



Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes



Excmo. Ayuntamiento de Orihuela



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



© los autores, 2020
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-091-4

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

METODOLOGÍA DE REHABILITACIÓN DE REDES DE DRENAJE MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL HIDRÁULICO

Leonardo Bayas-Jiménez

leobaji@posgrado.upv.es

<https://orcid.org/0000-0001-8957-7604>

F. Javier Martínez-Solano

jmsolano@upv.es

<https://orcid.org/0000-0002-8140-5960>

Pedro L. Iglesias-Rey

piglesia@upv.es

<https://orcid.org/0000-0001-8300-3255>

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, España

RESUMEN

Un problema que preocupa a los gestores de los sistemas de drenaje es el incremento de eventos de lluvias extremas que cada vez se manifiestan con mayor frecuencia en diferentes lugares del mundo. Su ocurrencia produce sobrecarga hidráulica en el sistema de drenaje y en consecuencia inundaciones. Adaptar la infraestructura existente para que pueda soportar lluvias extremas sin generar consecuencias para sus habitantes se ha convertido en una necesidad para las ciudades. Este documento muestra una nueva forma de rehabilitar los sistemas de drenaje, utilizando para este objetivo una novedosa metodología que considera la inclusión de elementos de control hidráulico en la red, la instalación de tanques de tormenta en línea y la sustitución de tuberías. El análisis hidráulico de la red se realiza mediante el modelo Storm Water Management Model (SWMM) y para el proceso de optimización se usa con un algoritmo genético llamado Algoritmo Pseudo Genético. La inclusión de controles hidráulicos en la rehabilitación de redes de drenaje puede ser una alternativa para mejorar los niveles de inundación y a minimizar el tamaño de las estructuras de protección necesarias.

1. INTRODUCCIÓN

La acción antropológica ha alterado la composición de la atmosfera mundial, una de las más evidentes es el desarrollo del espacio urbano. Durante las últimas décadas las ciudades han experimentado un proceso constante de crecimiento, que ha reducido las áreas verdes que las rodeaban, cambiándolas por superficies altamente impermeables. Estos factores han derivado en que muchas ciudades aprecien el incremento de lluvias extremas e inundaciones. La intervención efectiva en estas redes es importante para que sean capaces de dar seguridad a las ciudades y evitar pérdidas económicas y de vidas.

El uso de tanques de tormenta en un entorno urbano para disminuir el riesgo de inundaciones ha sido estudiado y comprobado como uno de los más eficientes métodos para reducir la escorrentía superficial (Andrés-Doménech et al., 2012; ver también Cunha et al., 2016; Kessler & Diskin, 1991;

Todeschini et al., 2012; Woods et al., 2007; Wang, Sun, & Sweetapple, 2017).

Para solucionar problemas de optimización en redes de drenaje, los enfoques heurísticos han demostrado ser una herramienta útil y poderosa. Muchas investigaciones se han realizado con la ayuda de este procedimiento. Se puede citar el trabajo de Iglesias-Rey et al., (2017) quienes proponen una metodología para rehabilitación de redes de drenaje optimizando el coste de instalación de tanques de tormenta, coste del cambio de tuberías y los costes asociados a la inundación. Utilizando un algoritmo genético. Dentro de la metodología propuesta, se han definido dos formas diferentes de representar el coste de los daños de inundación: ya sea proporcional al volumen de inundación en cada nodo, o proporcional al nivel de inundación. Más adelante, Ngamalieu-Nengoue, Martínez-Solano, et al. (2019) presentan una metodología de optimización de redes de drenaje utilizando un algoritmo genético multiobjetivo. Este trabajo recalca la importancia de mejorar el esfuerzo computacional en el proceso de optimización.

