



OPTIMIZACIÓN DE REDES DE ALCANTARILLADO: COSTOS MÍNIMOS Y CONFIABILIDAD MÁXIMA

Juana Herrán¹, Juan Saldarriaga²

¹Profesional de investigación, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

²Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes,
Bogotá, Colombia.

¹*jm.herran10@uniandes.edu.co*

RESUMEN

El presente trabajo busca desarrollar una metodología de optimización multiobjetivo para el diseño de redes de alcantarillado que minimiza el costo de construcción y maximiza la confiabilidad del sistema. Para el diseño de alcantarillados, se adoptó una metodología existente en la literatura que propone utilizar criterios topográficos y modelación entera mixta en la selección del trazado de la red y programación dinámica para seleccionar los diámetros y pendientes óptimos de las tuberías. En cuanto a la optimización multiobjetivo, se implementó la metodología *Non-Inferior Set Estimation*, que pondera las funciones objetivo de interés para construir una frontera de Pareto con soluciones óptimas. La metodología propuesta fue aplicada en dos redes de alcantarillado que corresponden a dos sectores del sistema de alcantarillado real de Bogotá, Colombia. A partir de los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión de que la metodología permite encontrar diseños de bajo costo con altos niveles de confiabilidad, aunque estos dos objetivos no siempre estén en conflicto en los sistemas de alcantarillado.

Palabras clave

Diseño optimizado de alcantarillado, mínimo costo, máxima confiabilidad

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de alcantarillado es un servicio vital para evitar problemas de contaminación y enfermedades. Sin embargo, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2020, más de 1700 millones de personas carecían de acceso a servicios básicos de saneamiento [1]. Una de las principales razones de la falta de cobertura es el presupuesto limitado. Por esta razón, es crucial diseñar redes de alcantarillado de bajo costo que cumplan con todas las restricciones hidráulicas para una adecuada operación.

Debido a lo anterior, varios investigadores han propuesto metodologías para el diseño optimizado de redes de alcantarillado. Por ejemplo, Pan y Kao [2] propusieron un algoritmo genético en el que cada cromosoma representa un set de diámetros en las tuberías del sistema. Haghghi y Bakhshipour [3] presentaron el Loop-by-loop cutting algorithm para seleccionar

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

la estructura de la red y utilizaron Búsqueda Tabú para optimizar los costos del diseño de la red. Safavi y Geranmehr [4] utilizaron un método de programación entera mixta (MIP) para optimizar el diseño de alcantarillados. Moeini y Afshar [5] utilizaron un algoritmo de la colonia de hormigas mejorado con programación no lineal. Duque et al. [6] propusieron un esquema iterativo que utiliza MIP y programación dinámica. Una extensión a este último método fue propuesta por Saldarriaga et al. [7], quienes al incluir criterios topográficos en el modelo de optimización redujeron significativamente los costos de los diseños obtenidos.

Aunque las metodologías propuestas han demostrado minimizar los costos de los diseños de redes de alcantarillado, este no debe ser el único objetivo que se debe tener en cuenta al diseñar un sistema de alcantarillado, ya que, para reducir costos de excavación, los diseños de bajo costo suelen tener velocidades y pendientes bajas, lo cual aumenta la probabilidad de que ocurra una obstrucción en las tuberías. Teniendo en cuenta lo anterior, otros criterios deberían ser considerados en el diseño, como la confiabilidad, la cual se refiere a la probabilidad del sistema para operar sin fallos [8].

A diferencia del diseño optimizado de alcantarillados, no muchas metodologías se han propuesto para medir la confiabilidad en redes de alcantarillado. Una de las metodologías que han demostrado funcionar satisfactoriamente es la propuesta por Haghghi y Bakhshipour [9] quienes propusieron un índice para medir la confiabilidad de esos sistemas basándose en el trazado de la red, que corresponde al tipo de conexión y la dirección de las tuberías.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo propone la implementación de una metodología multiobjetivo para el diseño optimizado de redes de alcantarillado que busca minimizar los costos de construcción y maximizar la confiabilidad en sistemas de alcantarillado utilizando el método para el diseño de alcantarillados propuesta por Saldarriaga et al. [7]. La metodología fue probada en dos redes de alcantarillado de Bogotá, Colombia.

