

EVALUACIÓN MULTI-OBJETIVO DE REDES DE DRENAJE URBANO MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL

Carlos Martínez¹, Arlex Sánchez², y Zoran Vojinovic²

¹ Programa de Ingeniería Civil - Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta – Colombia.

² Departamento de Ingeniería Ambiental y Tecnología del Agua, IHE-Delft, Instituto para la Educación del Agua, Holanda.
Email: cmartinez@unimagdalena.edu.co, a.sanchez@un-ihе.org, z.vojinovic@un-delft.org

Introducción

El presente trabajo describe una metodología con el fin de evaluar la capacidad que tiene un sistema de drenaje urbano (SDU) de transportar eficientemente las aguas pluviales. Se proponen tres medidas de rehabilitación del SDU: Renovación de las Tuberías (RT), Sistemas de Almacenamiento Distribuido (SAD) y la combinación de ambas medidas (RT+SAD). La evaluación se plantea como un problema de optimización multiobjetivo con el fin de minimizar los costos de daños por inundación y el costo de inversión en el replazo o actualización de tuberías (de aquí en adelante, costos de rehabilitación). También se incluye el enfoque de los Costos Anuales de Daños Esperados (CADE) como el costo probabilístico causado por las inundaciones para varios eventos de inundación (es decir, la acumulación de daños durante un período de tiempo).

Con el fin de calcular los daños potenciales de inundación para diferentes eventos de lluvia y a su vez optimizar las medidas de rehabilitación, el estudio combina herramientas computacionales como un modelo hidrodinámico de simulación numérica bidimensional (1D/2D) y un algoritmo de optimización.

Las ventajas de la presente metodología se demuestran en un caso real en la cuenca urbana de Segunbagicha en la ciudad de Dhaka, Bangladesh. Las soluciones óptimas confirman la utilidad y efectividad de los métodos propuestos en particular; los costos de rehabilitación y daños por inundación se reducen con la implementación óptima de las medidas RT y SAD. Además, los resultados del enfoque propuesto de los CADE indican una reducción en los costos de daños por inundación y costos de rehabilitación de al menos el 56% mediante la implementación de RT y del 27% mediante la implementación de SAD. La metodología propuesta contribuye para que las agencias de gestión del agua identifiquen medidas que proporcionen soluciones óptimas y que requieran atención inmediata dentro del diseño y la rehabilitación de un SDU.

Materiales y métodos

La información principal para construir el modelo de escorrentía superficial 2D, incluye un modelo de elevación digital (DEM) generado en un archivo raster y convertido a un formato ASCII. Para construir el modelo 1D y simular el SDU, se incluyen los datos requeridos tales como la topología de la red, conductos, pozos de inspección, salidas, subcuencas de captación y caudales para períodos en tiempo seco. Se utilizaron eventos de lluvia a partir de hietogramas de diseño con base en las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF).

Para la evaluación de los daños potenciales de los eventos de inundación se requieren las curvas de profundidad del agua versus daños. Estas curvas denotan el daño por inundación que ocurriría a profundidades de agua específicas normalmente clasificadas para diferentes sectores de acuerdo con el uso del suelo (p. ej. residencial, comercial, institucional). De igual manera se requieren costos unitarios de los principales componentes involucrados en obras de rehabilitación, como los costos de materiales y actividades de movimiento de tierras.

La modelación hidráulica comprende dos modelos acoplados para simular la dinámica de flujo en la red de drenaje y en el flujo superficial. El proceso hidrológico de lluvia-escorrentía y el tránsito de caudales en las tuberías de drenaje se calcularon utilizando EPA SWMM v5.0. Cuando se supera la capacidad de la red de tuberías, el exceso de flujo se vierte en el dominio bidimensional del modelo a través de los pozos de inspección para luego ser transitado utilizando el modelo de simulación numérica no convectivo 2D desarrollado en el trabajo previo de Seyoum et al. (2012). Este modelo se basa en el esquema implícito de dirección alterna que resuelve las ecuaciones 2D de agua superficial conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant en 2D. Este sistema de ecuaciones diferenciales supone que el flujo bidimensional sobre la llanura de inundación es un fenómeno lento y poco profundo de modo que los términos de aceleración convectiva pueden ignorarse ya que estos son lo suficientemente pequeños en comparación con los otros términos de la ecuación.

El resultado del modelo de simulación numérica bidimensional (1D/2D) es una matriz con los valores de la profundidad de inundación a través de la llanura de inundación. Estos valores se utilizaron para calcular los costos de daños por inundación dentro del proceso de optimización del SDU.

