

Desarrollo de un esquema inteligente para la optimización de SUDS y el incremento de la resiliencia en redes de drenaje urbano

Becerril Lara, J. M.; Salinas Tapia, H.; Diaz Delgado, C.; Aragón Hernández, J. L.; Félix Félix, J.R.; Alvarez Mejia, A. L.

Información del Artículo	Resumen
Recibido: 10-ene-2025 Aceptado: 2-mayo-2025 Palabras clave: SUDS, Drenaje sostenible, Resiliencia hidráulica, Optimización multiobjetivo, NSGA-II, Autómatas celulares, Inundaciones urbanas	Este estudio analiza el impacto de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el fortalecimiento de la resiliencia hidráulica de las redes de drenaje pluvial, superando las limitaciones del diseño convencional. Para ello, se integra un Algoritmo Genético Multiobjetivo NSGA-II con un modelo de simulación de flujo bidimensional basado en Autómatas Celulares (AC), complementado por modelos hidrológicos e hidráulicos para evaluar el desempeño de la red de drenaje. La aplicación del esquema en la cuenca del río Verdiguél destacó la importancia de combinar simulaciones hidrológicas e hidráulicas con métodos de optimización en la planificación urbana. Este enfoque permitió diseñar estratégicamente la ubicación de los SUDS, que actúan como elementos clave para mitigar los riesgos de inundación urbana en la zona de estudio. Los resultados revelaron que las configuraciones óptimas de SUDS pueden reducir las inundaciones hasta en un 76 % para un periodo de retorno $T_r = 25$ años. En conclusión, el modelo adaptativo demostró su capacidad para identificar las ubicaciones y tipologías de SUDS que disminuyen la inundación y minimizan los costos y se adaptan a las condiciones específicas de cada área.

1. Introducción

El crecimiento acelerado de las ciudades, la urbanización descontrolada y los efectos del cambio climático han incrementado los desafíos en la planificación y gestión de sistemas de drenaje pluvial urbano. Los enfoques convencionales, diseñados principalmente para captar y evacuar rápidamente la escorrentía superficial, presentan limitaciones al operar bajo supuestos de diseño que no consideran la variabilidad climática y la evolución de las condiciones urbanas. Esta falta de flexibilidad genera un aumento en la frecuencia e intensidad de inundaciones, con consecuencias directas en la infraestructura y la seguridad de la población [1], [2]. La urbanización ha reducido drásticamente la capacidad de infiltración natural del suelo, aumentando el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial. Como resultado, se intensifican los caudales pico y se acorta el tiempo de respuesta del sistema de drenaje, incrementando la vulnerabilidad ante eventos extremos [3], [4]. En este contexto, ha surgido la necesidad de implementar estrategias sostenibles que refuercen la resiliencia hidráulica de las redes de drenaje, minimicen el impacto de las inundaciones y fomenten una gestión integral del agua en entornos urbanos. El interés en soluciones alternativas ha llevado al desarrollo de enfoques como el Desarrollo de Bajo Impacto (LID), las Mejores Prácticas de Gestión (BMPs), el Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD) y los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) [5], [6], [7]. Estos sistemas han sido ampliamente estudiados por su capacidad para reducir la magnitud de

las inundaciones y mejorar la sostenibilidad de la infraestructura urbana, demostrando que pueden ser beneficiosos en diversos contextos [8], [9], [10].

A pesar de su efectividad, la adopción de SUDS enfrenta barreras relacionadas con la falta de normativas claras, la incertidumbre sobre su eficiencia en distintos contextos urbanos y la necesidad de metodologías robustas para su integración en los sistemas de drenaje convencionales [11], [12]. Para abordar estas limitaciones, estudios recientes sugieren que la implementación de esquemas de optimización y modelado hidrológico e hidráulico conjunto e intensivo permitirían mejorar su implementación y maximizar sus beneficios que pueden obtenerse [13], [14], [15]. La complejidad del análisis radica en que la implementación y configuración de estos sistemas genera respuestas hidrológicas variables, que dependen de su ubicación, tipo y tamaño. Esto implica que su desempeño no solo afecta el comportamiento local del drenaje, sino que también influye en el funcionamiento global de la red. A medida que la escala de la red aumenta, las posibles combinaciones de ubicación y dimensionamiento de los SUDS crecen exponencialmente, lo que convierte la búsqueda de una solución óptima en un desafío complejo. En este contexto, el presente estudio propone desarrollar un esquema de optimización multiobjetivo inteligente, capaz de evaluar múltiples configuraciones y garantizar un equilibrio entre la eficiencia hidráulica local de los SUDS y el desempeño global de la red bajo distintos escenarios de análisis.