2. METODOLOGÍA

2.1 DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES DE ALCANTARILLADO

El diseño de alcantarillados está compuesto de dos partes: la selección del trazado y el diseño hidráulico. En la selección del trazado se define la dirección del flujo, el caudal que pasa por cada tubería y el tipo de conexión de estas; mientras que en el diseño hidráulico se definen los diámetros y las pendientes de las tuberías de la red.

En el presente trabajo, se utilizó la metodología de Saldarriaga et al. [7] para diseñar las redes de alcantarillado. Esta metodología es una extensión del trabajo de Duque et al. [6] en la cual se propuso la inclusión de criterios topográficos en el diseño de la red, lo que demostró disminuir significativamente los costos de los diseños resultantes, así como reducir el número de iteraciones requeridas para llegar a la solución final.

En esta metodología para el diseño de alcantarillados, la selección del trazado se realiza por medio de un modelo MIP, en donde las restricciones garantizan un trazado factible, es decir, se garantiza el balance de agua, la estructura en forma de árbol, entre otras restricciones.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Por otra parte, la función objetivo del modelo de selección del trazado no es fácil de definir, ya que los costos reales de la red dependen de los diámetros y las profundidades de excavación de las tuberías, los cuales son desconocidos en este punto. Para solucionar este problema, Saldarriaga et al. [7] propusieron utilizar criterios topográficos para darle prioridad a las tuberías que requieren menor excavación y, por consiguiente, disminuyen el costo de excavación, el cual es el más significativo en redes de alcantarillado.

La ecuación (1) presenta la función objetivo propuesta por estos autores, en donde x_{ijt} es una variable binaria que es igual a 1 si la tubería que va del pozo i al j y es de tipo t^1 hace parte del trazado seleccionado o 0 de lo contrario; y b_{ijt} es un parámetro que se calcula con criterios topográficos para cada tubería, entre menor sea el valor de este parámetro, más deseable será tener esa tubería en el trazado.

$$\min \left(\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}_L} b_{ijt} x_{ijt} \right) \quad (1)$$

El parámetro b_{ijt} se calcula por medio de tres criterios topográficos que se describen a continuación:

- Criterio 1: con este criterio, b_{ijt} se calcula por medio de la pendiente del terreno. Este criterio busca que se prioricen las tuberías que van en dirección del terreno.
- Criterio 2: este criterio está basado en la energía disponible para transportar el caudal de diseño y da prioridad a las tuberías con mayor diferencia de energía.
- Criterio 3: Con este criterio, b_{ijt} se calcula como la distancia entre el pozo aguas abajo de la tubería y la descarga de la red. El criterio busca minimizar la longitud de las principales series de la red de manera que se reduzca la profundidad de excavación.

Cada uno de estos criterios se utiliza de forma independiente para calcular el parámetro b_{ijt} en cada tubería factible. Lo anterior significa que con cada criterio se ejecuta una iteración diferente, de manera que se obtienen tres trazados en total. Posterior a esto, a cada trazado se le calcula el respectivo diseño hidráulico y finalmente se selecciona el diseño de menor costo. En cuanto al diseño hidráulico, este se modela como un grafo dirigido compuesto de nodos y arcos. Los nodos representan las posibles combinaciones de diámetros y profundidades de excavación para cada tubería, y los arcos representan la unión de estos nodos. Cada arco tiene un costo asociado que depende de los diámetros y profundidades de los nodos que une. Teniendo en cuenta estos costos, un algoritmo de ruta más corta es utilizado para seleccionar el conjunto de arcos que conllevan al diseño de menor costo, es decir, la combinación de diámetros y profundidades de excavación óptima.

¹ De acuerdo con el modelo de Duque et al. [6] y Saldarriaga et al. [7], hay dos tipos de tuberías: t_1 son las tuberías de inicio, las cuales no tienen otra tubería aguas arriba, y t_2 son las tuberías continuas, que corresponden a todas las demás tuberías. Para más detalles sobre la nomenclatura se recomienda ver el trabajo de Duque et al. [6] y Saldarriaga et al. [7].

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

2.2 OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

La implementar la optimización multiobjetivo, se adoptó el algoritmo *Non-Inferior Set Estimation* (NISE) [10], que consiste en crear una única función objetivo a partir de la ponderación de las funciones objetivo de interés, que en este caso es el costo y la confiabilidad. El ponderador de la nueva función objetivo cambia con cada iteración para encontrar diferentes soluciones, de las cuales, las soluciones dominantes conforman la frontera de Pareto. Las soluciones dominantes son aquellas que tienen los menores costos y mayores niveles de confiabilidad, no hay soluciones que sean mejores que estas, por lo tanto, se puede decir que la frontera de Pareto está conformada por las soluciones óptimas.