Investigaciones recientes muestran la importancia de almacenar temporalmente el agua en la red de drenaje como una alternativa para disminuir las inundaciones. Cabe citar el trabajo de Dziopak (2018) quien propone como una alternativa a la instalación de depósitos más económica, utilizar la red de alcantarillado como una unidad de almacenamiento aprovechando todos sus componentes para almacenar temporalmente el agua, para esto diseña un canal de retención con particiones interiores en forma de cámaras con una apertura en el fondo del canal, transformando la red en un canal de retención. Por otro lado, Leitão et al. (2018) presentaron un modelo que utiliza un algoritmo para la ubicación de limitadores de flujo en la red de drenaje, con el objetivo de maximizar el almacenamiento dentro de la red, el modelo también considera el impacto potencial de fallo del dispositivo de control de flujo. Concluyen que la capacidad de almacenamiento en las redes puede ser considerable. Mencionan que, si los dispositivos locales de control de flujo son instalados correctamente, el volumen de agua puede movilizarse y convertirse en una solución interesante para mitigar las inundaciones.

Más adelante, Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, Mora-Meliá, et al. (2019) en su investigación concluyen que la acción combinada de instalar tanques de tormenta y la renovación de tuberías es mucho más efectiva que la intervención por separado de estas dos técnicas. En los resultados de su estudio en el que usan un algoritmo pseudo genético; obtienen en ciertas tuberías un diámetro optimizado menor al original; Por lo que señalan la necesidad de incluir una compuerta u orificio como control hidráulico para introducir una pérdida de carga en el sistema. Estos resultados determinan que los controles hidráulicos se presentan como una técnica para mejorar la eficiencia del sistema al permitir la acumulación de agua en ciertos puntos de la red, lo que disminuye el tiempo de concentración aguas abajo y, por lo tanto, las inundaciones.

Para dar continuidad a esta línea de investigación, la metodología propuesta en este trabajo incluye el uso del control hidráulico en la optimización de redes de drenaje. El objetivo de este estudio es reducir el coste de la rehabilitación y dotar de mayor seguridad a las ciudades en escenarios de lluvias extremas. Con este objetivo la metodología analiza la red utilizando el modelo Storm Water Management Model (Rossman, 2009) conectado mediante una librería de funciones denominada SWMM Toolkit (Martínez-Solano et al., 2016) a un Algoritmo Pseudo Genético (Mora-Meliá et al., 2013) para encontrar las mejores soluciones al problema de optimización. Las soluciones encontradas se analizan términos de costes mediante la evaluación de una función objetivo previamente definida. Como caso de estudio, esta metodología se aplica en un sector de la red de drenaje de la ciudad de Bogotá.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo tiene como finalidad presentar una metodología para la rehabilitación de redes de drenaje, que contemple el uso de controles hidráulicos como un elemento que ayude a reducir el nivel de las inundaciones. El control hidráulico instalado en ciertos puntos de la red genera una pérdida de carga que ralentiza el flujo de agua evitando su acumulación aguas abajo y la sobrecarga del sistema que puede provocar una inundación. Esta metodología considera también la instalación de tanques de tormenta en línea y la renovación de tuberías, debido a que su uso combinado ha sido demostrado como una alternativa efectiva para el control de inundaciones.

La metodología consiste en realizar el análisis hidráulico de la red mediante el modelo SWMM y con la ayuda de un Algoritmo Genético evaluar las soluciones obtenidas para encontrar la mejor solución que permita robustecer el sistema frente a eventos de lluvia extrema.

Planteado así el problema se contemplan las siguientes asunciones iniciales:

1. La tormenta de diseño contempla el escenario más desfavorable, se considera estática y para toda la red.
2. El modelo de escorrentía para el análisis de la red debe ser previamente definido.
3. El modelo de simulación matemática SWMM se utiliza como instrumento de análisis de la red. Se utiliza el análisis de onda dinámica que considera las ecuaciones completas de Saint-Venant. Este análisis es considerado debido a que es el que mejor representa al flujo presurizado que puede ocurrir cuando la capacidad de transporte en la red es insuficiente
4. El modelo matemático de la red debe ser calibrado y simplificado. Sin que esto signifique una pérdida de veracidad en los resultados.
5. Las acciones que se tomaran son la renovación de tuberías con otras de mayor diámetro, la instalación de tanques de tormenta y la instalación de controles hidráulicos.
6. Los ST se consideran instalados en línea y la profundidad es la misma que la del pozo de revisión existente.
7. El problema de optimización se analiza en términos de costes. (Iglesias-Rey et al., 2017) La función de coste debe ser establecida en función de las variables hidráulicas y contempla el coste de renovación de tuberías, el coste de instalación de ST y el coste de daños provocados por las inundaciones.

