

02-003 – GIS-based allocation of Sustainable Drainage Systems (SUDS): application to the municipality of Madrid – Dotación óptima de Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS) basada en GIS aplicación al municipio de Madrid

Zubelzu Mínguez, Sergio¹; Monachese, Anna Pia¹; Casitas, Álvaro¹; Gómez-Villarino, Teresa¹;
López-Santiago, Jesús¹

(1) Universidad Politécnica de Madrid

 Spanish  Spanish

Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) represent a paradigm shift in managing runoff water in cities. This management paradigm advocates restoring the natural conditions of watersheds by promoting the local use of hydrological resources. Numerous studies have analyzed the alternatives for locating or implementing SUDS at different scales. Our proposal in this work assumes that the spatial scope of planning should be the urban watershed and that SUDS should be designed with a specific purpose. Based on these premises, we studied the urban watersheds in the municipality of Madrid. Using various tools implemented in QGIS, we analyzed the availability of water resources through hydrological modeling conducted in QGIS and assessed the potential for storing surface runoff to supply water and reduce irrigation needs in the green areas within each watershed.

Keywords: *Urban hydrology; Sustainable drainage systems; Runoff; Modeling; Climate change*

Los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) representan un cambio de paradigma en la gestión de las aguas de escorrentía en las ciudades. Este paradigma de gestión aboga por reponer las condiciones naturales de las cuencas promoviendo el uso de los recursos hidrológicos localmente. Numerosos estudios se han ocupado de analizar las alternativas de localización o implantación de SUDS a diferentes escalas. Nuestra propuesta en este trabajo asume que el ámbito espacial de la planificación debe ser la cuenca urbana y que los SUDS deben plantearse con un fin. Estudiamos con esta premisas las cuencas urbana del municipio de Madrid y mediante diferentes herramientas implementadas en QGIS analizamos la disponibilidad de recursos hídricos a partir de modelizaciones hidrológicas implementada en QGIS y valoramos el posible almacenamiento de la escorrentía superficial para proveer de agua para reducir las necesidades de riego en las zonas verdes existentes en cada una de las cuencas.

Palabras claves: *Hidrología urbana; Sistemas de drenaje sostenible; Escorrentía; Modelización; Cambio climático*

Acknowledgments:

Este proyecto de investigación ha sido financiado por la Comunidad de Madrid a través de la convocatoria de Ayudas a la Investigación para Jóvenes Investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid.



©2025 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En los últimos años, los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) se han extendido rápidamente por muchos países como infraestructuras para complementar las redes tradicionales de saneamiento. Como se evidencia en la literatura, además de ayudar a gestionar los eventos de lluvia en ciudades brindan múltiples beneficios ambientales, entre ellos la reducción de los impactos del cambio climático (Charlesworth, 2010; Warwick y Charlesworth, 2012; Arahuetes y Olcina Cantos, 2019; D'Ambrosio et al., 2023) o beneficios ambientales y sociales (O'Brien, 2015; Aerts et al., 2018; Andersson et al. 2019; Krivtsov et al., 2022).

El concepto SUDS comprende una amplia gama de infraestructuras destinadas a restaurar el equilibrio hídrico natural de las cuencas en las zonas urbanas. Como se discutió en Monachese et al. (2024) o en Rodríguez-Rojas et al. (2024), a pesar de su múltiple despliegue en todo el mundo, se requiere una planificación estratégica de la provisión de SUDS que comprenda balances de cuenca a escala urbana para proporcionar una implementación local específica de SUDS a menor escala.

En la literatura hay muchos ejemplos de trabajos que analizan la dotación de SUDS a escala de ciudad (Andrés-Doménech et al., 2018; Jiménez Ariza et al, 2019; Dell et al. 2021; Lashford et al., 2022) si bien no existen estudios que aborden el estudio de ambas prestaciones con una perspectiva integrada que conduzca a determinar la provisión óptima de SUDS.

En el presente trabajo presentamos un método para evaluar la dotación óptima de SUDS a escala de ciudad basado en un enfoque territorial en dos niveles de estudio (cuenca urbana y parcela).

2. Metodología

El método propuesto estructura y jerarquiza los pasos orientados a la toma de decisiones acerca de la dotación óptima de SUDS y evaluar su eficiencia y rendimientos hidrológicos y económicos. La técnica propuesta sigue un proceso de downscaling basado en dos escalas espaciales:

Escala de ciudad. Se persigue identificar cuencas urbanas, parcelas objetivo de la reutilización y evaluar los resultados agregados mediante la aplicación de modelos hidrológicos. Se realizan cálculos agregados para el conjunto de parcelas susceptibles de recibir los SUDS con el objeto de facilitar el análisis estratégico de la dotación de SUDS a nivel planeamiento general para todo el municipio.

La determinación de la dotación óptima de SUDS exige determinar un volumen de agua que los SUDS han de ser capaces de gestionar. En el presente trabajo se ha optado a escala de cuenca por definir un volumen máximo de SUDS equivalente al 10 % de la escorrentía potencialmente generada durante el histórico de datos disponibles y vincular la capacidad efectiva a una tasa de reutilización de las aguas de escorrentía.

Escala de parcela. Su objetivo es estudiar la eficiencia específica de la instalación de SUDS. Se propone combinar análisis hidrológicos y económicos. El estudio de detalle se realiza por parcelas específicas para la toma de decisiones ejecutivas en cada una de las parcelas objeto de análisis. Se ha estimado la superficies de balsa para gestionar en los SUDS el volumen de agua deseado en cada caso (suponiendo una profundidad de almacenamiento de 2 m).

Sacamos un número de curva promedio para cada buffer y estimamos las cantidades de cada uno de los tres componentes que se generarían en cada superficie de influencia y las opciones

de empleo del agua de escorrentía captada para reducir las demandas de riego en cada zona verde.

Se han hecho las simulaciones en cada parcela con diferentes volúmenes de SUDS posibles (desde un valor mínimo igual al 1% del promedio de escorrentía que se estima se generación de forma anual en los 76 años de previsión hasta el 99%) y estimado la reducción potencial de demanda de agua para riego procedente del exterior para cada parcela. Se ha estimado también el área que sería necesaria para almacenar ese volumen (se han supuesto que se almacena en forma de balsa con una profundidad de 2 m).

