

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD SOBRE EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE DRENAJE URBANO

Andrés Aguilar¹, Natalia Duque² y Juan Saldarriaga³

^{1,2} Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

³ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

E-mail: af.aguilar691@uniandes.edu.co, n.duque634@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

Resumen

Las funciones de costo utilizadas en las metodologías para el diseño optimizado de redes de drenaje son factores de gran importancia, pues permiten la estimación cercana de los costos reales de construcción de una red. Para este caso se requiere una función de costo que cumpla con los requerimientos de cada uno de los sub-problemas. Primero, en la selección del trazado se implementa una función dependiente del caudal de diseño y la dirección de la tubería, teniendo en cuenta que en esta etapa no se tiene conocimiento del diámetro, profundidad de excavación y pendiente de cada una de las tuberías. Sin embargo, se debe decir que una buena estimación de los costos desde la selección del trazado facilita la obtención de un diseño hidráulico que minimice los costos de construcción.

En este artículo se escogieron algunas de las funciones de costo que se encuentran en la literatura y se implementaron en la metodología para diseño óptimo de redes de drenaje urbano propuesto por Duque N. (2015) sobre una red real localizada en Bogotá, Colombia. De esa manera, se pudo concluir acerca del efecto que tiene cada una de las funciones de costo sobre el trazado, y posteriormente sobre el diseño hidráulico de la red ejemplo. Así se pudo determinar la eficiencia y la robustez de las funciones a través de un análisis estadístico y así definir cuál de estas se puede utilizar para futuros trabajos.

Metodología

Duque N. (2015) propone una metodología para el diseño optimizado de redes de drenaje urbano, que aborda este tipo de problemas en dos etapas. En la primera etapa se realiza la selección del trazado donde se define el caudal de diseño, el sentido y el tipo de cada una de las tuberías. Mientras que la siguiente etapa es la definición del diseño hidráulico en donde se debe determinar el diámetro, la profundidad de excavación y la pendiente de cada una de las tuberías. De manera que el principal objetivo del problema es minimizar los costos de construcción de la red cumpliendo con las restricciones hidráulicas impuestas por la reglamentación técnica de cada país.

Para empezar, en el modelo de selección de trazado se debe ingresar como parámetros de entrada la topografía de la red y los caudales de entrada a cada uno de los pozos. De esta manera, mediante la implementación un modelo de Programación Entera Mixta (MIP siglas en inglés) se obtienen las variables nombradas anteriormente. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este modelo MIP es resuelto mediante el método de optimización SIMPLEX, el cual requiere que tanto la función objetivo como las restricciones sean expresiones lineales.

Por otra parte, el problema de diseño hidráulico se representa como un grafo dirigido que es resuelto mediante la implementación del algoritmo de ruta más corta llamado Bellman Ford, donde el objetivo es minimizar los costos de construcción, los cuales se calculan gracias a las funciones de costo que se encuentran en la literatura. Se debe tener en cuenta que los parámetros de entrada de este modelo son los resultados

obtenidos desde la selección de trazado, los diámetros comerciales disponibles, el material de las tuberías (n de Manning o k_s , según sea el caso) y la viscosidad dinámica del agua. Ahora a partir de estos parámetros es posible determinar la combinación diámetro-pendiente para cada uno de los tramos de la red que minimicen de manera óptima los costos de construcción de la red de interés. Se debe tener en cuenta que este grafo dirigido está compuesto por nodos y arcos, donde cada nodo representa un diámetro de la tubería y tiene asociados la profundidad de excavación de la tubería y el pozo de inspección al cual pertenece.

En este artículo se propone una modificación en la estimación de costos de la metodología de Duque N. (2015), especialmente en la selección de trazado, donde se logre una mejor aproximación de los costos de construcción desde la definición del trazado, de tal manera que se tenga una mejor conexión y flujo de información con el modelo de diseño hidráulico.