2. Materiales y métodos

El modelo utilizado está integrado dentro de la herramienta Computational Hydrology and Hydraulic Aider Kit (Chaak) [16] y se estructura en torno a un esquema de optimización multiobjetivo diseñado para identificar configuraciones óptimas de SUDS en redes de drenaje urbano. El esquema planteado busca la minimización de los costos de implementación. Dado que la integración de los SUDS tiene como objetivo mejorar la capacidad de drenaje y mitigar el riesgo de inundaciones mediante la optimización de su ubicación, tipología y dimensiones dentro del sistema, es fundamental adoptar un enfoque flexible para la evaluación económica. Para ello, los costos de implementación de cada sistema se estiman mediante un esquema de precios unitarios asociados a la variable de optimización proporcionando así una evaluación integral y realista de la inversión requerida.

Durante el esquema iterativo se generan múltiples configuraciones de SUDS para su integración en la red de drenaje y se evalúa su desempeño mediante simulaciones hidrológicas e hidráulicas. La modelación del proceso lluvia-escorrentía se lleva a cabo mediante un esquema de embalse no lineal con flujo en onda cinemática [17], mientras que el tránsito hidráulico se simula utilizando tanto la onda cinemática como la onda dinámica [18]. Los SUDS se representan bajo distintas tipologías, incluyendo retención, detención e infiltración, o bien mediante un modelo de capas estratificadas que captura su comportamiento hidrológico e hidráulico en detalle. Adicionalmente, la modelación de la inundación superficial se realiza mediante un esquema de flujo bidimensional (2D) basado en Autómatas Celulares [19], lo que permite una sincronización espaciotemporal con el modelo de la red de drenaje. Esta integración facilita la transferencia bidireccional de flujos entre la red y la superficie, posibilitando la estimación de variables clave como el área afectada, la

magnitud y la rapidez de la inundación.

De esta forma y tomando la información generada de las simulaciones hidrológico-hidráulicas el proceso de optimización es dirigido por un algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II [20], el cual refina iterativamente las soluciones obtenidas. Este enfoque garantiza un diseño que maximiza el desempeño global del sistema para las funciones evaluadas, asegurando al mismo tiempo la eficiencia y efectividad de cada intervención a nivel local. Finalmente, para evaluar el desempeño del esquema de optimización, se desarrolló un caso de prueba aplicado a la cuenca del río Verdiguél. Este análisis permitió validar el funcionamiento del modelo en un entorno real, caracterizado por condiciones hidrológicas y urbanas complejas. A través de la integración de SUDS y la optimización multiobjetivo, se exploraron diversas configuraciones de drenaje con el objetivo de mejorar la resiliencia del sistema ante eventos de precipitación extrema.

3. Resultados y discusión

El área de estudio sobre la cual se implementó el esquema de optimización corresponde a una subcuenca de la cuenca urbana del río Verdiguél (coordenadas geográficas extremas: $9^{\circ}18'32''\text{N}$ – $99^{\circ}39'53.0''\text{O}$ y $19^{\circ}15'48''\text{N}$ $99^{\circ}38'01.0''\text{O}$), ubicada en la ciudad de Toluca, a unos 66 km al suroeste de la Ciudad de México y cuya longitud de red es de 70.05 km y tuberías con diámetros entre 0.3-2.29 m (Fig. 1).