Para medir la confiabilidad de la red, se utilizó el índice propuesto por Haghghi y Bakhshipour [9], ya que este índice mide la confiabilidad con las variables del trazado de la red. La ecuación (2) presenta dicho índice, en el que R_{ij} es la confiabilidad de la tubería que va del pozo i al j , Q_{ij} es el caudal que pasa por esta tubería y Q_{out} es el caudal de descarga de la red.

$$R_{ij} = 1 - \frac{Q_{ij}}{Q_{out}} \quad (2)$$

Por otro lado, para medir los costos reales de la red se utilizó la ecuación propuesta por Maurer et al. [11], la cual se presenta en la ecuación (3). En esta, C es el costo de una tubería [USD], d es el diámetro de la tubería [m], h es la profundidad de excavación promedio [m] y L la longitud de la tubería [m].

$$C = ((110d + 127)h + (1200d - 35))L \quad (3)$$

Como se mencionó anteriormente, el diseño de alcantarillados está compuesto de la selección del trazado y del diseño hidráulico. Por esta razón, la optimización multiobjetivo se aplicó en cada parte del problema por separado, es decir, en primer lugar, se utilizó el algoritmo NISE en el modelo de selección de trazado para obtener una frontera de Pareto con los trazados óptimos que maximizan la confiabilidad (ecuación 2) y minimizan la función objetivo de esta parte del problema (ecuación 1). A cada uno de estos trazados se les calculó el respectivo diseño hidráulico con la ecuación de costos reales (ecuación 3) para obtener los diseños finales de la red. Este procedimiento se realizó tres veces, uno con cada criterio topográfico en la selección del trazado.

2.3 CASOS DE ESTUDIO

La metodología fue aplicada en 2 redes de alcantarillado de Bogotá, Colombia. La primera red pertenece al sector de Cedritos y está compuesta por 147 pozos de inspección, 171 tuberías y una descarga de $0.0787 \text{ m}^3/\text{s}$. La segunda red pertenece al sector de la Esmeralda que tiene 385 pozos de inspección, 413 tuberías y $4.399 \text{ m}^3/\text{s}$.

Adicionalmente, para el diseño de las redes se utilizaron las restricciones hidráulicas, el n de Manning y la lista de diámetros comerciales sugeridas por Li y Matthew [12].

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

3. RESULTADOS

Las Figuras 1 y 2 presentan los resultados obtenidos para la red de Cedritos y Esmeralda, respectivamente. En estas figuras se encuentran las fronteras de Pareto obtenidas en la selección de trazado y sus respectivos diseños hidráulicos. En azul se encuentran las fronteras de Pareto obtenidas en la selección de trazado. En estas gráficas, cada punto representa un trazado diferente, el eje x es la confiabilidad del trazado y el eje y , el valor de la función objetivo del modelo de selección de trazado. Por otro lado, en naranja se encuentran los diseños hidráulicos obtenidos para cada uno de los trazados encontrados. En estas gráficas, el eje x es la confiabilidad y el eje y es el costo real de la red. Adicionalmente, el procedimiento se realizó con cada uno de los tres criterios topográficos, por lo que se muestran las fronteras obtenidas con cada criterio.