El marco de optimización se desarrolló e implementó en el entorno EMBARCADERO (anteriormente conocido como Borland Delphi). Se codificó una primera rutina para ejecutar el modelo 1D SWMM y de esta manera calcular el valor inicial de las variables, las funciones objetivo y el valor máximo de los costos originales. También se codificó una segunda rutina para ejecutar el modelo bidimensional (1D/2D), seleccionar las tuberías sobrecargadas para su reemplazo, cambiar el tamaño del almacenamiento seleccionado y calcular las funciones objetivo que para este estudio fueron los costos de daños por inundación, costos de rehabilitación y los CADE. Los valores de las funciones objetivo se vincularon con el algoritmo optimizador NSGA II desarrollado y presentado en Deb et al. (2002) para encontrar el conjunto de mejores soluciones. Las funciones objetivo implementadas se definieron de la siguiente manera:

El costo real de la red de tuberías se calculó teniendo en cuenta el diámetro y la longitud de la tubería mediante la ecuación 1:

$$RCost = \sum_{i=1}^n (C(P)_i) * L_i \quad [1]$$

Donde $RCost$ es el costo de rehabilitación de las tuberías, i es el índice de las tuberías, n es el número de tuberías que se deben reemplazar, $C(P)_i$ es el costo de la tubería y L_i es la longitud de la tubería. $C(P)_i$ en la ecuación 1 proviene de la elaboración de un catálogo de costos de tubería, este catálogo se calcula utilizando la ecuación 2.

$$C = k * D^m \quad [2]$$

Donde C es el costo de la tubería por unidad de longitud, D es el diámetro de la tubería y la variable de decisión a optimizar. k y m son coeficientes y exponente definidos a partir de los costos.

Para los tanques de almacenamiento, se han incluido los costos de materiales, equipos y mano de obra. La ecuación 3 permite calcular el costo de acuerdo con el volumen de almacenamiento.

$$SCost = K * V^n \quad [3]$$

Donde $SCost$ es el costo total de almacenamiento, K es el coeficiente para tanques de almacenamiento construidos en concreto, n es el exponente para estanques húmedos y V es el volumen de almacenamiento en m^3 y la variable de decisión a optimizar. La estimación de los costos directos de daños por inundación se realizó en función de la profundidad máxima de inundación en la superficie. Los costos de daños en cada celda (grilla) del modelo 2D se calcularon mediante la ecuación 4 dado por:

$$CostDaños[i, j] = (\alpha + \beta) * MaxWdpth[i, j] \quad [4]$$

Donde α es una pendiente de la curva asociada con el valor del uso del suelo, β es una intersección asociada de igual manera con el uso del suelo y $MaxWdpth [i, j]$ es la profundidad máxima del agua en las celdas $[i, j]$. CADE es el costo probabilístico causado por las inundaciones para una serie de eventos probables. Este es el valor esperado del costo de daño que ocurre cuando se consideran las inundaciones por diferentes eventos de lluvia. CADE se calculó a partir de la profundidad del agua y los datos espaciales de uso del suelo. Se expresa a través del diagrama de Pareto, que representa el costo esperado en un año para diferentes períodos de retorno de lluvia.

En el presente trabajo, se utilizaron cuatro eventos de lluvia con períodos de retorno de 2, 10, 20 y 50 años para evaluar el rendimiento de la infraestructura de drenaje. Como resultado se obtiene un diagrama de Pareto que representa el costo esperado en un año para todos los eventos de lluvia seleccionados según lo propuesto por Barreto (2012). CADE puede derivarse utilizando la ecuación 5.

$$CADE = \sum_{i=1}^{Tr-1} \left[\left(\frac{Cost(i)+Cost(i+1)}{2} \right) * (P_i - P(i+1)) \right] * f \quad [5]$$

Donde Tr es el período de retorno, P es la probabilidad de excedencia $(1/Tr)$ y f está dada por $f = (1+r)^N - 1 / r * (1+r)^N$. f es el factor de valor presente, r es la tasa de interés y N es la vida útil del sistema. El algoritmo NSGA-II se utilizó con el propósito de encontrar un conjunto representativo de soluciones óptimas de Pareto y cuantificar los intercambios en la satisfacción de los dos objetivos. Las simulaciones del modelo hidrodinámico 1D/2D se llevaron a cabo a través de computación en paralelo para mejorar la eficiencia computacional al simular cada evento de lluvia. Para el proceso de optimización, se tuvieron en cuenta como variables 51 tuberías sobrecargadas y 9 tanques de almacenamiento de acuerdo con el área disponible para su implementación.