2.1 Modelo hidrológico

Para la determinación de la potencial generación de escorrentía se emplean datos de precipitación diarios y el modelo del número de curva del SCS cuyas expresiones se presentan en las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$E=(P-la)^2/(P-la+S) \quad (1)$$

$$S=25.4 \cdot (1000/CN-10) \quad (2)$$

$$la=0.2 \cdot S \quad (3)$$

Donde E representa el volumen de escorrentía que produce una tormenta de volumen acumulado P, la es la abstracción inicial, S la capacidad máxima de retención del sustrato tras el inicio de la escorrentía y CN es el número de curva específico para cada uso del suelo.

Para la integración del modelo en QGIS se han implementado sendas funciones en las herramientas de programación de QGIS codificadas en Python. La primera permite asignar un número de curva a cada uso del suelo específico. Las capas de usos del suelo del Ayuntamiento de Madrid codifican los usos y la función asigna a cada código un número de curva (estimado a partir del umbral mínimo de escorrentía definido en la Instrucción de Drenaje de Carreteras). Una vez asignados los números de curva el segundo paso consiste en estimar el volumen de escorrentía generado por los volúmenes de precipitación considerados. Este paso también ha implicado implementar una función en Python que permita estimar los volúmenes.

La determinación de las necesidades de riego a lo largo del ciclo se basa en un balance de agua en el suelo tal y como se define en las ecuaciones 4 y 5 siendo P la precipitación, I el riego, Inf la infiltración E la escorrentía, q el contenido de humedad, y c la fracción de agua para riego procedente de la escorrentía (R), k el coeficiente del cultivo y ET₀ la evapotranspiración potencial.

$$\theta_t = \theta_{t-1} + Inf_t + I_t + cR_t - k_t ET_{0t} \quad (4)$$

$$P_t = I_t + R_t \quad (5)$$

2.2 Evaluación económica

Para la evaluación económica de la posible implantación de SUDS se han empleado como indicadores el VAN (ecuación 6), la TIR (ecuación 7) y payback (ecuación 8).

$$VAN = -I_0 + \sum F_t \cdot (1+r)^{-t} \quad (6)$$

$$0 = -I_0 + \sum F_t \cdot (1+k)^{-t} \quad (7)$$

$$0 = -I_0 + \sum F_t \cdot (1+r)^{-t} \quad (8)$$

Donde I_0 representa la inversión inicial, F_i los flujos de caja del año i , r la tasa de actualización, k la TIR, y t el payback.

3. Resultados

3.1 Implementación del método

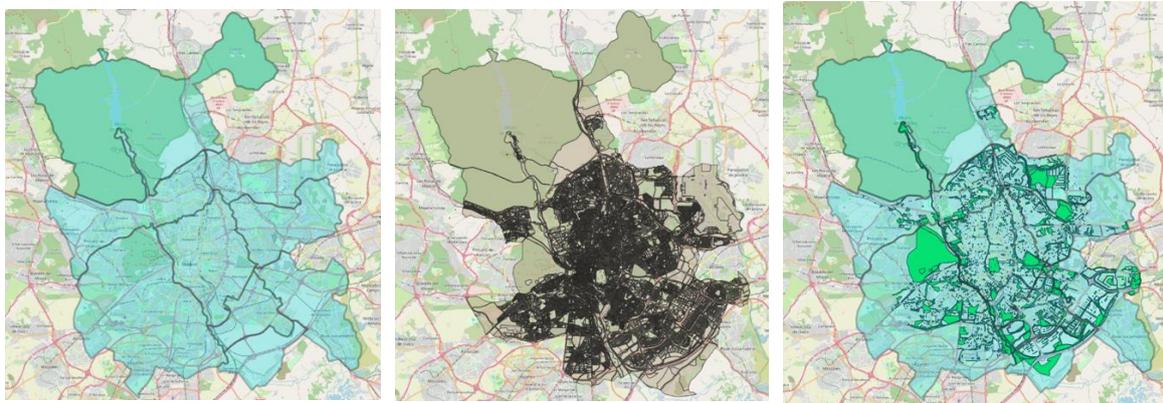
En lo sucesivo de cara a ejemplificar la aplicación del método presentaremos los pasos a nivel teórico y su aplicación al municipio de Madrid. Siguiendo el enfoque metodológico basado en la doble escala de análisis en lo sucesivo se presentan las técnicas empleadas en las dos escalas espaciales propuestas. Todas las transformaciones y tratamiento de información se ha realizado en QGIS integrando los modelos hidrológicos en Python también en ese programa. Para las simulaciones de los escenarios futuros se han empleado las estaciones meteorológicas incluidas en las simulaciones realizadas por AEMET. Se han empleado los escenarios ssp126 y ssp885 (modelo CMCC-CM2-SR5) por estaciones. Se ha seleccionado la estación más próxima de entre las que se incluyen en las simulaciones (ver tabla 1).

Tabla 1: Estaciones meteorológicas para cada cuenca.

Cuenca	Estación meteorológica
ERAR Monte El Pardo	El Goloso (3126Y)
ERAR Viveros	Ciudad Universitaria (3194U)
ERAR Valdebebas	Barajas (3129)
ERAR Butarque	Cuatro Vientos (3196)
ERAR China	Retiro (3195)
ERAR Rejas	Retiro (3195)
ERAR Gavia	Retiro (3195)
ERAR Sur Oriental	Arganda (3182Y)
ERAR Sur	Getafe (3200)

Escala de ciudad

La figura 1 muestra las cuencas drenantes existentes en el municipio de Madrid (determinadas por la estación depuradora de aguas a la que vierten cada una de las zonas), las parcelas de las que se han recopilado los usos del suelo (a nivel planeamiento general) de cara a aplicar el modelo hidrológico de generación de escorrentía y la relación de parcelas con uso zonas verdes sobre las que se han centrado los cálculos hidrológicos orientados a estimar la eficiencia de la posible implementación de SUDS.

Figura 1: Cuencas, parcelas a nivel urbanístico y parcelas con uso zonas verdes en el municipio de Madrid.

La tabla 2 muestra los números de curva promedio obtenidos empleando la función programada en Python integrada en QGIS.

Tabla 2: Números de curva promedio obtenidos para cada cuenca.