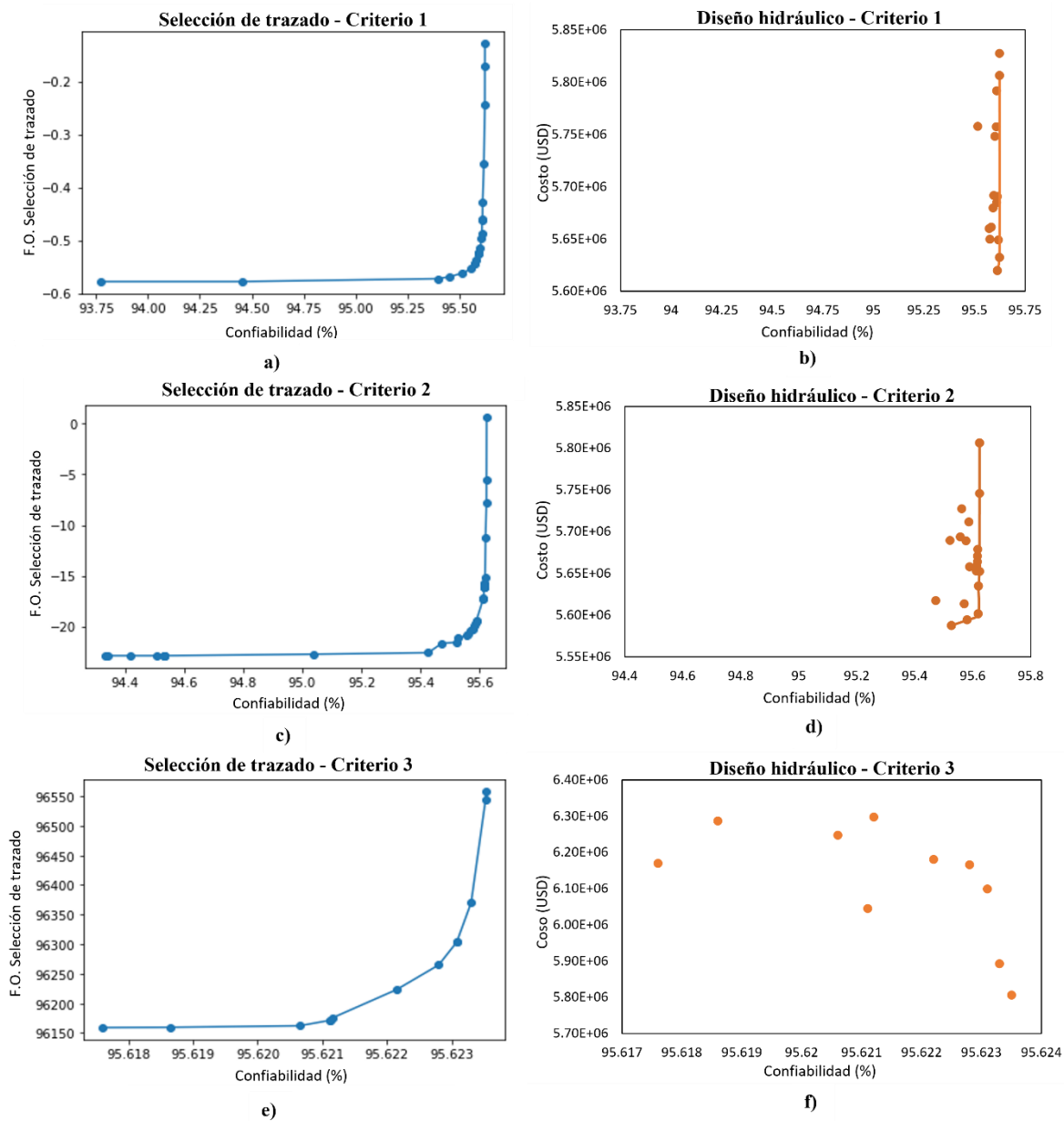


Figura 1. Fronteras de Pareto obtenidas con los tres criterios topográficos en Cedritos