El caso de estudio comprende el área urbana de Segunbagicha ubicada en Dhaka, Bangladesh, el cual ha experimentando problemas frecuentes de inundaciones. El sistema tiene un área de drenaje de 8.3 km^2 e incluye las áreas de negocios y oficinas gubernamentales más importantes de la ciudad. Abarca 74 subcuencas, 88 conductos con una longitud total de 13.635 m, con una combinación de 75 tubos circulares con una longitud total de 11.308 m, y 13 box-culverts con una longitud total de 2.327 m. Los diámetros circulares de las tuberías de drenaje varían de 450 a 5.500 mm y los box-culverts varían entre 2,5 por 2 m y 5,5 por 4,3 m.

El sistema también incluye 88 nodos (uniones), dos estaciones de bombeo y 1 emisario final (outlet). Se estimó el grado de área impermeable de cada subcuenca y el tiempo de concentración total obtenido fue del orden de 20 minutos. El valor inicial de la infraestructura en dólares americanos para las medidas RT y SAD fue del orden de \$ 44.6 y \$ 17.3 millones, respectivamente. El monto del costo de rehabilitación inicial

obtenido para la medida RT + SAD se estimó en \$ 22.3 millones. El costo de daño inicial calculado sin implementar las medidas de rehabilitación para los eventos de lluvia de 2, 10, 20 y 50 años fueron de \$ 3.7, \$ 7.4, \$ 9.2 y \$ 11.8 millones respectivamente y se encontró que los CADE inicial también sin implementar las medidas de rehabilitación fueron de \$ 46.6 millones.

Resultados

Los resultados del caso de estudio, indican que para diseños de eventos grandes (hasta 50 años), las medidas de rehabilitación RT serían una buena opción con una inversión mínima de \$ 4.7 millones para minimizar el costo de daños por inundación a \$ 1 millón. Con la misma inversión, si se seleccionan eventos más pequeños (hasta 10 años), una medida SAD puede reducir el daño a \$ 0.7 millones de dólares, indicando la importancia y eficiencia de la medida RT y la practicidad y economía de construir SAD a lo largo el área de captación urbana. Sin embargo, con las ubicaciones disponibles para implementar tanques de almacenamiento, no fue posible reducir las inundaciones a cero para un evento de lluvia de 20 o 50 años. Por lo tanto, esto sugiere que la medida SAD se vuelve menos efectiva después de cierta carga de lluvia y la reducción adicional de daños parece depender de su ubicación en lugar de su volumen.

Para este estudio de caso, al combinar las medidas propuestas (RT+SAD) para un evento de 50 años, se necesitaría una inversión de \$ 3.9 millones para reducir el costo de daños a cero; por otro lado, de acuerdo con las soluciones óptimas obtenidas, con una inversión de \$ 4.9 millones, los daños pueden reducirse a \$ 0.5 millones solo implementando la medida RT en esta cuenca urbana. Al incluir los CADE en esta evaluación, se puede inferir que para RT, se pueden esperar cero daños en un año al invertir \$ 5.3 millones y el sistema no excederá su capacidad de drenaje para un evento de hasta 50 años. Por el contrario, con la medida SAD, también se pueden anticipar cero daños hasta aproximadamente un evento de 10 años con la misma inversión. Con lo anterior, una medida RT puede tener un efecto global en el control de inundaciones y una medida SAD puede ser localmente eficiente para reducir el riesgo de inundación. Los diagramas de Pareto de los CADE confirman la importancia de incluir los beneficios (costo reducido de rehabilitación) durante la vida útil del diseño.

Conclusiones

Se concluye que el cálculo de los costos de daños por inundación y costos de rehabilitación mediante la simulación numérica bidimensional, permite encontrar soluciones óptimas más realistas dependiendo de los objetivos de reducción a alcanzar. Esta evaluación también proporciona un marco prometedor y potencialmente rentable para mantener un rendimiento aceptable del SDU ante diferentes eventos de lluvia y de esta manera apuntar hacia una gestión del agua urbana más sostenible.

Referencias

- Barreto, W. (2012). *Multi-objective optimization for urban drainage rehabilitation* CRC Press/Balkema ISBN 978-0-415-62478-7 Taylor&Francis group.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwall A. (2002). "A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm". IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6(2), 2002 pp. 182-197.
- Seyoum, S., Vojinovic, Z., Price, R., Weesaku, J S. (2012.) "A Coupled 1D and Non-Inertia 2D Flood Inundation model for simulation

of urban flooding". *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 138 (1), 23-34.