

# Resumen

Los sistemas de drenaje urbano, también conocidos como sistemas de alcantarillado, tienen el propósito de drenar tanto las aguas lluvias como las aguas residuales de nuestras ciudades. Estos sistemas son una de las diferentes infraestructuras civiles que permiten el correcto funcionamiento de las ciudades actuales. Los sistemas de alcantarillados pluviales se encargan de mover las aguas lluvias que caen en la ciudad en forma segura y en un tiempo razonable, sin permitir inundaciones, hacia los cuerpos receptores naturales localizados aguas abajo. Los sistemas de alcantarillado sanitario, por otra parte, tienen el objetivo de recolectar las aguas servidas, de origen domiciliario, industrial y comercial, y transportarlas en forma segura hacia una planta de tratamiento de aguas residuales antes de enviarlas en forma definitiva hacia un cuerpo receptor o hacia un sistema de reuso, en caso de que este exista. Ambos tipos de alcantarillado, pero particularmente los sanitarios, tienen un profundo impacto sobre la salud pública con implicaciones sobre la viabilidad de una ciudad.

La infraestructura de drenaje urbano existente plantea nuevos retos a la ingeniería hidráulica urbana. Por un lado, los sistemas de drenaje de aguas lluvias, además de verse sometidos a problemas de envejecimiento con deterioros de materiales y asentamientos de suelos, se están enfrentando a serios problemas causados por el Cambio Climático. En muchas ciudades este fenómeno está implicando cambios radicales en la hidrología urbana; en muchas ciudades las intensidades y frecuencias de los eventos de lluvia están aumentando con lo cual los sistemas existentes, que fueron diseñados para hidrologías diferentes, se quedan sin capacidad aumentando la frecuencia de las inundaciones urbanas con sus consecuencias sobre la seguridad y salud humana. Por otro lado, los sistemas sanitarios también presentan retos a la ingeniería por problemas de aumento de la densidad poblacional de las ciudades, la falta de resiliencia ante eventos externos como sismos, y a problemas de calidad de agua en los cuerpos receptores al interior de las zonas urbanas, en las aguas freáticas y las corrientes naturales de agua. Estos sistemas también se ven afectados por el deterioro de los materiales y los problemas de asentamiento de los suelos.

Ahora, un problema diferente es la no existencia de sistemas de drenaje urbano en muchas ciudades de nuestro mundo, particularmente en aquellas localizadas en países en vías de desarrollo. En la gran mayoría de esos casos, esa falta de alcantarillados es causada por el alto costo de esa infraestructura cuya construcción hace inviable para los gobiernos locales. Además, el crecimiento de las zonas urbanas en esos países agrava el problema. No solamente la infraestructura necesaria se hace más grande y compleja, sino que aumentan los problemas de salud pública asociados con la falta de sanidad ambiental. Por consiguiente, el reto para la ingeniería hidráulica urbana moderna es lograr un mayor acceso a ese servicio esencial. Una de las formas de resolverlo es bajando los costos de construcción y operación de los sistemas de drenaje, haciéndolos financieramente viables a la vez que se mantienen su resiliencia y seguridad. De esta manera se ayudará a cumplir con el Objetivo de Desarrollo Sostenible No. 6 Agua Limpia y Saneamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de esta tesis fue proponer una metodología que llevara al diseño de mínimo costo de redes de alcantarillado convencionales, manteniendo su resiliencia y facilidad

de operación, a la vez que se cumplieran todas las restricciones hidráulicas, constructivas y de operación que, de acuerdo con la experiencia empírica internacional, son las apropiadas para garantizar un correcto comportamiento del sistema de drenaje.

El diseño optimizado de una red de alcantarillado está compuesto por dos partes mutuamente dependientes: la selección del árbol y el diseño hidráulico. En esta tesis se resolvieron los dos problemas en forma separada desde el punto de vista matemático, manteniendo su interdependencia a través de un proceso iterativo. Para un árbol dado, que podría ser aleatorio para una primera iteración, el problema del diseño hidráulico se resolvió como un problema de ruta más corta usando el algoritmo de Bellman-Ford que garantiza el costo mínimo global para ese árbol. El problema recorre un grafo dirigido en el que los nodos representan las combinaciones existentes de diámetros y profundidades de excavación y los arcos representan las conexiones factibles entre nodos. Como resultado el proceso de optimización de esta parte da los diámetros y pendientes de cada tubería y la relación de llenado correspondiente, para el caudal de diseño de cada tubo, cumpliendo con todas las restricciones dadas por el diseñador. Con estos resultados se puede obtener una ecuación de costos de cada tubo como función del diámetro y el volumen de excavación necesario, la cual es el insumo de entrada para el proceso de selección del árbol en la siguiente iteración.

El proceso original de escogencia del nuevo árbol usa la anterior ecuación y la convierte en una en la que el costo es función del caudal y de la dirección de flujo. Usando un modelo de Programación Entera Mixta, se llega a un nuevo árbol. Con este se repite todo el proceso de cálculo de un nuevo diseño hidráulico y un nuevo árbol, el cual se detiene cuando en dos iteraciones sucesivas los costos totales sean muy parecidos. El proceso de diseño probó ser costoso en tiempo computacional, especialmente para redes de drenaje grandes, con un número de tubos por encima de los 500.

Con el fin de disminuir ese tiempo computacional, en una segunda etapa de la tesis se cambió el proceso general para evitar que este partiera de un árbol aleatorio. Se estableció una nueva rutina para escoger el árbol inicial basada en entender los aspectos topológicos del terreno y del trazado de calles y carreras (geometría del problema) y la potencia disipada correspondiente al caudal multiplicado por la longitud y la pendiente de cada tubería (física del problema). De esta forma se logró reducir las iteraciones del proceso general a no más de 2 o 3, con lo cual el costo computacional se redujo sustancialmente dependiendo únicamente de la eficiencia del algoritmo de Bellman-Ford. Posteriormente se trazó el camino para introducir otras estructuras típicas de una red de alcantarillado usando como ejemplo las cámaras de caída. Esto significa que la metodología de diseño optimizado propuesta en la tesis puede incluir cualquier estructura de un sistema de drenaje urbano. Finalmente se hizo un análisis de la resiliencia de los diseños optimizados.

La metodología y los correspondientes programas de computador fueron probados en las redes patrón (benchmarks) de redes de drenaje urbano reportadas en la literatura técnica, obteniendo los menores costos reportados hasta ahora. Igualmente se introdujo una nueva red patrón (benchmark) basada en una red real que forma parte del sistema de drenaje de aguas lluvias de la ciudad de Bogotá, Colombia. Esta red se encuentra descrita en el Apéndice 2 de este documento. De esta forma se puede afirmar, como resultado de la tesis, que el problema del diseño optimizado de una red de alcantarillado es un problema resuelto.