2.1. Variables de decisión

El problema de optimización de una red de drenaje considera tres tipos de variables de decisión. Se tiene, por un lado, el diámetro de las tuberías, el modelo de optimización busca la mejor combinación de diámetros de la red para minimizar las inundaciones. Esta variable de decisión puede variar desde un valor 0 que muestra que no es necesario reemplaza la tubería hasta un valor máximo establecido. El valor 0 implica que la capacidad de la tubería es suficiente para transportar el caudal analizado mientras que un valor diferente nos indica la necesidad de aumentar la capacidad de la tubería.

Otro tipo de variables de decisión es la capacidad de almacenamiento de los nodos. El modelo de optimización busca la mejor ubicación de los ST en la red y el menor volumen de estos para reducir las inundaciones. Al plantearse el problema en un entorno urbano se limita la excavación a la profundidad actual de los pozos de visita, definiendo como variable de decisión la sección transversal del tanque de tormenta. Los valores que puede tomar esta variable de decisión van de 0 que significa que no se requiere ST en el nodo hasta un valor máximo previamente definido en función del espacio disponible. Se debe tomar en cuenta que esta variable de decisión para ser utilizada por el modelo de optimización debe ser discretizada. Sobre este tema se puede consultar de forma más detallada en (Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, Mora-Meliá, et al., 2019). El último grupo de variables de decisión es el que corresponde al coeficiente de pérdida local introducidos en ciertas

tuberías de la red. Una pérdida de carga local es causada por un cambio rápido en magnitud o dirección de la velocidad, que pueden aparecer en curvas, contracciones o ampliaciones en la geometría de la tubería. En este trabajo, la pérdida de carga es producida por una válvula de compuerta con diferentes grados de apertura que actúa como elemento de control hidráulico. Esta variable de decisión puede tomar valores desde 0 que nos indica que no se requiere control hidráulico hasta un valor máximo de cierre de la compuerta previamente definido.

2.2. Funciones de Coste

Es necesario definir funciones de coste para cada grupo de elementos que van a intervenir en el proceso de optimización de una red de drenaje que se pretende rehabilitar.

En este trabajo se presentan las funciones de coste definidas por Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, Mora-Meliá, et al. (2019) y se ha elaborado una función de coste de instalación de elementos de control hidráulico en la red. Estas funciones se detallan a continuación:

1. Coste de rehabilitación de aquellas tuberías que deban ser reemplazadas por falta de capacidad. Esta función se establece a partir de datos reales de costes proporcionados fabricantes de tuberías. Se ha ajustado la función que relaciona el coste unitario de las conducciones con su diámetro.

$$C_D(D_i) = \alpha D_i + \beta D_i^2 \quad (1)$$

En la Ecuación 1, D_i es el diámetro de la tubería, y los coeficientes α y β son coeficientes de ajuste específicos para cada proyecto.

2. Coste de instalación tanques de tormenta que se requerirían para almacenar temporalmente el agua que no la red no sea capaz de desalojar en un evento de lluvia extrema.

$$C_V(V_i) = C_{min} + C_{var} V_i^w \quad (2)$$

El primer término de la Ecuación 2 representa un coste mínimo establecido para el ST mientras que el segundo término es variable en función del volumen de almacenamiento (V_i) requerido afectado por una constante C_{var} y un exponente w .

3. El coste de la instalación de elementos de control hidráulico a la salida de ciertos tanques de tormenta se establece a partir de datos de costes reales de válvulas de compuerta.

$$C_v(D_i) = \gamma D_i - \mu D_i^2 \quad (3)$$

En la Ecuación 3, D_i es el diámetro de la tubería, γ y μ son coeficientes de ajuste específicos para cada proyecto.