Esta nueva estimación de los costos consiste básicamente en implementar las funciones de costo que se usan en el diseño hidráulico, y que normalmente en la literatura se encuentran en términos del diámetro de las tuberías y la profundidad de excavación, en la función objetivo del modelo de selección de trazado. De esta manera, el primer problema que se presenta es expresar estas funciones de costo en términos de las variables del modelo de selección de trazado, donde la solución que se propone es hacer uso de las ecuaciones de resistencia fluida que permiten calcular la velocidad promedio en tuberías fluyendo parcialmente llenas como lo son Manning y Darcy-Weisbach, las cuales permiten encontrar una expresión del diámetro en términos del caudal de una tubería (Figura 1), luego de realizar una serie de supuestos hidráulicos.

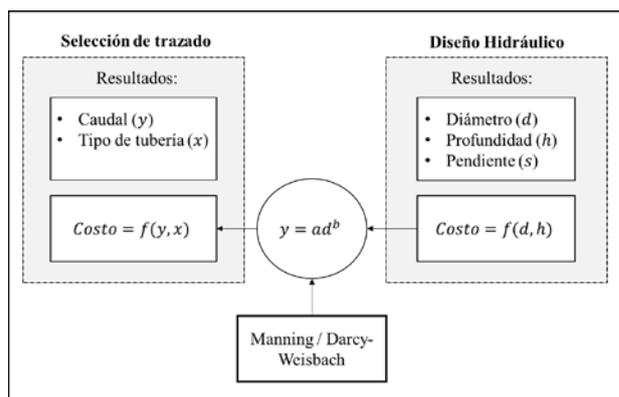


Figura 1.- Conectividad modelos de selección de trazado y diseño hidráulico.

Ahora, teniendo en cuenta la nueva función objetivo que se obtiene en el modelo de selección de trazado, agregando dicha expresión, es posible implementar las siguientes funciones de costo que se encuentran en la literatura.

La primera es una ecuación propuesta por Maurer et al. (2012), la cual es obtenida mediante modelo de economías a escala de una zona de la ciudad de Dubendorf, Suiza. Además, es de carácter pseudo-lineal, y depende del diámetro (d_{ij}) y la profundidad de excavación promedio (h_{ij}).

$$C_{ij} = \alpha h_{ij} + \beta \quad [1]$$

$$\alpha = m_{\alpha} d_{ij} + n_{\alpha} \quad [2]$$

$$\beta = m_{\beta} d_{ij} + n_{\beta} \quad [3]$$

$$C_{ij} = (m_{\alpha} d_{ij} + n_{\alpha}) h_{ij} + m_{\beta} d_{ij} + n_{\beta} \quad [4]$$

donde C_{ij} es el costo de construcción del tramo en dólares por metro lineal de tubería, $m_{\alpha} = 1.02 * 10^{-3}$, $n_{\alpha} = 127$, $m_{\beta} = 0.11 * 10^{-3}$ y $n_{\beta} = 37$ son constantes propias de las regresiones que tratan de explicar la dependencia de las variables frente al costo.

La segunda ecuación de costo utilizada es propuesta por Marchionni et al. (2014), la cual hace uso de herramientas estadísticas como regresiones lineales múltiples, que permitieron analizar las bases de datos de 17 proyectos de construcción de alcantarillado en Portugal, y así poder encontrar las funciones que permiten calcular dichos costos.

Esta ecuación tiene en cuenta los costos de instalación de la tubería ($C_{TUBERIAS}$), de excavación del tramo y el costo de la construcción de los pozos de inspección (C_{POZOS}).

$$C_{ij} = C_{TUBERIAS} + C_{POZOS} \quad [5]$$

$$C_{TUBERIAS} = \alpha_0 + \alpha_1 d_{ij} + \alpha_2 h_{ij} + \alpha_3 d_{ij} h_{ij} \quad [6]$$

$$C_{POZOS} = \beta_0 + \beta_1 h_j \quad [7]$$

donde C_{ij} es el costo total de construcción del tramo en euros por metro lineal, d_{ij} es el diámetro de la tubería, h_{ij} es la profundidad promedio de la tubería, h_j es la profundidad del pozo que se encuentra aguas abajo del tramo y los α 's y β 's son los coeficientes que explican cada una de las regresiones lineales. Los cuales son $\alpha_0 = 203.3111$, $\alpha_1 = 0.1254$, $\alpha_2 = 131.439$, $\alpha_3 = 0.044$, $\beta_0 = 1.6928$ y $\beta_1 = 3.6231$.