Cuenca	Número de curva promedio
ERAR Monte El Pardo	87.00
ERAR Viveros	88.47
ERAR Valdebebas	89.01
ERAR Butarque	88.68
ERAR China	92.93
ERAR Rejas	90.26
ERAR Gavia	90.79
ERAR Sur Oriental	91.32
ERAR Sur	89.64

A escala de cuenca urbana se asume que todo el agua generada en una franja de 1 km en torno a cada zona verde se puede captar y conducir para su uso en tales parcelas. Por esta razón se han delimitado buffers de 1 km con centro en el centroide de cada zona verde. Una vez identificados los buffers de 1 km de cada zona verde se han agrupado todos los buffers generando una superficie de potencial uso de aguas de escorrentía en cada cuenca. La figura 2 muestra los tres estados desde las parcelas de zonas verdes hasta las zonas de potencial captación y uso de aguas de escorrentía en cada cuenca (ajustando la delimitación de las zonas a los límites de cada cuenca recortando la delimitación inicial). Una vez delimitadas las áreas de potencial captación de aguas de escorrentía se han cruzado con la capa de usos del suelo inicial para obtener los usos del suelo existentes en cada posible zona y de esta manera aplicar los modelos hidrológicos orientados a determinar la potencialidad de generación de aguas de escorrentía superficial.

Figura 2: Imágenes representativas del proceso seguido hasta identificar las superficies potencialmente contribuyentes de agua de escorrentía y las parcelas de zonas verdes de la cuenca ERAR Valdebebas.



Igualmente, la tabla 3 presenta los volúmenes máximos de SUDS previstos por cuenca como valor promedio de la escorrentía potencialmente generada en cada zona de influencia de los SUDS delimitada en la última imagen de la figura 2.

Tabla 3: Capacidad inicial de almacenamiento en SUDS.

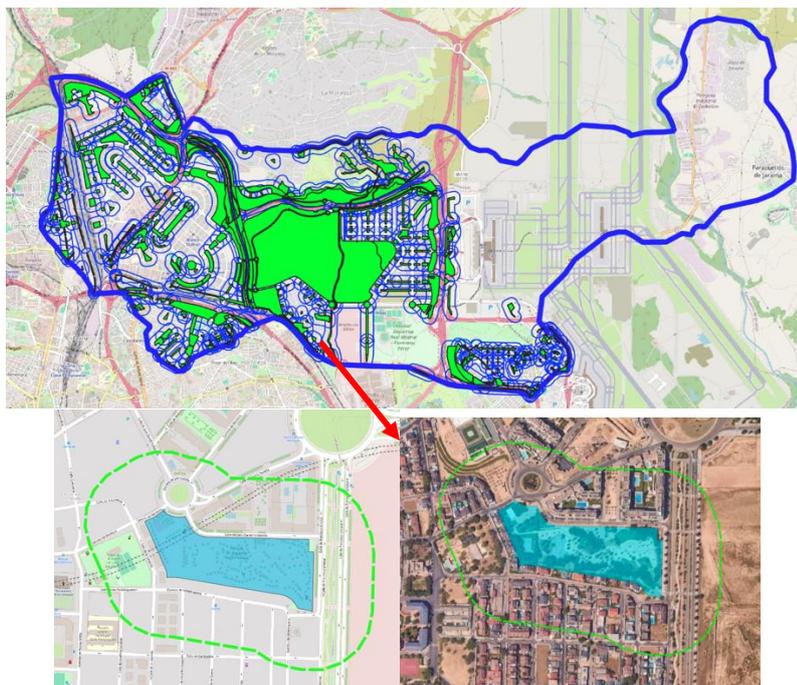
Cuenca	Volumen máximo almacenamiento en SUDS (m ³)
ERAR Monte El Pardo	104.203
ERAR Viveros	245.627
ERAR Valdebebas	150.060
ERAR Butarque	479.502
ERAR China	702.240
ERAR Rejas	280.956
ERAR Gavia	212.825
ERAR Sur Oriental	208.721
ERAR Sur	103.866

Escala de parcela

El siguiente paso consiste en descender a nivel parcela y estudiar de forma individual dentro de cada parcela de cada cuenca las posibilidades de implantación de SUDS y su eficiencia.

A modo de ejemplo nos centramos en la cuenca de Valdebebas. De nuevo se identifican las parcelas, se marca un buffer, en este caso de 100 m y se recortan con los usos. Vamos a definir dos tipos de SUDS genéricos: zanjas de infiltración en las que existe una dimensión (longitud) predominante sobre las otras dos (asumimos una profundidad máxima de 2 m y una anchura máxima también de 2 m) y balsas en las que las dos dimensiones pueden exceder de 2 m quedando fijada también la profundidad a 2 m. La figura 11 muestra un ejemplo de parcela/buffer y el conjunto de parcelas para todo la cuenca “Valdebebas”.

Figura 3: Parcelas y buffers identificadas en la cuenca Valdebebas y ejemplo de parcelas delimitadas.



Se han calculado los flujos de cada derivados de las actuaciones previstas. Los costes han sido los de ejecución de la instalación (44.65 €/m³ resultado de excavación, impermeabilización de la zona) mientras que los ingresos proceden del descenso de consumo de agua para riego gracias al almacenamiento previsto y los costes son los derivados de las necesidades de agua externas para cubrir el exceso de riego sobre lo aportado por los SUDS (se asume un coste de 1.709 €/m³ de agua para riego y un mantenimiento anual de 150 €).

3.2 Dotación óptima de SUDS en el municipio de Madrid

La figura 4 presenta, a modo de ejemplo, los resultados de las simulaciones realizadas para varias cuencas, escenarios de cambio climático y de reutilización de aguas expresada en unidades relativas (mm) mientras que la figura 5 representa los mismos resultados incluyendo los volúmenes agregados para toda la superficie de la cuenca.

Figura 4: Ejemplo de simulaciones realizadas para varias cuencas, escenarios de cambio climático y de reutilización de aguas, , asumiendo un valor máximo de capacidad de almacenaje en SUDS igual al 10% de la estimación de escorrentía en cada cuenca.