5. Coste de los daños provocados por las inundaciones, esta función depende del nivel alcanzado por el agua (y_i). La Ecuación 4 se determina mediante una curva de vulnerabilidad que establece el porcentaje de daños en función del nivel de agua alcanzado. Los autores cruzaron esta curva con los costes de la inundación por metro cuadrado para diferentes usos de suelo. En la ecuación 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})

6.

$$C_y(y_i) = C_{max} \left(1 - e^{-\lambda \frac{y_i}{y_{max}}} \right)^r \quad (4)$$

2.3. Función Objetivo

El problema de optimización se enfoca en minimizar los problemas asociados a las inundaciones con el mínimo coste de inversión. Por lo tanto, esta función objetivo estará compuesta las cuatro funciones de coste que contempla esta metodología. La función objetivo es evaluada para cada solución

encontrada por el modelo de optimización para seleccionar la que menores coste requiera para robustecer la red en eventos de lluvias extremas. En la función objetivo, cada una de las funciones de coste va precedido de un multiplicador de Lagrange (τ_1 , τ_2 , τ_3 y τ_4). 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 de acuerdo con las características propias del proyecto de rehabilitación analizado.

$$F = \tau_1 \sum_{i=1}^{n=m_s} C_D(D_i) + \tau_2 \sum_{i=1}^{n=n_s} C_V(V_i) + \tau_3 \sum_{i=1}^{n=p_s} C_v(D_i) + \tau_4 \sum_{i=1}^{n=N_N} C_y(y_i) \quad (5)$$

En la Ecuación 5, m_s representa el número de conductos que deben ser reemplazados, n_s el número de nodos donde se requiere instalar un tanque de tormenta, p_s el número de conductos donde se requiere instalar un elemento de control hidráulico y N_N los nodos de la red.

3. CASO DE ESTUDIO

La metodología se aplicó a un sector de la red de drenaje de la ciudad de Bogotá, Colombia (Figura 1). Esta red llamada E-Chico se compone de 35 subcuencas hidrológicas que ocupan una superficie de 51 hectáreas, 35 conductos y 35 nodos de conexión. Los conductos son de sección circular con diámetros que varían desde 300 mm a 1400 mm. Y cubren una longitud de 5000 metros aproximadamente. La red funciona completamente a gravedad con un desnivel entre el punto más alto y el punto más alto de 39 metros.

Para el análisis se utilizó una tormenta de diseño basada en una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (Figura 2) definida previamente por Ngamalieu-Nengoue et al. (2019) calculada mediante el método de bloques alternos con intervalos de 5 minutos. La tormenta de diseño se diseñó bajo un escenario de cambio climático (Gulizia & Camilloni, 2015).