La tercera ecuación es propuesta por Moeini et al. (2013), la cual tiene en cuenta los costos de excavación, de instalación de las tuberías y de construcción de los pozos de inspección, como se muestra a continuación:

$$C_{TUBERIAS} = 10.93e^{3.43d_{ij}} + 0.012h_{ij}^{1.53} + 0.437h_{ij}^{1.47}d_{ij} \quad [8]$$

$$C_{POZOS} = 41.46h_j \quad [9]$$

$$C_{ij} = C_{TUBERIAS} + C_{POZOS} \quad [10]$$

donde el costo esta dado en riales iraníes por metro lineal, d_{ij} es el diámetro de la tubería, h_{ij} es la profundidad de excavación promedio del tramo y h_j es la profundidad del pozo aguas abajo del tramo.

Ahora, debido a las características no lineales de las anteriores ecuaciones es necesario realizar una aproximación lineal a trozos de estas con el fin de poder implementarlas en el modelo de selección de trazado. Para hacer esto es necesario agregar nuevas variables y restricciones al modelo, de tal manera que permitan mejorar la conectividad con el modelo de diseño hidráulico.

Resultados y ejemplo numérico

Para poner a prueba esta metodología se implementa una red real de 110 pozos y 160 tramos, ubicada en un sector de Bogotá DC, Colombia, denominada Chicó Norte. En la cual se especifica las coordenadas y los caudales de entrada de cada uno de los pozos de inspección, que servirán como parámetros del modelo propuesto en este o.

Esta red se implementó con cada una de las ecuaciones de costo planteadas, con diferentes materiales de tubería (PVC, concreto y GRP), con relaciones de llenado máxima desde 75% hasta 100% y con la ecuación de Manning y Darcy-Weisbach.

Teniendo en cuenta lo anterior se hizo análisis estadístico y de sensibilidad que permite concluir acerca del efecto que tienen estos factores sobre la hidráulica de la red, el costo de construcción y el tiempo computacional. En el cual se pudo concluir elementos como que la ecuación de Maurer et al. (2012) es la más robusta para ser implementada, pues registra menor variabilidad en sus costos que las demás ecuaciones, y teniendo en cuenta que tiene un tiempo computacional menor da la posibilidad para que se puedan programar redes de mayor magnitud.

Conclusiones

En este trabajo se pudo llegar a conclusiones como que el trazado y el diseño hidráulico es directamente dependiente de la ecuación de costo con la que sea implementado, debido a que dependiendo de la naturaleza de esta se va a favorecer los diámetros grandes o la profundidad de excavación, y así mismo se van a ver modificados las direcciones y los tipos de las tuberías. También se puede concluir que el material de la tubería es un parámetro que interviene en el trazado y diseño hidráulico de la red. Se pudo notar que los materiales como PVC y GRP, que tienen un bajo coeficiente de rugosidad, permiten minimizar en mayor medida los costos de construcción. Finalmente, se puede decir que los cálculos hidráulicos con la ecuación de Darcy-Weisbach permite una mejor modelación de la velocidad y por lo tan se ve reflejado en la selección de los diámetros y profundidades de excavación de la red, que conllevan a una obtención de menores costos de construcción.

Referencias

- Duque, N.** (2015). Metodología para el diseño optimizado de alcantarillados. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes. Tesis de maestría.
- Duque, N., Duque, D., & Saldarriaga, J.** (2016). A new methodology for the optimal design of series of pipes in sewer systems. *Journal of Hydroinformatics*.
- Maurer, Scheidegger, & Herlyn.** (12 de septiembre de 2012). Quantifying costs and lengths of urban drainage systems with a simple static sewer. Dubendorf, Suiza: Taylor & Francis.
- Marchionni, V., Lopes, N., Mamouros, L., & Covas, D.** (junio de 2014). Modelling Sewer Systems Costs with Multiple Linear Regression. Portugal: Water Resource Manage .
- Moeini, R., & Afshar, M.** (2013). Sewer Network Design Optimization Problem Using Ant Colony Optimization Algorithm and Tree Growing Algorithm. Iran : Iran University of Science and Technology.