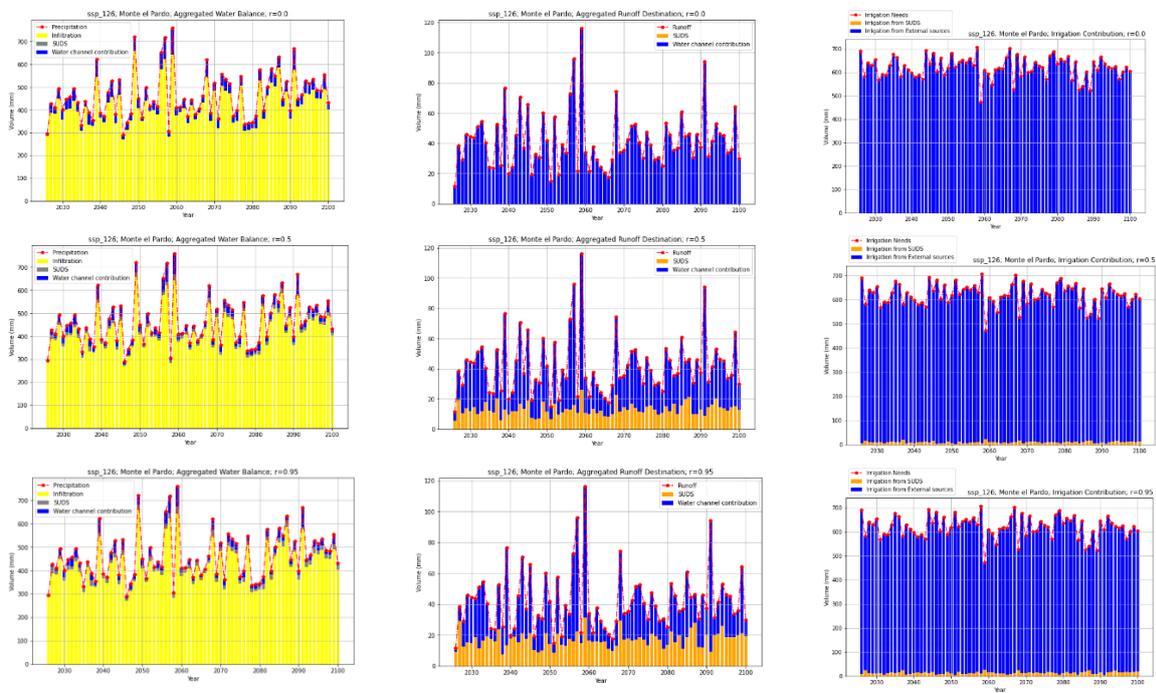
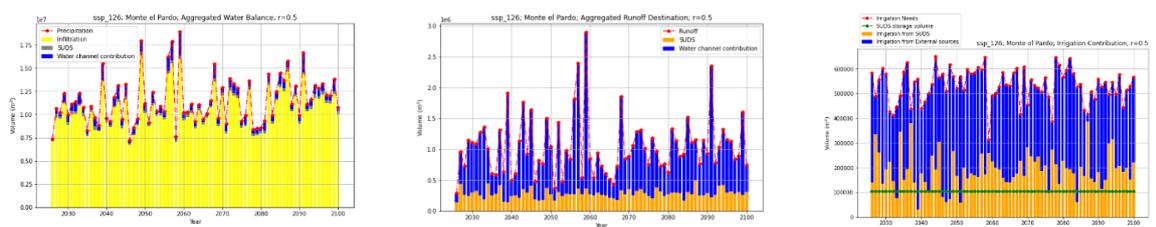
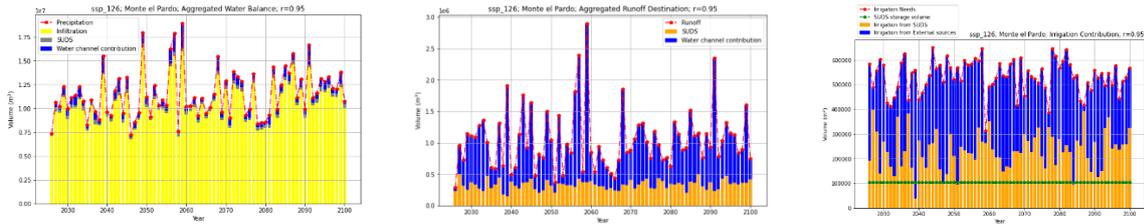


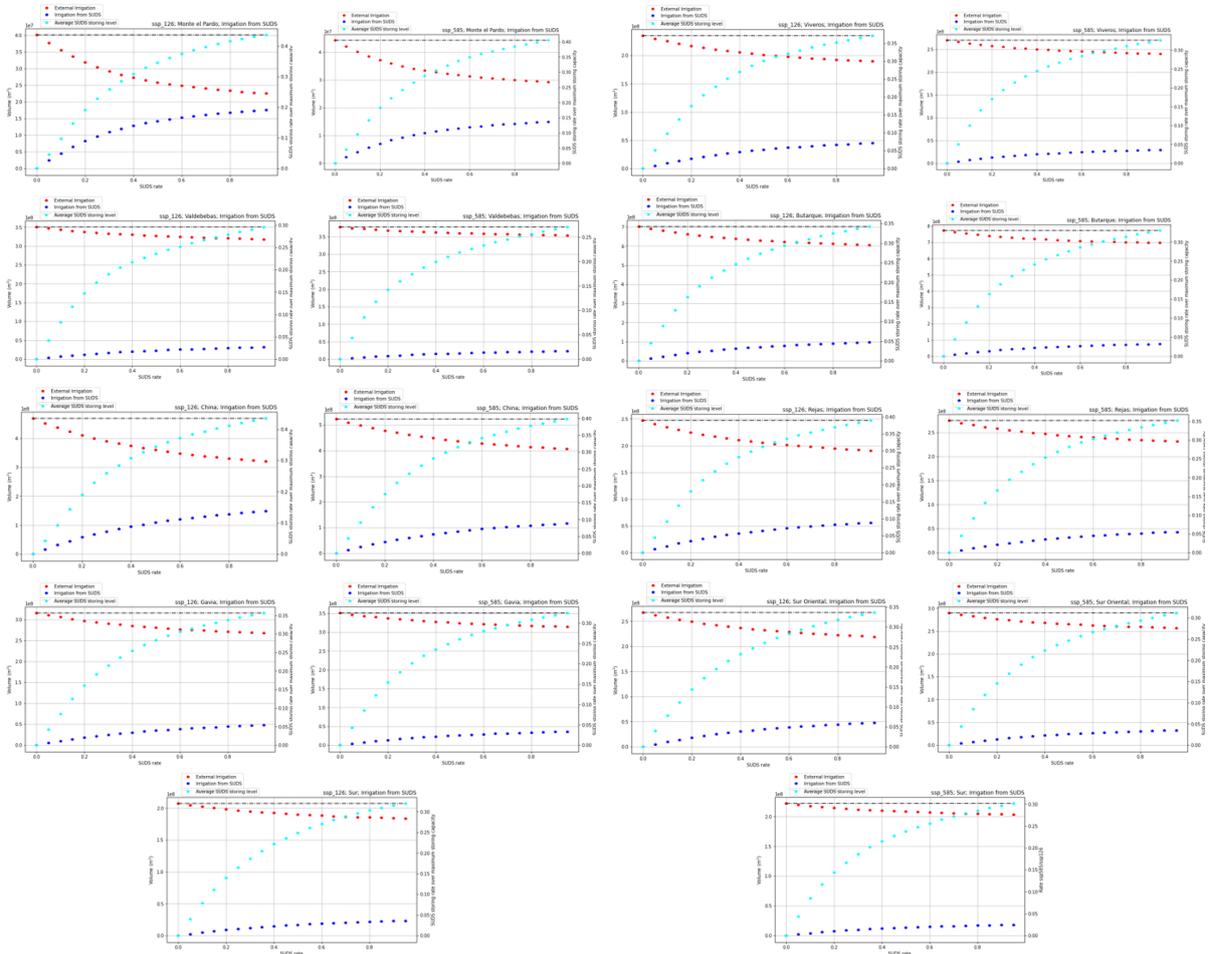
Figura 5: Ejemplo de simulaciones realizadas para varias cuencas, escenarios de cambio climático y de reutilización de aguas. Volúmenes agregados por cuencas para una dotación de SUDS del 10% del volumen de escorrentía total generado en la cuenca (104.203 m³, línea verde en gráfico de columna derecha).