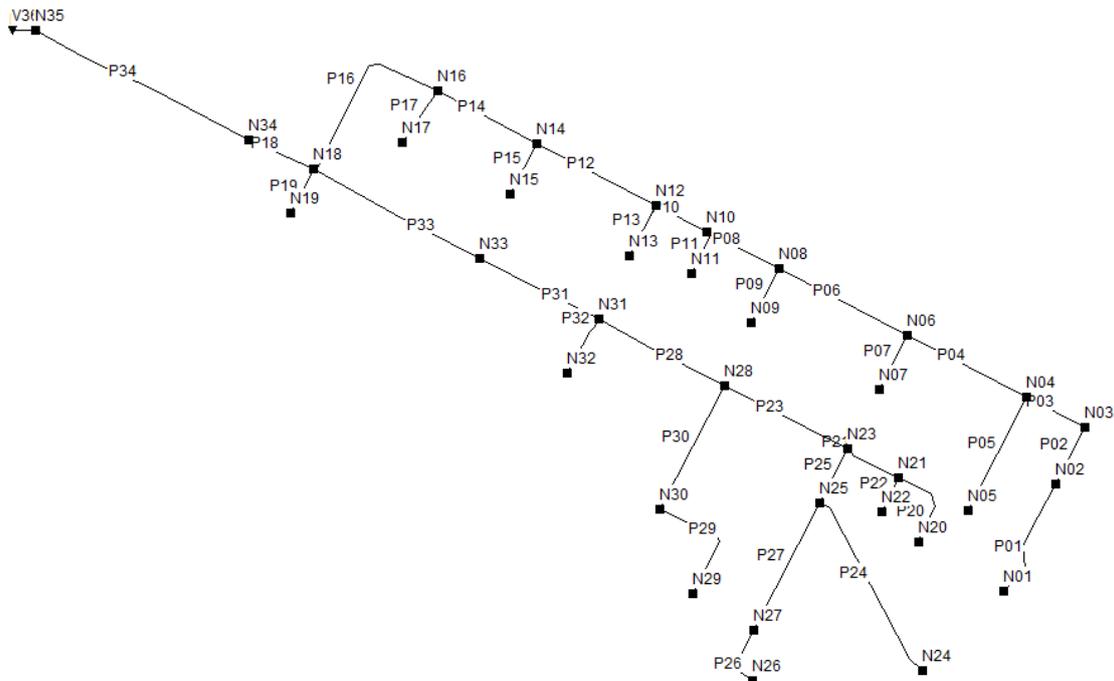


Figura 1. Red de drenaje E-chico, Bogotá. Fuente: elaboración propia.

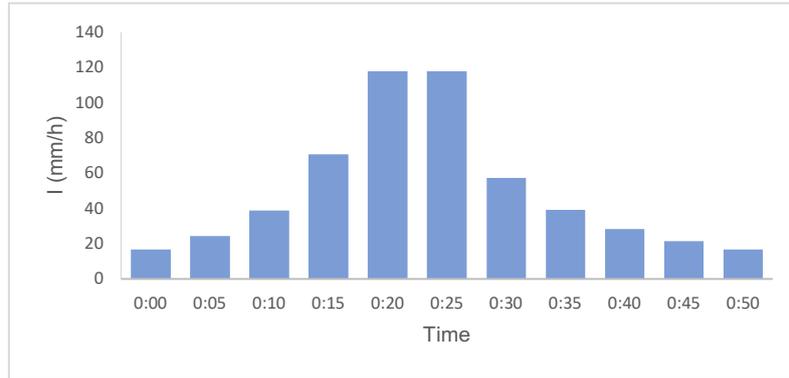


Figura 2. Lluvia de diseño. Fuente: elaboración propia.

La función de coste de reemplazo de tuberías se ha obtenido en base a los precios reales de tuberías en Colombia los coeficientes α y β de la ecuación se establece con los siguientes valores $\alpha = 40,69$ y $\beta = 208,06$.

Por lo tanto, la función queda definida por la Ecuación 6.

$$C_D(D_i) = 40,69 D_i + 208,06 D_i^2 \quad (6)$$

La función de coste de instalación de los tanques de tormenta se determina en función del coste de materiales y el coste de construcción en el lugar del caso de estudio. De acuerdo con esto la función

se define mediante la Ecuación 7.

$$C_V(V_i) = 16.923 + 318,4 V_i^{0,65} \quad (7)$$

Para este trabajo se ha desarrollado una función de coste para la instalación de elementos de control hidráulico en base al coste real de válvulas de compuerta de diferentes diámetros en Colombia. Se establecen los siguientes valores $\gamma = 4,1737$ y $\mu = -0,00041$.

La función queda definida por la Ecuación 8.

$$C_v(D_i) = 4,1737 D_i - 0,000211 D_i^2 \quad (8)$$

La función de coste de daños ha sido definida previamente por Ngamaliou-Nengoue, Iglesias-Rey y Martínez-Solano (2019) en esta función se considera como nivel máximo de inundación 1.40 m. Los autores establecen los siguientes valores $\lambda = 4.89$ $r = 2$.

Con esto la función queda definida por la Ecuación 9.

$$C_y(y_i) = 1.268 \left(1 - e^{-4,89 \frac{y_i}{1,4}} \right)^2 \quad (9)$$

Como primer paso en el proceso de optimización, es necesario conocer el estado actual del drenaje red. El análisis hidráulico en el modelo SWMM entrega los resultados que se muestran en la Tabla 1. Estos los resultados muestran que la red no ofrece las garantías de operación para brindar seguridad a la ciudad; por lo tanto, debe ser rehabilitado.

