CONAMA 2026

D4RUNOFF: Hibridación del drenaje urbano mediante Soluciones Basadas en la Naturaleza

Lecciones Aprendidas

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación:

Sara García-Argüelles. PDI. GITECO-Departamento de Transportes y tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria.

Otros Autores:

Valerio C. Andrés-Valeri. Profesor Ayudante Doctor. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Rigoberto Nahuelpán-Esparza. PDI. GITECO-Departamento de Transportes y tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria.

Ruben Díez-Montero. Profesor Ayudante Doctor. Grupo de Ingeniería Ambiental-Departamento Ciencias y Técnicas del agua y del medio ambiente. Universidad de Cantabria.

Jorge Rodriguez-Hernandez. Profesor Titular. GITECO-Departamento de Transportes y tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria.

.

Índice

1. Resumen 1

2. Introducción 1

3. Metodología para la hibridación del sistema de drenaje urbano. 4

3.1 Categorización, parametrización y selección de la SbN. 4

3.1.1 Metodología de selección de SbN 5

3. 2 Capacidad de los sistemas híbridos para eliminar y/o retener contaminantes emergentes. . 8

3.2.1 El reto de los contaminantes emergentes en la escorrentía urbana 8

3.2.2 Evidencias existentes sobre la eliminación de contaminantes emergentes mediante SbN 9

3.2.3 Revisión del estado del arte y potencialidad de los sistemas. 10

3.3 Metodología completa para la toma de decisiones 13

3.4 Evaluación económica y ambiental de la hibridación de sistemas consolidados 15

3.4.1 Escenarios de hibridación evaluados 16

3.4.2 Incorporación de contaminantes emergentes al análisis de ciclo de vida 16

3.4.3 Eficiencias de eliminación consideradas 18

3.4.4 Resultados del análisis de ciclo de vida 18

3.4.5 Implicaciones para la transición del sistema de drenaje urbano 19

4. CONCLUSIONES 20

5. RECOMENDACIONES Y RETOS FUTUROS 20

5.1 Recomendaciones para técnicos y tomadores de decisiones: 21

5.2 Retos futuros para la comunidad científica 22

5.3 Principal lección aprendida 22

Bibliografía **23**

1. Resumen

La gestión de las aguas pluviales urbanas se enfrenta a retos complejos como el aumento de las superficies impermeables, el incremento de eventos extremos asociados al cambio climático y la presencia de contaminantes de preocupación emergente en la escorrentía urbana. La reciente Directiva Europea de Aguas Residuales Urbanas incorpora nuevos requisitos relacionados con la contaminación difusa y la mejora de la capacidad de tratamiento de las aguas urbanas, incluyendo la escorrentía, hecho que plantea importantes retos técnicos y económicos para administraciones y operadores del ciclo urbano del agua.

En este contexto, el proyecto europeo D4RUNOFF ha desarrollado y validado un conjunto de metodologías y herramientas destinadas a facilitar la hibridación de los sistemas urbanos de drenaje mediante la incorporación progresiva de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). El proyecto aborda la viabilidad técnica de las SbNs y su selección mediante análisis multicriterio y herramientas SIG. Entre otros criterios, se han considerado, la capacidad de dichos sistemas para mejorar la calidad de sus efluentes (reteniendo o eliminando contaminantes emergentes presentes en la escorrentía urbana), y el análisis ambiental y económico de distintos escenarios de hibridación mediante técnicas de análisis de ciclo de vida.

Desde una perspectiva ambiental y económica, los análisis realizados muestran que los sistemas híbridos proporcionan un equilibrio más favorable que los sistemas convencionales, sean combinados o separativos. Incluso niveles moderados de hibridación con SbN generan reducciones significativas en los impactos ambientales y energéticos asociados a la gestión de las aguas pluviales.

Las principales lecciones aprendidas del proyecto evidencian que la transición hacia modelos híbridos de drenaje urbano no requiere sustituir las infraestructuras existentes, sino incorporar progresivamente SbN en la planificación urbana, apoyándose en metodologías objetivas que permitan considerar y evaluar estas soluciones con el mismo rigor técnico que las infraestructuras convencionales. Este enfoque ofrece una oportunidad para evolucionar hacia ciudades más resilientes, sostenibles y adaptadas a los nuevos desafíos regulatorios europeos.

