenarios realizados**

Escenario	Función Objetivo	Coste Inundación	Coste Depósitos	Coste Conductos	Tamaño del problema
1 (35C)	763164	7622	0	755542	$4,0 \cdot 10^{38}$
2 (35D)	273459	5392	268067	0	$5,8 \cdot 10^{61}$
3 (35C+ 35D)	254046	8363	237457	8226	$2,3 \cdot 10^{100}$
4 (15D + 15C)	245547	8353	213133	24061	$2,8 \cdot 10^{76}$
5 (15D + 8C)	218502	12701	186353	19448	$4,1 \cdot 10^{69}$

Tanto los resultados del escenario 4 como los del escenario 5 mejoran aquellos obtenidos sin simplificar el problema, a pesar de tener menos variables de decisión y por tanto menos opciones de mejora. Siguiendo esta misma observación, el escenario 5 (con 23 variables de decisión) obtuvo mejores resultados (tanto en mínimos absolutos como en valores medios de las soluciones) que los del resultado 4. En el escenario 4, de las 15 ubicaciones posibles sólo 4 se convierten finalmente en depósitos. De igual manera, de los 15 conductos a rehabilitar finalmente sólo 5 han de cambiar su diámetro. Resultados similares se obtienen para el escenario 5, con 3 depósitos y 4 conductos, si bien los costes asociados a la inundación resultan mayores. Aun así, a partir de la definición hecha para la función objetivo este último escenario arroja mejores resultados. La Figura 3 muestra los depósitos y conductos objeto de rehabilitación de acuerdo con los resultados del escenario 5.

**Figura 3: Resultados iniciales obtenidos antes del proceso de rehabilitación.**



## 6. Conclusiones

Se ha presentado una metodología para la rehabilitación de redes de alcantarillado enfocada a compensar los efectos del cambio climático. Para ello, se ha partido de resultados previos y se han mejorado los resultados obtenidos mediante la reducción del tamaño del problema.

Así se ha partido de un problema de orden  $10^{100}$  y finalmente se ha resuelto un problema de orden  $10^{69}$  con mejores resultados (ver tabla 1). De estos resultados obtenidos en el estudio presentado es posible extraer las siguientes conclusiones:

- Se ha presentado un método eficaz para reducir el tamaño del problema de rehabilitación de redes de alcantarillado mediante la pre-localización de las ubicaciones donde se han de acometer actuaciones. En este caso las actuaciones consistían en la instalación de tanques de retención y rehabilitación de conductos.
- El número de variables de decisión se ha reducido considerablemente con respecto al número de variables de decisión iniciales, pasando de 70 a 30 y 23 en los escenarios 4 y 5, respectivamente. Esta reducción en el número de variables de decisión no ha perjudicado al objetivo del problema. Es más, al reducir el espacio de soluciones ha resultado más sencillo encontrar buenas soluciones.
- De igual forma, los tiempos de simulación también se han reducido con respecto a los medidos para los escenarios en los que no ha habido pre-localización de las actuaciones. Esto se ha debido no sólo a la reducción del tamaño del problema, sino también al efecto que la reducción del número de variables de decisión tiene sobre parámetros del algoritmo tales como el tamaño de población o los criterios de terminación del mismo.
- A pesar de la limitación en el espacio de soluciones, los resultados obtenidos en los escenarios con reducción del tamaño del problema son mejores que los obtenidos al resolver el problema completo. Se constata que si el problema se reduce con criterios objetivos basados en resultados previos, las soluciones mejoran. Por el contrario, si el problema se reduce de forma indiscriminada (como sucede con los escenarios 1 y 2 frente al escenario 3) los resultados no mejoran al dejar fuera variables de decisión que a la postre pueden resultar determinantes.
- Los resultados obtenidos no eliminan la inundación, simplemente reducen su impacto económico. Esto se debe al uso de una función de costes para los daños provocados por ésta. El uso de las funciones de coste permite convertir la inundación en un parámetro del problema y no en una restricción. Esto da la posibilidad de dejar en manos del gestor la decisión final y abre nuevas vías de desarrollo, como puede ser el uso de algoritmos multi-objetivo cuya solución no sea un valor, sino un conjunto de valores que relacionen por ejemplo costes de inversión (de ejecución efectiva) con daños asociados (sujetos a funciones estadísticas de probabilidad de precipitación).

