

Modelo acoplado 1D/2D a gran escala para el Área Metropolitana de Barcelona: desarrollo y métodos de “data gap filling”.

Alex de la Cruz-Coronas ^{a, b}, Beniamino Russo ^b

^a AQUATEC Soluciones medioambientales S.A.U., Unidad de resiliencia y cambio climático, Passeig de la Zona Franca, 46, 08038 Barcelona.

^b Institut de Recerca Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-BarcelonaTech), Carrer Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona.

Línea temática | Agua y ciudad.

RESUMEN

En el marco del proyecto europeo ICARIA, se está desarrollando un modelo hidráulico acoplado 1D/2D para evaluar el riesgo de inundación de infraestructuras y servicios en el Área Metropolitana de Barcelona. Ante la falta de datos completos sobre las redes de alcantarillado municipales, se propone una metodología para generar redes de alcantarillado sintéticas utilizando información abierta y criterios de dimensionamiento hidráulicos. El modelo se construye con Infoworks Ultimate y abarca una superficie de 636 km² mediante una malla de 6,5 millones de elementos. En este trabajo se evalúa la validez de una metodología de generación de redes de alcantarillado sintéticas comparándolas con redes reales en Sant Feliu de Llobregat mediante simulaciones de eventos de lluvia con distintos periodos de retorno. Los resultados muestran buena concordancia en los patrones de inundación y los indicadores de desempeño, especialmente para eventos más extremos. Esta metodología permite avanzar en la modelización y planificación de los sistemas de drenaje urbano incluso en contextos con limitaciones de datos, lo que puede dar soporte al desarrollo de Planes de Gestión Integral de Sistemas de Saneamiento (de acuerdo con el RD665/2023).

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son unos de los desastres naturales más dañinos para las infraestructuras y las actividades humanas, y las proyecciones de cambio climático indican que podrían volverse más frecuentes en el futuro (Kundzewicz et al., 2014; Svetlana et al., 2015). Las áreas urbanas, debido a sus características intrínsecas son especialmente vulnerables a esta amenaza. Además, concentran una gran cantidad de servicios e infraestructuras interdependientes que pueden agravar el riesgo hidráulico. La modelización de inundaciones urbanas es clave para comprender y, mejorar la adaptación de nuestro territorio frente a los efectos de estos eventos (Henonin et al., 2013). En particular, los modelos acoplados 1D/2D representan un enfoque avanzado para evaluar la peligrosidad y el riesgo hidráulico asociados a inundaciones urbanas. Sin embargo, los grandes requerimientos de datos para caracterizar el dominio 1D limitan su desarrollo (Montalvo et al., 2024). Este documento presenta los avances en el desarrollo de un modelo acoplado 1D/2D del Área Metropolitana de Barcelona (AMB) centrándose en: (1) la recopilación de datos y configuración del modelo, y (2) en la propuesta de una metodología de generación de una red de alcantarillado sintética (SSN, por sus siglas en inglés) desarrollada para cubrir las carencias de datos existentes.

CASO DE ESTUDIO

Con 36 municipios y 3,3 millones de habitantes en una extensión de 636 km², el AMB es la conurbación más grande del Mediterráneo occidental. Esta región combina ciudades densamente pobladas y zonas industriales en las llanuras costeras y

deltaicas, rodeadas por terrenos montañosos. La precipitación media anual ronda los 600 mm, pero con frecuencia el 50 % de esta cantidad se concentra en dos o tres eventos puntuales (Monjo et al., 2023). Las recientes inundaciones que afectaron a la región vecina de Valencia en noviembre de 2024 ponen de relieve la vulnerabilidad de este tipo de territorios.