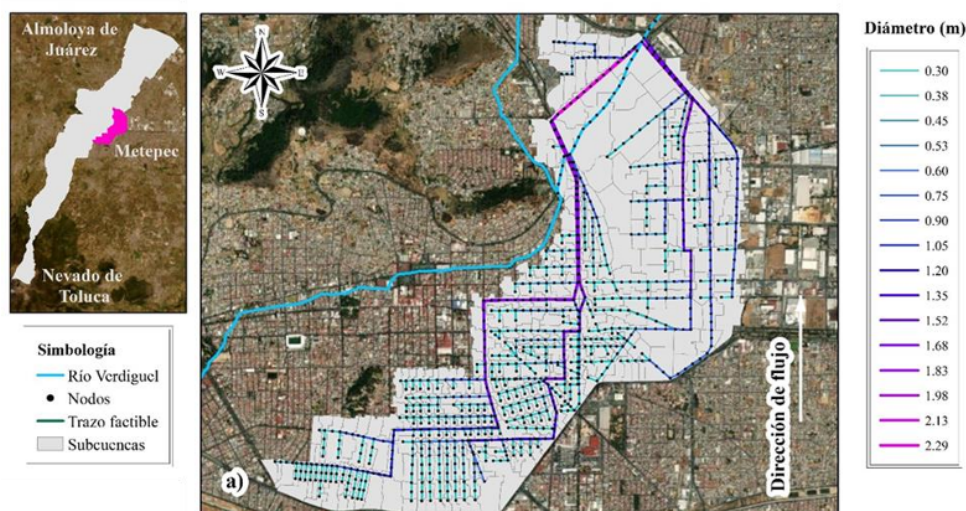


Figura 1: Zona de estudio

La implementación de SUDS está estrechamente ligada a las características específicas del sitio de análisis, ya que su efectividad depende de factores como la topografía, el tipo, disponibilidad y uso de suelo, el uso del suelo, la capacidad de infiltración y la infraestructura existente. En el caso de estudio, se evaluaron 376 posibles SUDS distribuidos a lo largo del área de captación, incluyendo 249 tanques de lluvia, 85 jardines de lluvia, 5 pavimentos permeables y 37 tanques de detención (Figura 2a). El proceso de optimización se realizó considerando un evento de precipitación con un periodo de retorno de 25 años,

obteniendo una configuración óptima de SUDS que sugiere un equilibrio entre resiliencia hidráulica y costos de implementación. Los resultados de esta optimización se presentan en la Figura 2b.

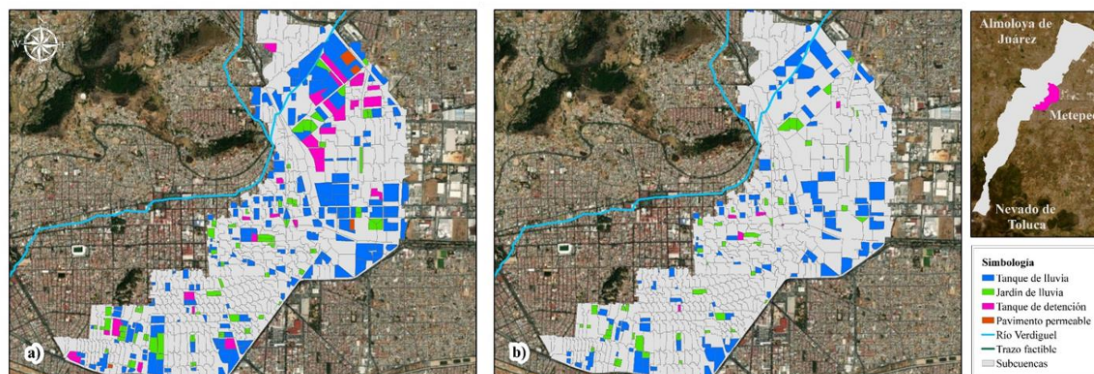


Figura 2: Ubicación de los diferentes tipos de SUDS analizados en la zona de estudio. a) Sistemas potenciales; b) Configuración óptima.

El proceso de optimización genera un conjunto de soluciones que conforman un frente de Pareto, en el cual se asume que no es posible mejorar un objetivo sin afectar negativamente el otro. En la Figura 3a, se muestra la evolución del frente de Pareto a lo largo de las iteraciones del algoritmo, evidenciando cómo las soluciones van convergiendo hacia una distribución óptima que equilibra los objetivos de costo e inundación generada.