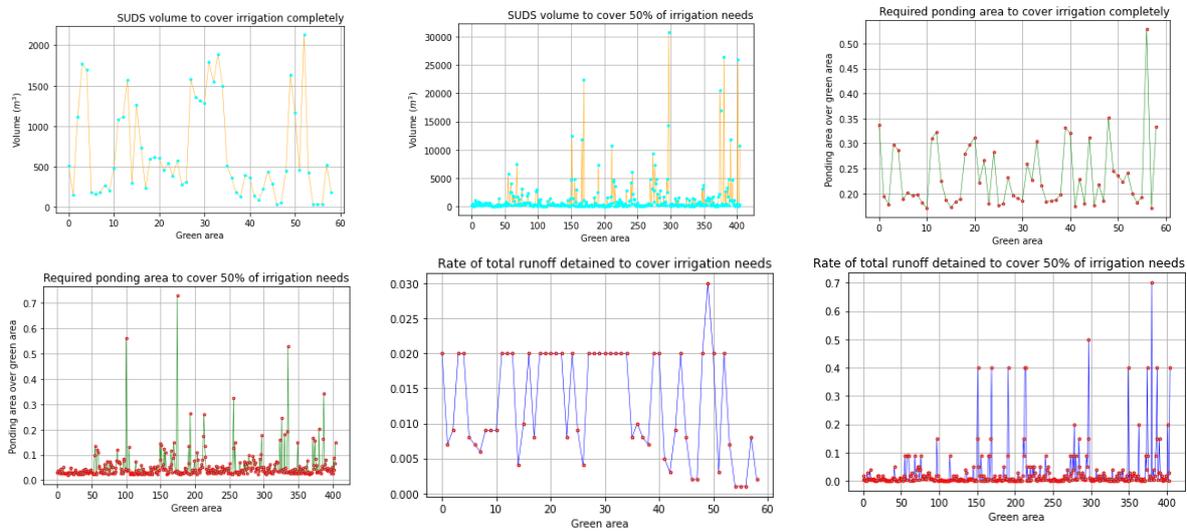
Finalmente, la figura 6 muestra la evolución de los indicadores más relevantes relacionados con el balance del agua para diferentes tasas de captación de aguas pluviales en los SUDS ($0 \leq r \leq 0.95$), siendo los volúmenes previstos de SUDS los que permitirían captar un 10% de la escorrentía potencialmente generada durante el período histórico (1960-2020).

Figura 6: Evolución del nivel promedio de llenado de SUDS y contribución de agua para riego de SUDS y fuentes externas y descargas a cauce para diferentes niveles y cuencas, , asumiendo un valor máximo de capacidad de almacenaje en SUDS igual al 10% de la estimación de escorrentía en cada cuenca.



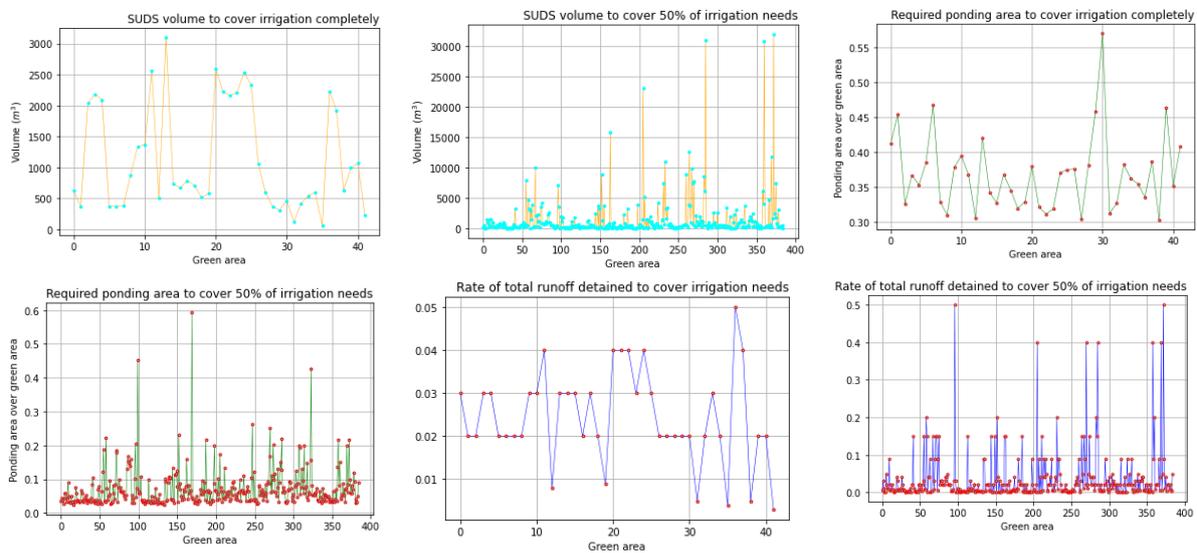
Descendiendo al nivel de estudio de parcela, la figura 7 presenta los volúmenes de SUDS requeridos, la tasa de ocupación de la zona verde por SUDS y la tasa de detención de escorrentía en la cuenca (que determina el volumen de almacenamiento de proyecto) para o bien cubrir completamente las necesidades de riego (en un total de 59 parcelas se puede cubrir las necesidades de riego completamente) o bien proporcionar únicamente el 50% (en 405 es posible aportar el 50 % de las necesidades de riego mediante SUDS).