METODOLOGIA

Modelo acoplado 1D/2D metropolitano

Dentro del marco del proyecto europeo ICARIA, se está desarrollando un modelo acoplado 1D/2D para el caso de estudio del AMB utilizando el software comercial de modelización Infoworks Ultimate, (versión 2025.5). El dominio hidráulico, de aproximadamente 636 km², da lugar a una malla no estructurada de 6.5 millones de elementos. La infiltración y la rugosidad se caracterizan mediante la ecuación de Horton y los coeficientes de Manning, respectivamente, y sus parámetros se definen según los distintos usos del suelo presentes en las áreas de estudio. La escorrentía superficial se modeliza siguiendo un enfoque híbrido que representa con precisión el comportamiento real del agua en zonas urbanizadas. Por un lado, la escorrentía generada en áreas edificadas se dirige directamente a la red de alcantarillado (enfoque semi-distribuido), mientras que las calles y zonas no urbanizadas se discretizan en una malla (enfoque totalmente distribuido) para calcular el flujo superficial (ver Figura 1a). El modelo incluye la presencia de rejillas de captación como elemento clave para permitir el intercambio de agua entre ambos dominios. Su capacidad de drenaje se expresa como eficiencia hidráulica de entrada, que corresponde a la relación entre el caudal interceptado y el caudal que se aproxima. La Figura 1b ilustra los principales elementos incluidos en el modelo.



Figura 1 | Configuración del modelo 1D/2D: (a) estructura del modelo híbrido que muestra los elementos de malla 2D (triángulos verdes) y las áreas urbanizadas (polígonos morados); y (b) representación detallada de la red de drenaje y sus elementos principales.

El principal resultado del modelo son los mapas de inundación que muestran la profundidad y la velocidad del agua en las zonas afectadas. Estos resultados se integran con modelos sectoriales de impacto que permiten una evaluación integral de los efectos tangibles, tanto directos como indirectos, sobre los servicios y activos críticos del AMB (por ejemplo, propiedades, red de transporte, red de distribución eléctrica, servicios de gestión de residuos, estaciones depuradoras de aguas residuales). Además, se consideran los impactos intangibles asociados al riesgo para peatones y vehículos.

Cada uno de los 36 municipios del AMB es titular de su propio sistema de alcantarillado. Adicionalmente, la autoridad metropolitana es titular de una red “supramunicipal” o “metropolitana” que recoge las aguas residuales de todas las redes municipales y las transporta hasta una de las 7 estaciones depuradoras de aguas residuales de la región. Esta realidad se traduce en un entramado complejo de titularidades y responsables de datos que ha dificultado el proceso de recopilación de información.

A pesar de estas dificultades, de los 36 municipios se dispone de información sobre la red de alcantarillado en 25 de ellos. Esto supone una limitación crítica para 11 municipios, que suman 196 km² y una población de 0,35 millones de personas del AMB.