Por otro lado, en la Figura 3b, se presenta la ubicación del punto rodilla, el cual representa la configuración seleccionada dentro del frente de Pareto. Este punto es crítico en la toma de decisiones, ya que ofrece un balance entre ambos objetivos, evitando soluciones extremas que puedan ser demasiado costosas que mitiguen mínimamente la inundación.

En relación con la solución óptima seleccionada, se observa que la configuración minimiza la inundación y requeriría un incremento del 55 % en la escala normalizada, lo que podría resultar inviable desde un punto de vista económico. Por otro lado, la alternativa más económica reduciría la inundación del sistema en un 65 % en la misma escala, lo que comprometería su capacidad para responder eficazmente a eventos extremos. La selección del punto rodilla permite, por tanto, alcanzar un equilibrio entre costo e inundación garantizando una mejora funcional del sistema sin incurrir en costos excesivos.

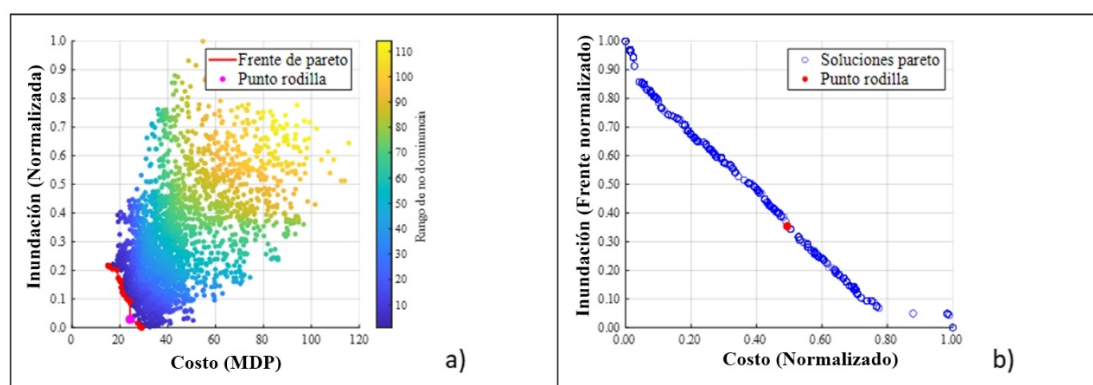


Figura 3: Optimización de los SUDS potenciales en la Zona 6. a) Frente de Pareto; b) Solución óptima.

Si se considera que el costo total aproximado de la red de drenaje es de 222.57 MDP, la implementación de los SUDS bajo la configuración óptima representa el 11 % del costo total de construcción bajo un enfoque convencional (24.28 MDP). Por otro lado, la influencia en el control de inundación para el periodo de retorno analizado permite disminuir el volumen de surgencia de la red de drenaje hasta en un 76 % y 13 % para los periodos de retorno de 25 y 50 años (Tabla 1), mientras que en la Figura 4 se presenta un mapa de inundación máxima para el periodo de retorno de 25 años.

Tabla 1: Volúmenes de inundación antes y después de incorporar SUDS

Periodo de retorno (años)	Volumen de inundación (m ³)		Reducción (m ³) (%)	
	Sin SUDS	Con SUDS		
25	7,840	1,880	5,960	76
50	14,320	12,460	1,860	13

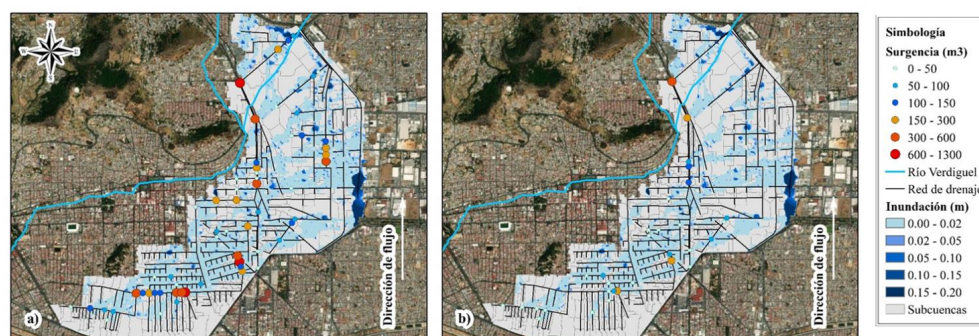


Figura 4: Mapa de inundación en la zona de estudio para $Tr=25$ años. a) Sistemas potenciales; b) Configuración óptima.