Nodo	Volumen de inundación (m ³)	Área de Inundación (m ²)	Altura de inundación (m)	Coste (€)
N02	123.56	1240	0.1	135,857.00 €
N04	132.56	930	0.413	181,375.00 €
N06	501.79	1890	0.265	875,502.00 €
N07	23.95	1250	0.019	6,644.00 €
N09	1.82	1130	0.002	45.00 €
N10	385.12	700	0.55	646,838.00 €
N11	25.83	820	0.032	11,288.00 €
N23	949.54	450	2.11	569,922.00 €
N32	36.65	1500	0.024	12,727.00 €
N33	469.82	3030	0.155	671,908.00 €
N34	1181.87	3270	0.361	2,131,929.00 €
Total				5,244,035.00 €

Tabla 1. Estado actual y coste de los daños por inundación. Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

En trabajos de investigación previos (Ngamaliu-Nengoue et al., 2019) la optimización de la red de drenaje E-Chico fue realizada contemplando la posibilidad de instalación de tanques de tormenta y el reemplazo de tuberías. Los autores consideraron 5 diferentes escenarios para buscar la mejor solución. EL escenario 5 ofrece los mejores resultados considerando la instalación de 3 tanques de tormenta y la renovación de 3 tuberías. Para esta solución, la función objetivo toma un valor de 213,981 € (Tabla 2).

En este trabajo se han realizado series de 50 simulaciones realizadas con diferentes combinaciones de parámetros. La Figura 3 representa los resultados de la mejor solución encontrada. La solución requiere de la instalación de tanques de tormenta en los nodos N04, N10, N223. La renovación de la tubería P02 y la instalación de elementos de control hidráulico en las tuberías P04 y P10. El valor que toma la función objetivo en esta solución es de 203,859.69 € con un valor del coste instalación de tanques de tormenta de 181,540.69 € el coste de la renovación de tuberías de 6,583.81 € el coste de la instalación de controles hidráulicos de 7,671.75 € y el coste asociado a las inundaciones de 8,063.44 €. Para mostrar las ventajas de la metodología la Tabla 2 muestra los resultados obtenidos por Ngamaliu-Nengoue et al. (2019)

y los resultados de la metodología propuesta. Se puede apreciar que además de reducir el coste de inversión en todos los elementos necesarios para mejorar la red, la inclusión de control hidráulico reduce el coste de daños por inundación en la red por lo que se demuestra la conveniencia de incluir este tipo de elementos en los modelos de optimización de redes.

Metodología	Función Objetivo	Términos de la Función Objetivo			
		Coste de Inundación	Coste de Tanques de Tormenta	Coste de Tuberías	Coste de Control Hidráulico
Ngamaliou-Nengoue et al. (2019b)	213,981.00 €	12,701.00 €	186,353.00 €	14,927.00 €	-
Propuesta	203,859.69 €	8,063.44 €	181,540.69 €	6,583.81 €	7,671.75 €

Tabla 2. Resultados del proceso de optimización. Fuente: elaboración propia.