Redes de drenaje sintéticas

Para superar esta carencia de datos, se ha desarrollado una metodología para generar redes de alcantarillado sintéticas (SSN, por sus siglas en inglés) a nivel municipal. Consiste en un proceso en Python que permite aproximar el trazado y las dimensiones de una red de alcantarillado a partir de información geográfica, normalmente disponible en repositorios de código abierto, y un conjunto de parámetros que definen las características estructurales de los elementos del alcantarillado. Inicialmente, se preprocesan los datos de entrada, entre ellos el dominio hidráulico, el Modelo Digital del Terreno, el trazado de calles, la localización de edificios, los cursos de agua y las características de los elementos de la red. A continuación, se define el trazado de la red de alcantarillado basándose en el mapa de calles, ubicando pozos de registro en intersecciones y a intervalos regulares utilizando algoritmos basados en criterios de similitud entre las distintas redes de la región analizada. Los puntos de desagüe del modelo se sitúan en las zonas más bajas del dominio del modelo. Seguidamente, el Modelo Digital del Terreno se modifica para adaptarse a los requerimientos del modelado hidrológico. El dimensionamiento de la red se lleva a cabo evaluando las rutas preferenciales del agua, asignando órdenes a los cauces y tuberías, y determinando los diámetros y profundidades de las tuberías en consecuencia. Finalmente, una rutina identifica y corrige posibles errores en la SSN generada, garantizando la coherencia y precisión de la red final. Esta metodología ha sido probada en el municipio de Sant Feliu de Llobregat (dentro del AMB). Se desarrollaron en paralelo dos modelos acoplados 1D/2D: uno basado en la red de alcantarillado real (ASN, por sus siglas en inglés), obtenida del último Plan Director de Drenaje local, y otro que incluye una SSN generada mediante la metodología descrita. Se simularon un total de cuatro escenarios de lluvia en ambos modelos, correspondientes a eventos sintéticos de 1 hora con periodos de retorno de 1 (T1), 2 (T2), 5 (T5) y 10 años (T10). Los resultados de ambos modelos se compararon considerando el modelo basado en la red real como referencia para evaluar la validez del modelo con red sintética.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y comparativas presentados demuestran la validez de la metodología propuesta para realizar evaluaciones aproximadas de inundaciones urbanas cuando no se dispone de datos sobre la red de alcantarillado. Tal como se refleja en la Figura 2, la SSN presenta un trazado similar al de la red de drenaje real en cuanto a extensión y conexiones entre tuberías. Además, se observa una buena coincidencia en la localización de las redes principales, que corresponden a tuberías con un diámetro de 2 metros o más. Este aspecto es crucial para asegurar que los resultados basados en la SSN sean fiables. Sin embargo, la metodología no consigue representar la existencia de tuberías paralelas ni la ubicación de conductos en zonas no urbanizadas. Los mapas de inundación máxima para cada escenario de simulación se han contrastado en base a indicadores que permiten una cuantificación celda por celda de la precisión de las zonas inundadas. Estos índices son: el Hit Rate), el False Alarm Ratio y el Critical Success Index (ver Tabla 1) siguiendo la metodología propuesta en Montalvo et al., 2024. En términos generales, la SSN es capaz de reproducir adecuadamente los resultados de referencia. La mayor precisión se observa en las simulaciones con periodos de retorno más altos, mientras que en los más bajos la SSN tiende a sobreestimar la extensión del área inundada.

Tabla 1 | Indicadores para los escenarios ejecutados en los modelos SSN y ASN.

Indicadores	Evento de lluvia			
	T1	T2	T5	T10
Hit Rate	0,76	0,86	0,86	0,90
False Alarm Rate	0,11	0,11	0,14	0,09
Critical Success Index	0,69	0,77	0,75	0,82