Palabras clave: *Soluciones basadas en la Naturaleza; drenaje urbano sostenible; hibridación; contaminantes emergentes; escorrentía urbana; análisis de ciclo de vida; D4RUNOFF; Directiva de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas.*

2. Introducción

El sector del agua en Europa afronta actualmente importantes desafíos derivados del envejecimiento de las infraestructuras, la necesaria adaptación al cambio climático, la protección de los recursos hídricos y el cumplimiento de unos requisitos regulatorios cada vez más exigentes (iAgua Data, 2026). Entre ellos, la gestión de las aguas pluviales urbanas constituye uno de los principales retos para las administraciones y operadores del ciclo urbano del agua, especialmente

en aquellas regiones donde predominan los sistemas de drenaje centralizados y las redes unitarias de saneamiento.

La gestión de la escorrentía urbana en Europa se ha basado tradicionalmente en grandes infraestructuras grises, compuestas por extensas redes de alcantarillado y grandes estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Actualmente, la longitud total de las redes de saneamiento europeas supera los tres millones de kilómetros, siendo especialmente significativa en países como Reino Unido, Alemania, Francia, Italia y España. En el caso español, aproximadamente el 75 % de la red en áreas metropolitanas corresponde a sistemas unitarios (*Guía Para Las Decisiones Estratégicas Sobre La Colaboración Público-Privada En La Gestión de Las Plantas de Aguas Residuales*, 2021) en los que las aguas residuales y pluviales son evacuadas y transportadas conjuntamente hasta las instalaciones de depuración.

Sin embargo, este modelo presenta importantes desafíos económicos y operativos. La tasa media de renovación de los activos de saneamiento en España apenas alcanza el 0,25 % anual, una cifra insuficiente para garantizar la reposición adecuada de unas infraestructuras cada vez más envejecidas. Esta situación no es exclusiva de España, sino que se observa también en otros países europeos con amplias redes de alcantarillado, como Reino Unido, Francia o Italia. Como consecuencia, el déficit de inversión en mantenimiento y renovación se ha convertido en una de las principales preocupaciones de los operadores del sector.

A esta situación se suma la entrada en vigor de la nueva Directiva Europea sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas(Directiva (UE) 2024/3019, 2024), que incorpora objetivos más ambiciosos en relación con la eliminación de nutrientes, la reducción de vertidos y la implantación de tratamientos avanzados para la eliminación de contaminantes emergentes. La adaptación de las infraestructuras existentes a estos nuevos requisitos supondrá un esfuerzo económico considerable. Solo en España, las necesidades de inversión asociadas a los nuevos tratamientos se han estimado en más de 2.400 millones de euros, incluyendo aproximadamente 1.373 millones para grandes depuradoras y 1.065 millones para instalaciones de tamaño medio. En Cantabria, el impacto económico previsto resulta especialmente significativo, con inversiones cercanas a 140 millones de euros y un coste estimado de 256 €/habitante equivalente, la cifra más elevada entre las comunidades autónomas españolas.

Junto a los retos económicos y regulatorios, la gestión de las aguas pluviales plantea importantes desafíos técnicos y ambientales. En los sistemas unitarios, la llegada de grandes volúmenes de escorrentía durante episodios de lluvia incrementa los caudales a tratar, aumenta los consumos energéticos y genera descargas de sistemas unitarios (DSU). En España, el consumo energético asociado a las depuradoras de más de 10.000 habitantes equivalentes supera los 1.800 GWh anuales. Además, el tratamiento de aguas pluviales en instalaciones diseñadas principalmente para aguas residuales supone procesar grandes volúmenes de agua relativamente diluida, comprometiendo la capacidad hidráulica y reduciendo la eficiencia global del sistema.

Por otro lado, en los sistemas separativos las aguas de escorrentía suelen ser descargadas directamente al medio receptor, sin tratamiento previo, transfiriendo el problema desde las infraestructuras de saneamiento hacia los ecosistemas acuáticos (Cojoc et al., 2024; Xiong & Chui, 2026) . Esta situación adquiere una relevancia creciente debido a la presencia de contaminantes de

preocupación emergente asociados a la escorrentía urbana(Müller et al., 2020). A diferencia de las aguas residuales, donde predominan los contaminantes emergentes asociados a residuos farmacéuticos (Tapera et al., 2026) y productos de cuidado personal (Stejskalová et al., 2026), los contaminantes presentes en la escorrentía están estrechamente relacionados con los usos del suelo (Aryal et al., 2010; Zhang et al., 2024), incluyendo compuestos procedentes del tráfico rodado, partículas derivadas del desgaste de neumáticos, hidrocarburos, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), biocidas, plastificantes y otros contaminantes transportados de forma difusa por las precipitaciones (Müller et al., 2020).