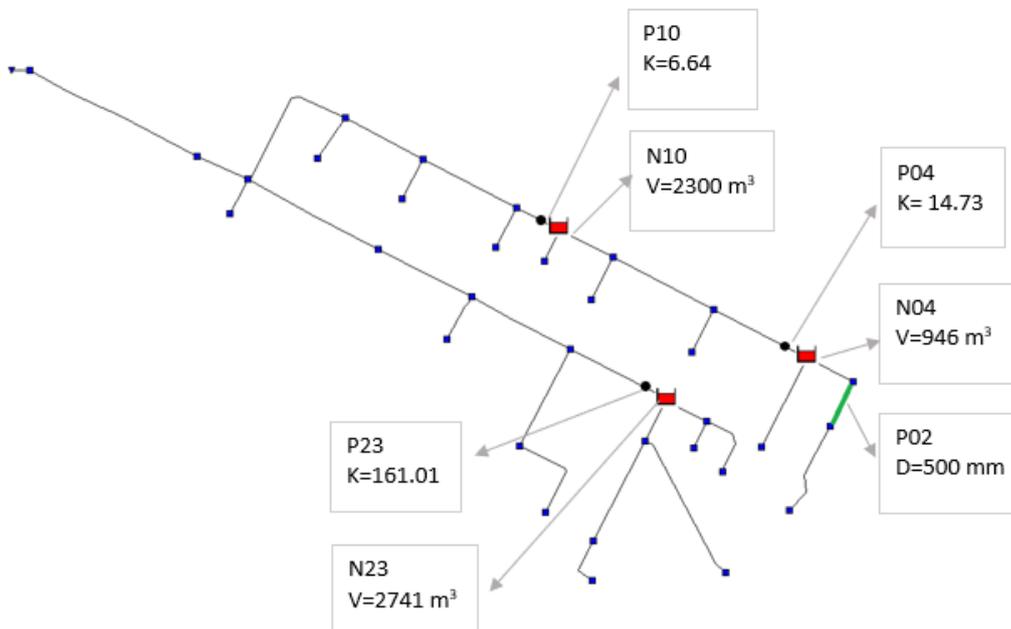


Figura 3. Representación de los tanques de reserva, cambio de tuberías y elementos de control hidráulico en la red E-Chico de acuerdo con el resultado de la metodología aplicada. Fuente: elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

Después de presentar la metodología y aplicarla a un caso de estudio específico se pueden hacer las siguientes conclusiones: el uso combinado de sustitución de tuberías por otras de mayor diámetro y la instalación de tanques de tormenta y la inclusión de controles hidráulicos es un método apropiado para optimizar las redes de drenaje que requieren rehabilitación; además, el uso de algoritmos genéticos demuestra ser una herramienta válidos para este tipo de análisis.

Así, la principal conclusión de este trabajo es que el uso de HC disminuye significativamente el coste de intervención en la red de drenaje porque retiene el agua aguas arriba usando el volumen de la red para almacenar momentáneamente el agua, haciendo que el sistema sea más eficiente y evitando acumulación aguas abajo, evitando inundaciones.

En resumen, este estudio muestra que la inclusión de elementos de control hidráulico mejora la eficiencia de la rehabilitación modelo de redes de drenaje.

REFERENCIAS

- Andrés-Doménech, I., Montanari, A. & Marco, J. B. (2012). 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)
- 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 and Software*, 83, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.015>
- Dziopak, J. (2018). A wastewater retention canal as a sewage network and accumulation reservoir. In: D. Słyś & J. Dziopk (Eds.), *E3S Web of Conferences*, vol. 45, p. 16. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500016>
- 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. <https://doi.org/10.1002/joc.4005>
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Saldarriaga, J. G. & Navarro-Planas, V. R. (2017). Pseudo-genetic Model Optimization for Rehabilitation of Urban Storm-water Drainage Networks. *Procedia Engineering*, 186, 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.278>
- Kessler, A. & Diskin, M. H. (1991). The efficiency function of detention reservoirs in urban drainage systems. *Water Resources Research*, 27(3), 253–258. <https://doi.org/10.1029/90WR02143>
- Leitão, J. P., Carbajal, J. P., Rieckermann, J., Simões, N. E., Sá Marques, A. & de Sousa, L. M. (2018). Identifying the best locations to install flow control devices in sewer networks to enable in-sewer storage. *Journal of Hydrology*, 556(3), 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.020>
- 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 (Switzerland)*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/w8060259>
- Mora-Meliá, 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. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0400-6>
- Ngamalieu-Nengoué, U. A., Iglesias-Rey, P. L. & Martínez-Solano, F. J. (2019). Urban Drainage Networks Rehabilitation Using Multi-Objective Model and Search Space Reduction Methodology. *Infrastructures*, 4(2), 35. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4020035>
- Ngamalieu-Nengoué, U. A., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Mora-Meliá, D. & Valderrama, J. G. S. (2019). Urban drainage network rehabilitation considering storm tank installation and pipe substitution. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030515>
- Ngamalieu-Nengoué, U. A., Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L. & Mora-Meliá, D. (2019). Multi-objective optimization for urban drainage or sewer networks rehabilitation through pipes substitution and storage tanks installation. *Water (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11050935>
- Rossman, L. A. (2009). Storm water management model (SWMM) user's manual version 5.0. *Cincinnati, OH*, 45268.
- Todeschini, S., Papiri, S. & Ciaponi, C. (2012). Performance of stormwater detention tanks for urban drainage systems in northern Italy. *Journal of Environmental Management*, 101, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.003>
- Wang, M., Sun, Y. & Sweetapple, C. (2017). Optimization of storage tank locations in an urban stormwater drainage system using a two-stage approach. *Journal of Environmental Management*, 204, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.024>
- Woods, B. B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. & Shaffer, P. (2007). The SUDS manual (C697). *CIRIA, London*, 600.