Como conclusión final podemos afirmar que los resultados obtenidos con esta metodología son esperanzadores. Futuros desarrollos han de permitir mejorar aspectos como la eficiencia del algoritmo, esto es, la repetitividad de los resultados ante un número elevado de simulaciones. Por otra parte, en la función objetivo empleada se han mezclado costes reales con costes futuribles asociados a un evento de inundación. De ahí que otro campo de desarrollo futuro debe ser el empleo de algoritmos multi-objetivo que separen y a su vez relacionen ambos tipos de costes.

## 7. Referencias bibliográficas

- Abraham, D. M., Wirahadikusumah, R., Short, T. J., & Shahbahrami, S. (1998). Optimization Modeling for Sewer Network Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(5), 402–410. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1998\)124:5\(402\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:5(402))
- Gulizia, C., & Camilloni, I. (2015). Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. *International Journal of Climatology*, 35(4), 583–595. <http://doi.org/10.1002/joc.4005>

- Kirshen, P., Caputo, L., Vogel, R. M., Mathisen, P., Rosner, A., & Renaud, T. (2015). Adapting Urban Infrastructure to Climate Change: A Drainage Case Study. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(4), 4014064. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000443](http://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000443)
- Mailhot, A., & Duchesne, S. (2010). Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 201–208. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000023](http://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000023)
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., Saldarriaga, J. G., & Vallejo, D. (2016). Creation of an SWMM Toolkit for Its Application in Urban Drainage Networks Optimization. *Water*, 8(6), 1–16. <http://doi.org/10.3390/w8060259>
- Mays, L. W., & Yen, B. C. (1975). Optimal Cost Design of Branched Sewer Systems. *Water Resources Research*, 11(February), 37–47.
- Meredith, D. D. (1971). Ch9. Dynamic programming concepts and applications. In *Treatise on urban water systems* (pp. 599–652). Fort Collins, CO: Colorado State University.
- Moeini, R., & Afshar, M. H. (2012). Constrained Ant Colony Optimisation Algorithm for the layout and size optimisation of sanitary sewer networks. *Urban Water Journal*, (January 2015), 1–20. <http://doi.org/10.1080/1573062X.2012.716445>
- Mora-Melià, D., Gutiérrez-Bahamondes, J. H., Iglesias-Rey, P. L., & Martínez-Solano, F. J. (2016). Efficiency criteria as a solution to the uncertainty in the choice of population size in population-based algorithms applied to water Network optimization. *Water (Switzerland)*, 8(12). <http://doi.org/10.3390/w8120583>
- Mora-Melia, D., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Fuertes-Miquel, V. S. (2013). Design of Water Distribution Networks using a Pseudo-Genetic Algorithm and Sensitivity of Genetic Operators. *Water Resources Management*, 27(12), 4149–4162. <http://doi.org/10.1007/s11269-013-0400-6>
- Navarro-Planas, V. R., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Saldarriaga Valderrama, J. G. (2016). Pseudo-genetic optimization model applied to urban storm water rehabilitation projects. In AEIPRO (Ed.), *20th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 495–507). Cartagena (España).
- Ngamaliu, U., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Saldarriaga, J. (2017). Rehabilitaciin de redes de drenaje mediante la combinaci3n de tanques de retenciin y sustituci3n de conducciones (Rehabilitation of Drainage Networks Through the Combination of Retention Tanks and Replacement of Pipelines). *SSRN Electronic Journal*, (86111). <http://doi.org/10.2139/ssrn.3113706>
- Reyna, S. M., Vanegas, J. A., & Khan, A. H. (1994). Construction Technologies for Sewer Rehabilitation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(3), 467–487. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:3\(467\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:3(467))
- Rossman, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual*. Cincinnati, OH. Retrieved from <http://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Rossman, L. A., & Huber, W. C. (2015). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology* (Vol. I). Cincinnati, OH. Retrieved from <http://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Sánchez-Beltrán, H., Rodríguez, C. D. M., Triviño, J. C. B., Iglesias-Rey, P. L., Valderrama, J. S., & Martínez-Solano, F. J. (2017). Characterization of Modular Deposits for Urban Drainage Networks Using CFD Techniques. In *Procedia Engineering* (Vol. 186).

<http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.212>

Yazdi, J., Sadollah, A., Lee, E. H., Yoo, D. G., & Kim, J. H. (2015). Application of multi-objective evolutionary algorithms for the rehabilitation of storm sewer pipe networks. *Journal of Flood Risk Management*.