Figura 7: Volúmenes de SUDS requeridos y la tasa de ocupación de la zona verde por SUDS para o bien cubrir completamente las necesidades de riego o el 50% de la demanda. Escenario ssp126.



Las figuras 8 presenta los mismos resultados para el escenario ssp585 en el que se podría cubrir el riego en un total de 42 parcelas mientras que el 50% del riego podría proveerse a través de los SUDS en un total de 385 parcelas

Figura 8: Volúmenes de SUDS requeridos y la tasa de ocupación de la zona verde por SUDS para o bien cubrir completamente las necesidades de riego o el 50% de la demanda. Escenario ssp585.



Las figuras 9 y 10 muestran las relaciones entre los valores del VAN y cada una de las variables estudiadas previamente para los dos escenarios analizados mientras que las figuras 11 y 12 presentan los valores de TIR y Payback para aquellas parcelas para las que se ha obtenido un VAN positivo.

Figura 9: Relación entre volumen de SUDS, tasa de detención de agua de escorrentía y área de zona verde ocupada por SUDS y el VAN estimado en ambos casos de cobertura del 100% o el 50% de las necesidades de riego. Escenario ssp126.

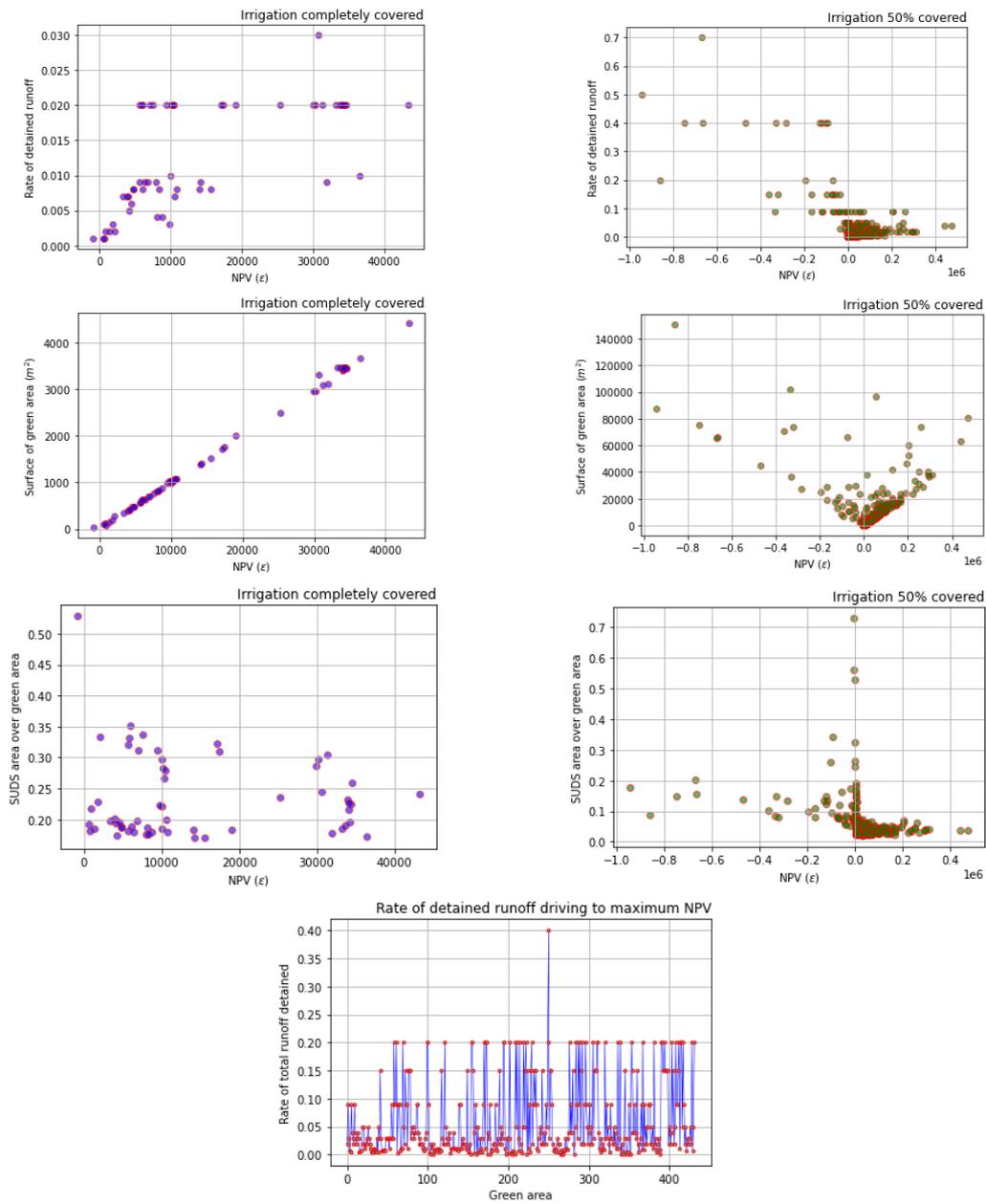
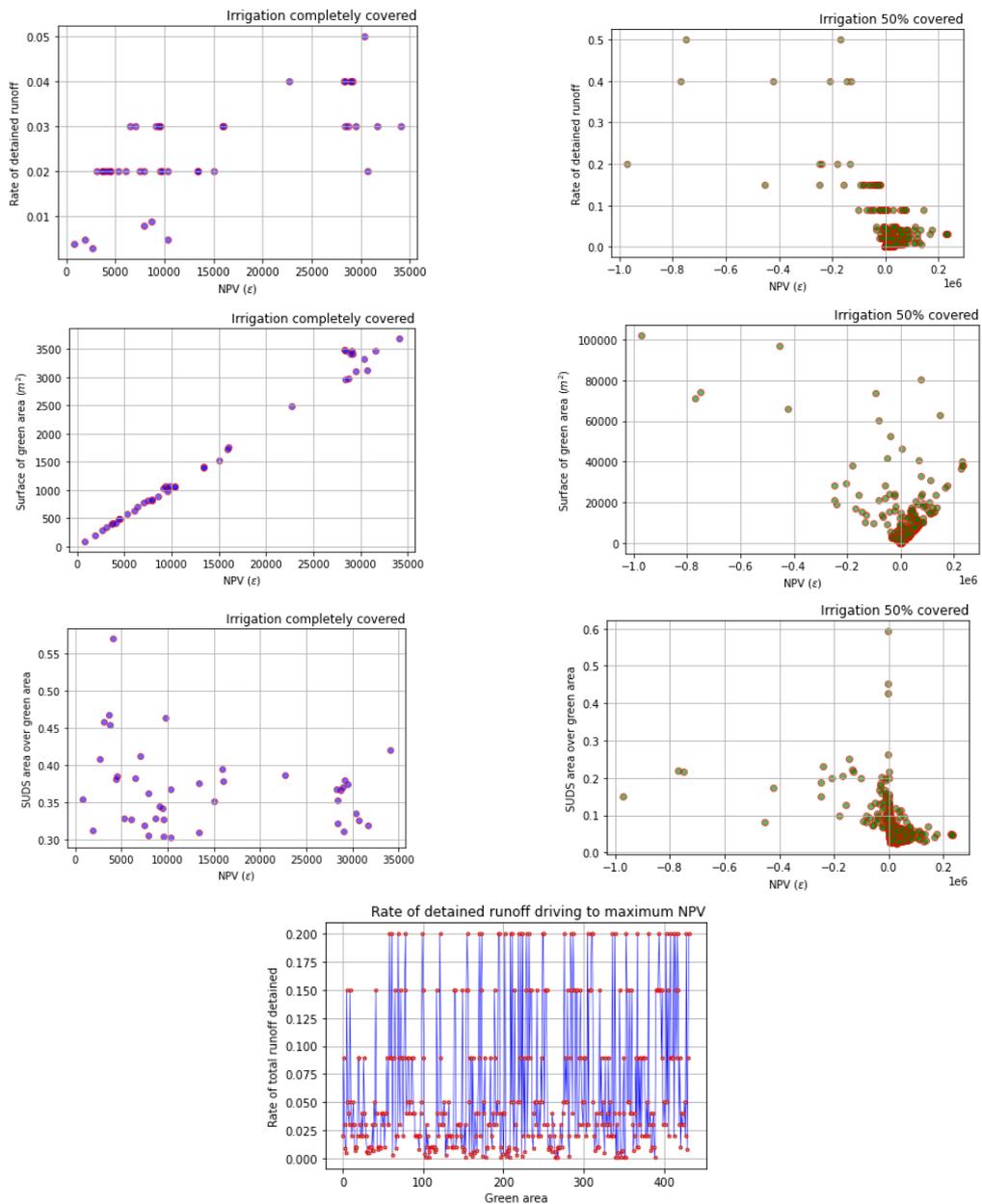