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

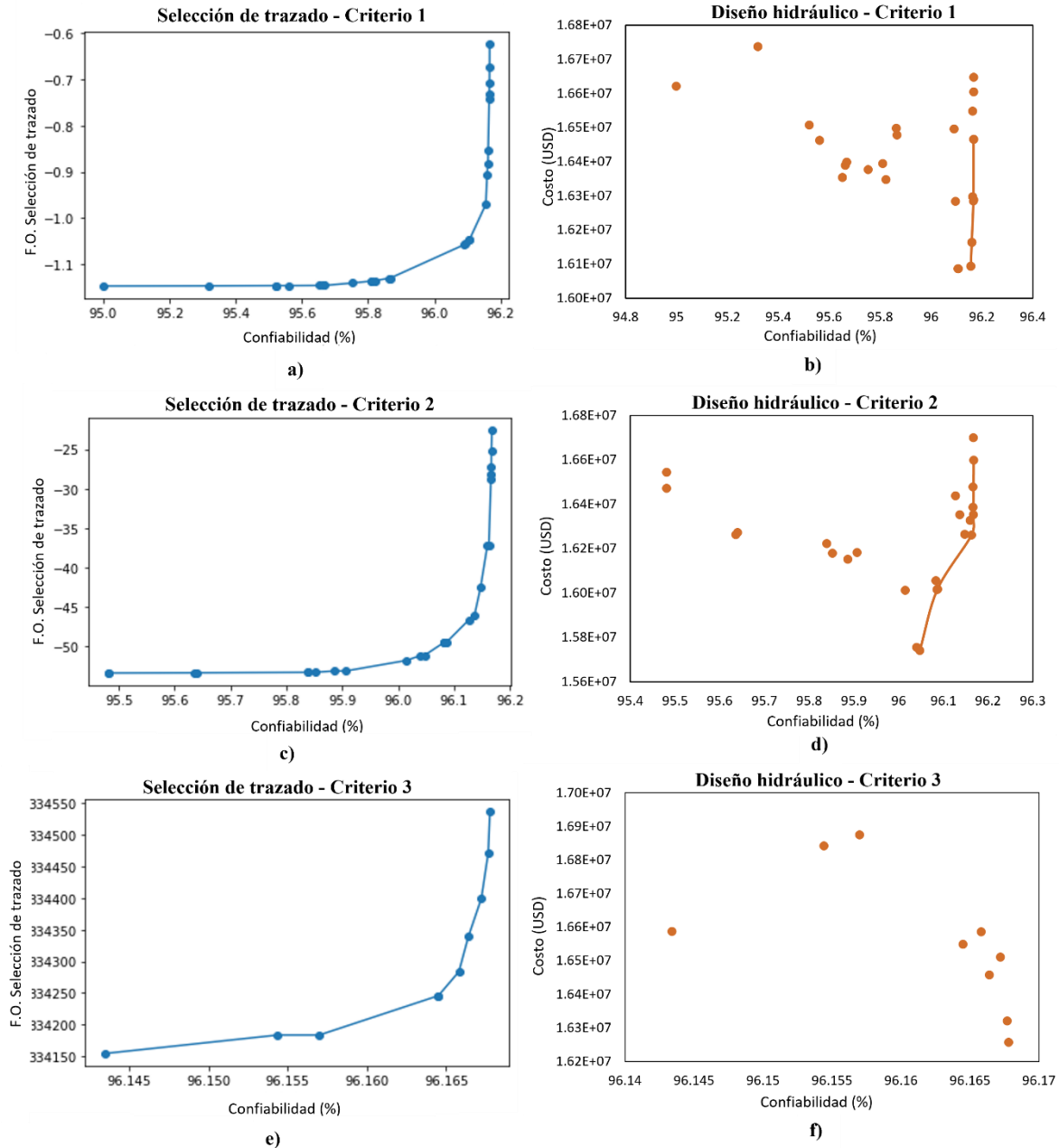


Figura 2. Fronteras de Pareto obtenidas con los tres criterios topográficos en Esmeralda

Las Figuras 1 y 2 muestran que en ambos casos de estudio fue posible obtener una frontera de Pareto en el modelo de selección de trazado, en el que cada punto de la frontera representa un trazado que maximiza la confiabilidad de la red y minimiza la función objetivo de la selección del trazado, la cual es una aproximación al costo real de la red.

Por otro lado, al observar los diseños hidráulicos calculados, se puede ver que no siguen el mismo comportamiento de la frontera de Pareto de los trazados, es decir, no siempre se cumple que los diseños sean más costosos a medida que aumenta su confiabilidad. Lo anterior conlleva a que no todas las soluciones de los diseños hidráulicos sean dominantes. Aquellas que si lo son, conforman la frontera de Pareto, la cual se ha señalado con una línea naranja.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Las Figuras 1.f) y 2.f) muestran que, al usar el criterio 3, no fue posible construir una frontera de Pareto con los diseños hidráulicos dado que el diseño de menor costo fue también el de mayor confiabilidad, por lo tanto, esta es la única solución dominante en estas gráficas. No obstante, el costo y la confiabilidad de esta solución es superada por varias soluciones encontradas con el criterio 1 y 2. Lo anterior se cumple en ambos casos de estudio.

En cuanto al criterio 1 y 2, se pudo encontrar algunas soluciones dominantes, pero la mayoría de las soluciones no lo son. La diferencia entre las fronteras de Pareto en la selección del trazado y los diseños hidráulicos indican que la función objetivo del primer modelo no se acerca de manera precisa a los costos reales de la red. No obstante, la metodología de diseño ha demostrado lograr reducir los costos de construcción de las redes y la metodología multiobjetivo permitió encontrar diseños de bajo costo y alta confiabilidad.