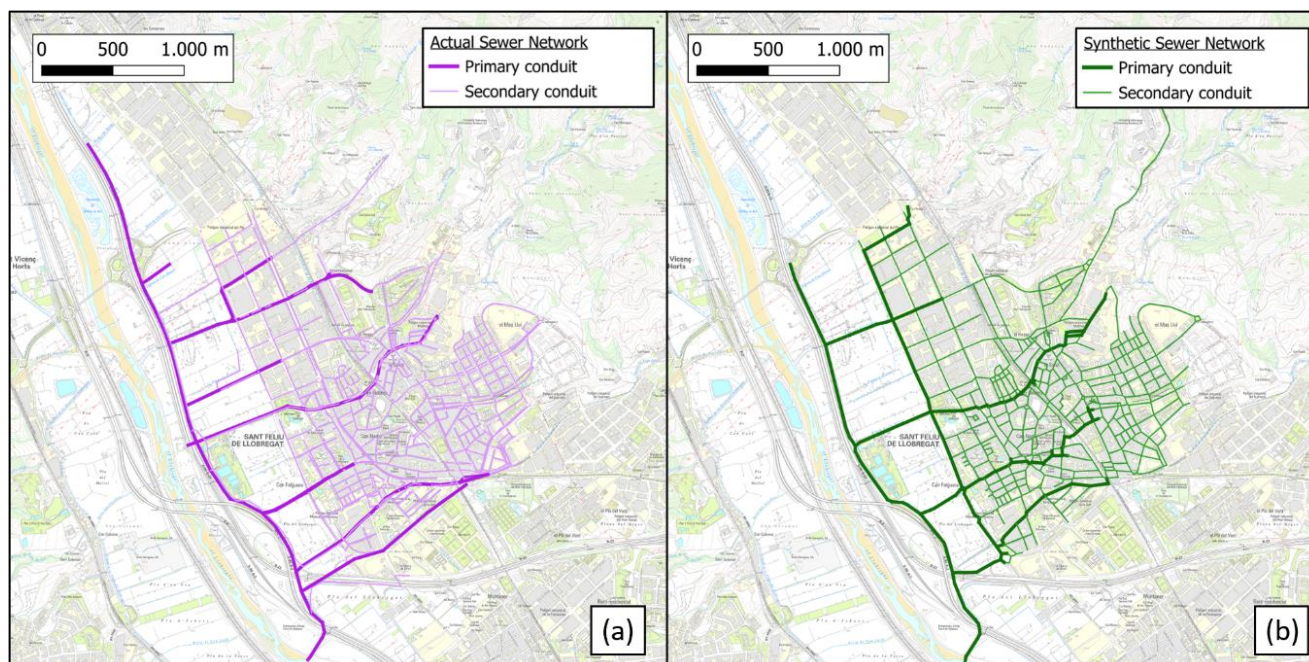


Figura 2 | Red de tuberías primarias y secundarias de la red de alcantarillado (a) real y (b) sintética.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del trabajo presentado son las siguientes: (1) los modelos acoplados 1D/2D son una herramienta válida para evaluar el riesgo de inundación en grandes áreas metropolitanas; (2) los amplios requerimientos de datos de este enfoque limitan su aplicabilidad; y (3) la metodología de generación de SSN presentada es una herramienta válida para cubrir falta información en este contexto. El trabajo futuro se centrará en finalizar el modelo de inundaciones urbanas del AMB utilizando la metodología mencionada para completar las lagunas de datos sobre la red de alcantarillado.

AGRADECIMIENTOS

Financiado por el proyecto Horizon Europe ICARIA: Improving Climate Resilience of Critical Assets (GA 101093806).

REFERENCIAS

- Henonin, J., Russo, B., Mark, O., & Gourbesville, P. (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling—A state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 717-736.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.
- Monjo, R., Locatelli, L., Milligan, | John, Torres, | Luis, Velasco, | Marc, Gait, E., Ortoles, J. P., Redolat, D., Russo, | Beniamino, & Ribalaygua, J. (2023). *Estimation of future extreme rainfall in Barcelona (Spain) under monofractal hypothesis*.
- Montalvo, C., Reyes-Silva, J. D., Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2024). Urban pluvial flood modelling in the absence of sewer drainage network data: A physics-based approach. *Journal of Hydrology*, 634, 131043.
- Russo, B., Sunyer, D., Velasco, M., & Djordjević, S. (2015). Analysis of extreme flooding events through a calibrated 1D/2D coupled model: The case of Barcelona (Spain). *Journal of Hydroinformatics*, 17(3), 473-491.
- Russo, B., Valentín, M. G., & Tellez-Álvarez, J. (2021). The Relevance of Grated Inlets within Surface Drainage Systems in the Field of Urban Flood Resilience. A Review of Several Experimental and Numerical Simulation Approaches. *Sustainability*, 13(13), 7189.
- Svetlana, D., Radovan, D., & Ján, D. (2015). The Economic Impact of Floods and their Importance in Different Regions of the World with Emphasis on Europe. *Procedia Economics and Finance*, 34, 649-655.
- VIII Jornadas de Ingeniería del Agua. 22 y 23 de octubre de 2025. Zaragoza