Figura 10: Relación entre volumen de SUDS, tasa de detención de agua de escorrentía y área de zona verde ocupada por SUDS y el VAN estimado en ambos casos de cobertura del 100% o el 50% de las necesidades de riego. Escenario ssp126.



Finalmente, a modo de ejemplo se incluye en las figuras 11 (ssp126) y 12 (ssp585) para la parcela del ejemplo (ver figura 3) la evolución de tasa de riego cubierta por SUDS, superficie de SUDS y de zona verde ocupada por SUDS e indicadores económicos (VAN, TIR y payback) para distintos valores de tasa de reutilización de escorrentía superficial

Figura 11: Evolución de tasa de riego cubierta por SUDS, superficie de SUDS y de zona verde ocupada por SUDS e indicadores económicos (VAN, TIR y payback) para distintos valores de tasa de reutilización de escorrentía superficial (parcela 42 y ssp126).

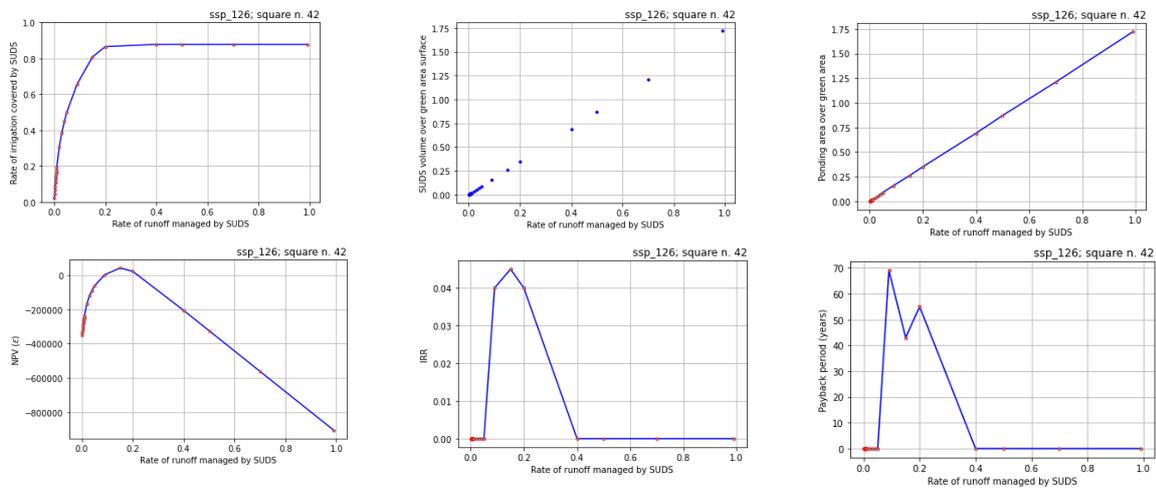
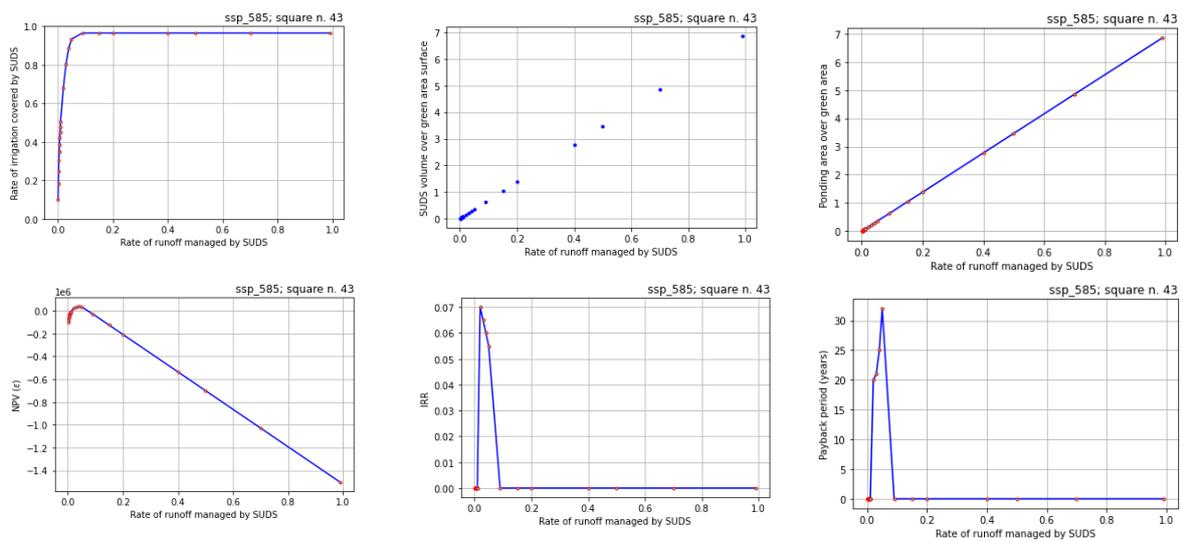


Figura 12: Evolución de tasa de riego cubierta por SUDS, superficie de SUDS y de zona verde ocupada por SUDS e indicadores económicos (VAN, TIR y payback) para distintos valores de tasa de reutilización de escorrentía superficial (parcela 42 y ssp585).



4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado un método para el análisis de la dotación de SUDS orientados a la reutilización de agua para riego a escala de ciudad con un enfoque territorial basado en dos escalas de trabajo. El método permite evaluar la implantación de SUDS a escala de cuenca urbana analizando la disponibilidad de agua de escorrentía y su posible uso para el riego de zonas verdes. En una segunda escala de trabajo alcanza el detalle de parcela, permitiendo el estudio de la tasa de captación óptima de escorrentía para su reutilización para reducir las necesidades de agua de riego externas.

En este trabajo hemos mostrado la validez del método para determinar la dotación óptima de SUDS por cuencas en la ciudad de Madrid y evaluar la viabilidad para cada parcela dentro de una cuenca a modo de ejemplo.

5. Referencias

- Aerts, R., Honnay, O., & Van Nieuwenhuysse, A. (2018). Biodiversity and human health: mechanisms and evidence of the positive health effects of diversity in nature and green spaces. *British medical bulletin*, 127(1), 5-22.
- Andersson, E., Langemeyer, J., Borgström, S., McPhearson, T., Haase, D., Kronenberg, J., ... & Baró, F. (2019). Enabling green and blue infrastructure to improve contributions to human well-being and equity in urban systems. *BioScience*, 69(7), 566-574.
- Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Martín, M., & Andrés-Valeri, V. C. (2018). Characterization of wash-off from urban impervious surfaces and SuDS design criteria for source control under semi-arid conditions. *Science of The Total Environment*, 612, 1320-1328.
- Arauetes, A., & Olcina Cantos, J. (2019). The potential of sustainable urban drainage systems (SuDS) as an adaptive strategy to climate change in the Spanish Mediterranean. *International Journal of Environmental Studies*, 76(5), 764-779.
- Charlesworth, S. M. (2010). A review of the adaptation and mitigation of global climate change using sustainable drainage in cities. *Journal of Water and Climate Change*, 1(3), 165-180.
- D'Ambrosio, R., Longobardi, A., & Schmalz, B. (2023). SuDS as a climate change adaptation strategy: Scenario-based analysis for an urban catchment in northern Italy. *Urban Climate*, 51, 101596.
- Dell, T., Razzaghmanesh, M., Sharvelle, S., & Arabi, M. (2021). Development and application of a SWMM-based simulation model for municipal scale hydrologic assessments. *Water*, 13(12), 1644.
- Jiménez Ariza, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz-Granados, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability*, 11(8), 2312.
- Krivtsov, V., Birkinshaw, S., Olive, V., Lomax, J., Christie, D., & Arthur, S. (2022). Multiple benefits of blue-green infrastructure and the reduction of environmental risks: case study of ecosystem services provided by a SuDS pond. *Civil engineering for disaster risk reduction*, 247-262.
- Lashford, C., Lavers, T., Reaney, S., Charlesworth, S., Burgess-Gamble, L., & Dale, J. (2022). Sustainable catchment-wide flood management: A review of the terminology and application of sustainable catchment flood management techniques in the UK. *Water*, 14(8), 1204.
- Monachese, A. P., Gómez-Villarino, M. T., López-Santiago, J., Sanz, E., Almeida-Ñauñay, A. F., & Zubelzu, S. (2024). Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus. *Water*, 17(1), 76.
- O'Brien, C. D. (2015). Sustainable drainage system (SuDS) ponds in Inverness, UK and the favourable conservation status of amphibians. *Urban ecosystems*, 18, 321-331.
- Rodríguez-Rojas, M. I., Garrido-Jiménez, F. J., Abarca-Álvarez, F. J., & Vallecillos-Siles, M. R. (2024). Advances in the integration of sustainable drainage systems into urban planning: a case study. *Sustainability*, 16(7), 2658.
- Warwick, F., & Charlesworth, S. (2012). Sustainable drainage devices for carbon mitigation. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 24(1), 123-136.

Utilización de inteligencia artificial generativa

Para la elaboración de este trabajo no ha sido utilizada la inteligencia artificial generativa.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