Por otra parte, en las Figuras 1.b) y 1.d) no fue posible encontrar diseños factibles a los trazados con menor confiabilidad y costo, razón por la cual todos los diseños hidráulicos de estos escenarios se encuentran en los niveles altos de confiabilidad de las gráficas.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se buscó implementar la metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado propuesto por Saldarriaga et al. [7] en un marco de optimización multiobjetivo para encontrar diseños que minimizan el costo de construcción y maximizan la confiabilidad de la red. La metodología fue aplicada en dos sectores del alcantarillado real de Bogotá, Colombia. A partir de los resultados obtenidos se plantean las siguientes conclusiones.

- La metodología multiobjetivo permitió integrar la confiabilidad de las redes de alcantarillado en el diseño de estas. También permitió encontrar diseños de bajo costo de construcción y alta confiabilidad, lo que se traduce en diseños más asequibles y con menores probabilidades de inundación.
- La metodología permitió construir fronteras de Pareto en el modelo de selección de trazado; sin embargo, al calcular los respectivos diseños hidráulicos, se encontró que estos no siguen la misma forma de las fronteras de Pareto. Lo anterior sugiere que la función objetivo del modelo de selección de trazado no se aproxima de manera precisa a los costos reales de la red. A pesar de esto, la metodología de diseño optimizado logra reducir significativamente los costos de la red, comparado a otras metodologías de diseño.
- En las gráficas de los diseños hidráulicos, se pudo evidenciar que no siempre se cumple que los diseños más confiables sean los más costosos. Lo anterior implica que el costo de construcción de una red de alcantarillado no necesariamente está en conflicto con su confiabilidad.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

REFERENCIAS

- [1] Organización mundial de la Salud, «Saneamiento,» 2022. [En línea]. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation#:~:text=a%20la%20malnutrici%C3%B3n,-,En%202020%2C%20el%2054%25%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20mundial%20\(4200,el%2020%25%20\(1600%20millones%20de](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation#:~:text=a%20la%20malnutrici%C3%B3n,-,En%202020%2C%20el%2054%25%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20mundial%20(4200,el%2020%25%20(1600%20millones%20de)
- [2] T.-C. Pan y J.-J. Kao, «GA-QP Model to Optimize Sewer System Design,» *Journal of Environmental Engineering*, vol. 135, n° 1, pp. 17-24, 2009.
- [3] A. Haghghi y A. E. Bakhshipour, «Deterministic Integrated Optimization Model for Sewage Collection Networks Using Tabu Search,» *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 141, 2015.
- [4] H. Safavi y M. A. Geranmehr, «Optimization of sewer networks using the mixed-integer linear programming,» *Urban Water Journal*, vol. 14, n° 5, 2017.
- [5] R. Moeini y M. H. Afshar, «Extension of the Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Layout and Size Optimization of Sewer Networks,» *Journal of Environmental Informatics*, vol. 33, n° 2, 2019.
- [6] N. Duque, D. Duque, A. Aguilar y J. Saldarriaga, «Sewer Network Layout Selection and Hydraulic Design Using a Mathematical Optimization Framework,» *Water*, vol. 12, 2020.
- [7] J. Saldarriaga, J. Zambrano, J. Herrán y P. L. Iglesias-Rey, «Layout Selection for an Optimal Sewer Network Design Based on Land Topography, Streets Network Topology, and Inflows,» *Water*, 2021.
- [8] T. Hashimoto, J. R. Stedinger y D. P. Loucks, «Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation,» *Water Resources Research*, vol. 18, pp. 14-20, 1982.
- [9] A. Haghghi y A. Bakhshipour, «Reliability-based layout design of sewage collection systems in flat areas,» *Urban Water Journal*, pp. 790-802, 2016.
- [10] F. Medrano y R. Church, «A Parallel Computing Framework for Finding the Supported Solutions to a Biobjective Network Optimization Problem,» *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 22, 2015.
- [11] M. Maurer, M. Wolfram y H. Anja, «Factors affecting economies of scale in combined sewer systems,» *Water Science & Technology*, vol. 62, pp. 36-41, 2010.
- [12] G. Li y R. G. S. Matthew, «New Approach for Optimization of Urban Drainage systems,» *Journal of environmental Engineering*, 1990.