Los resultados obtenidos reflejan la influencia de las condiciones urbanas y la distribución espacial de las posibles ubicaciones para la implementación de SUDS en la zona de estudio, caracterizada por un alto grado de urbanización. En particular, la configuración

óptima seleccionada por el algoritmo prioriza la implementación de sistemas con capacidad de retención activa, los cuales almacenan un volumen específico de escorrentía que no retorna al sistema de drenaje, contribuyendo así una mayor reducción de inundación.

Además, el esquema de optimización demuestra su capacidad para discernir entre distintos escenarios, buscando minimizar el impacto de la inundación y reducir la perturbación en el sistema dado el conjunto de opciones disponibles. Este comportamiento subraya la adaptabilidad del modelo para identificar estrategias eficientes dentro del espacio de soluciones factibles. En última instancia, la configuración final depende de las condiciones específicas del análisis, cuya complejidad aumenta significativamente a medida que se incorporan más variables y detalles en el modelo. Esto resalta la importancia de evaluar el desempeño de los SUDS bajo un enfoque integral, considerando tanto su funcionalidad hidráulica hidrológica global, así como su viabilidad económica y operativa dentro del contexto urbano analizado.

4. Conclusiones

El esquema de optimización inteligente basado en NSGA-II ha demostrado ser una herramienta efectiva para el análisis y diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), permitiendo identificar de manera precisa las tipologías, dimensiones geométricas y ubicaciones óptimas disminuyen la inundación global de la red de drenaje.

Su estructura le permite ajustarse a las necesidades específicas de cada análisis, maximizando la capacidad funcional del sistema de drenaje mientras minimiza los costos, lo que lo convierte en una herramienta flexible y escalable para diferentes contextos urbanos. La innovación del esquema propuesto radica en su capacidad para integrar múltiples procesos interrelacionados, utilizando esquemas de simulación multidimensional como base para generar una respuesta integral del funcionamiento global del sistema. Esto permite identificar relaciones complejas y no evidentes en el diseño de SUDS, optimizando de este modo la toma de decisiones y la eficiencia en el diseño del sistema de drenaje.

Direcciones de correo de los autores

BECERRIL LARA, J. M.: jmbecerrill@uaemex.mx

SALINAS TAPIA, H.: hsalinast@uaemex.mx

DÍAZ DELGADO, C.: cdiazd@uaemex.mx

ARACÓN HERNÁNDEZ, J. L.: jose.aragon@unam.mx

FÉLIX FÉLIX, J.R.: jr.felix@correo.ler.uam.mx

ALVAREZ MEJIA, A. L.: alalvarezm@uaemex.mx

Referencias

- [1] A. Akter, A. H. Tanim y M. K. Islam, «Possibilities of urban flood reduction through distributed-scale rainwater harvesting,» *Water Science and Engineering*, vol. 13, n.º 2, págs. 95-105, 2020. DOI: [10.1016/j.wse.2020.06.001](https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.06.001)
- [2] C. Li, M. Liu, Y. Hu, R. Zhou, W. Wu y N. Huang, «Evaluating the runoff storage supply-demand structure of green infrastructure for urban flood management,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, pág. 124 420, 2021. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.124420](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124420)
- [3] K. Byun y A. F. Hamlet, «A risk-based analytical framework for quantifying non-stationary flood risks and establishing infrastructure design standards in a changing environment,» *Journal of Hydrology*, vol. 584, pág. 124 575, 2020. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.124575](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124575)
- [4] P. Hosseinzadehtalaei, H. Tabari y P. Willems, «Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe,» *Journal of Hydrology*, vol. 590, pág. 125 249, 2020. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.125249](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125249)
- [5] S. Cotterill y L. J. Bracken, «Assessing the Effectiveness of Sustainable Drainage Systems (SuDS): Interventions, Impacts and Challenges,» *Water*, vol. 12, n.º 11, 2020. DOI: [10.3390/w12113160](https://doi.org/10.3390/w12113160)
- [6] S. H. Pour, A. K. A. Wahab, S. Shahid, M. Asaduzzaman y A. Dewan, «Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 62, pág. 102 373, 2020. DOI: [10.1016/j.scs.2020.102373](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102373)
- [7] A. K. Sharma et al., «Water Sensitive Urban Design: An Investigation of Current Systems, Implementation Drivers, Community Perceptions and Potential to Supplement Urban Water Services,» *Water*, vol. 8, n.º 7, 2016. DOI: [10.3390/w8070272](https://doi.org/10.3390/w8070272)
- [8] K. M. M. Borgonia y R. L. Fornis, «Estimation of the reduction in flood peak and flood volume due to rooftop rainwater harvesting for nonpotable use,» en *AIP Conference Proceedings*, vol. 2278, 2020, pág. 20 042. DOI: [10.1063/5.0014516](https://doi.org/10.1063/5.0014516)
- [9] A.-F. Morote, M. Hernández y S. Eslamian, «Rainwater harvesting in urban areas of developed countries. The state of the art (1980-2017),» *International Journal of Hydrology Science and Technology*, vol. 10, n.º 5, págs. 448-470, 2020. DOI: [10.1504/IJHST.2020.109952](https://doi.org/10.1504/IJHST.2020.109952)
- [10] L. Zhang, Z. Ye y S. Shibata, «Assessment of Rain Garden Effects for the Management of Urban Storm Runoff in Japan,» *Sustainability*, vol. 12, n.º 23, 2020. DOI: [10.3390/su12239982](https://doi.org/10.3390/su12239982)
- [11] V. De Bilt, E. Nieuwenhuis, F. van de Ven y J. Langeveld, «Root causes of failures in sustainable urban drainage systems (SUDS): an exploratory study in 11 municipalities in The Netherlands,» *Blue-Green Systems*, vol. 3, n.º 1, págs. 31-48, 2021. DOI: [10.2166/bgs.2021.002](https://doi.org/10.2166/bgs.2021.002)

- [12] M. Gimenez-Maranges, J. Breuste y A. Hof, «Sustainable Drainage Systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: A review,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 255, pág. 120 191, 2020. doi: [10.1016/j.jclepro.2020.120191](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120191)
- [13] S. L. J. Ariza et al., «A Multicriteria Planning Framework to Locate and Select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban Areas,» *Sustainability*, vol. 11, n.º 8, págs. 1-33, 2019.
- [14] P. Barros Ramalho Alves, I. Alexandra Alves Rufino, P. Hermínio Cunha Feitosa, S. Djordjević y A. Javadi, «Land-Use and Legislation-Based Methodology for the Implementation of Sustainable Drainage Systems in the Semi-Arid Region of Brazil,» *Sustainability*, vol. 12, n.º 2, 2020. doi: [10.3390/su12020661](https://doi.org/10.3390/su12020661)
- [15] K. Potter y T. Vilcan, «Managing urban flood resilience through the English planning system: insights from the ‘SuDS face’,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 378, n.º 2168, pág. 20 190 206, 2020. doi: [10.1098/rsta.2019.0206](https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0206)
- [16] J. M. Becerril-Lara, H. Salinas-Tapia, C. Díaz-Delgado, D. García-Pulido y A. L. Alvarez-Mejía, «Chaak: Urban Hydrological Impact modeling,» *SoftwareX*, vol. 27, pág. 101 859, 2024. doi: [10.1016/j.softx.2024.101859](https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101859)
- [17] A. L. Rossman y W. Huber, «Storm Water Management Model Reference Manual Volume I - Hydrology,» United States Environmental Protection Agency, inf. téc., 2016.
- [18] A. L. Rossman y W. Huber, «Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics,» United States Environmental Protection Agency, inf. téc., 2016.
- [19] M. Guidolin, A. S. Chen, B. Ghimire, E. C. Keedwell, S. Djordjević y D. A. Savić, «A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 84, págs. 378-394, 2016. doi: [10.1016/j.envsoft.2016.07.008](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.008)
- [20] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.