En regiones como Cantabria, donde las precipitaciones son frecuentes y predominan los sistemas unitarios, los vertidos de origen urbano constituyen una de las principales presiones identificadas sobre las masas de agua superficiales. Los alivios de tormenta y las DSU asociados a eventos de lluvia continúan condicionando el cumplimiento de los objetivos ambientales establecidos por la Directiva Marco del Agua, poniendo de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevas estrategias para gestionar la escorrentía desde su origen (Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental, 2025).

En este contexto, las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) aplicadas al drenaje urbano sostenible emergen como una alternativa capaz de complementar las infraestructuras convencionales. Sistemas como las áreas de bioretención, cunetas vegetadas, zanjas filtrantes, pavimentos permeables o humedales construidos permiten reducir los volúmenes y caudales de escorrentía, disminuir la presión sobre las redes de saneamiento y mejorar la calidad del agua mediante procesos naturales de retención, sedimentación, filtración y degradación biológica. Además, aportan beneficios adicionales relacionados con la biodiversidad, la adaptación climática y la mejora del entorno urbano (Wang et al., 2025).

En los últimos años, numerosas son las experiencias que reflejan la potencialidad de estos SbNs para eliminar y/o retener contaminantes emergentes, mejorando la calidad de los efluentes (Diblasi et al., 2009; Flanagan et al., 2019; Flanagan & Caupos, 2018; Franco & Matamoros, 2016; Gu et al., 2021; Krutz et al., 2005; Lange et al., 2021, 2022; Montagna et al., 2020; Rühmland et al., 2015). No obstante, la implantación generalizada de estas soluciones requiere superar una de las principales barreras identificadas por administraciones y operadores: la necesidad de evaluar las SbN con el mismo nivel de rigor técnico, económico y ambiental que las infraestructuras grises tradicionales. En este sentido, la transición hacia modelos híbridos de drenaje urbano constituye una de las principales líneas de actuación promovidas en Europa para compatibilizar las infraestructuras existentes con nuevas estrategias de gestión sostenible de las aguas pluviales (Directiva (UE) 2024/3019, 2024).

Con este objetivo surgió el proyecto europeo D4RUNOFF enmarcado dentro del clúster europeo Zero Pollution, orientado a facilitar la hibridación de los sistemas urbanos de drenaje mediante el desarrollo de metodologías y herramientas que permitan identificar, diseñar y evaluar estrategias de adaptación basadas en la incorporación progresiva de Soluciones Basadas en la Naturaleza. A través de herramientas de análisis espacial, evaluación multicriterio y análisis ambiental y económico, el objetivo era proporcionar una base técnica sólida para integrar las SbN en los procesos de planificación y toma de decisiones, situándolas al mismo nivel de consideración que las infraestructuras convencionales. Asimismo, el proyecto abordó el creciente reto de los

contaminantes emergentes asociados a la escorrentía urbana, contribuyendo al conocimiento de la capacidad de estas soluciones para su retención y tratamiento.

Esta comunicación técnica presenta algunos de los resultados y lecciones aprendidas del proyecto D4RUNOFF (financiado por el programa Horizonte Europa 2022-2026 con el acuerdo No 101060638) y analiza el potencial de la hibridación como estrategia para mejorar la sostenibilidad, resiliencia y eficiencia de los sistemas urbanos de drenaje frente a los desafíos regulatorios, ambientales y económicos que afronta actualmente el sector del agua en Europa y, particularmente, en España y en nuestro caso en nuestra comunidad, Cantabria.

3. Metodología para la hibridación del sistema de drenaje urbano.

3.1 Categorización, parametrización y selección de la SbN.

Uno de los principales obstáculos para la implantación generalizada de las SbN en los sistemas urbanos de drenaje no está relacionado con su eficacia técnica, sino con la dificultad de integrarlas en los procesos convencionales de planificación y toma de decisiones. Aunque existe una amplia evidencia científica sobre su capacidad para gestionar la escorrentía urbana, reducir riesgos de inundación o mejorar la calidad del agua, las SbN continúan siendo percibidas en muchos casos como medidas inferiores frente a las infraestructuras grises tradicionales.

En este contexto, uno de los objetivos del proyecto D4RUNOFF fue desarrollar una metodología que permitiera evaluar, comparar, seleccionar y diseñar SbN con un nivel de rigurosidad técnica equiparable al utilizado para otras infraestructuras hidráulicas, facilitando así su incorporación en procesos de planificación urbana y gestión del ciclo integral del agua.

Con este fin, se desarrolló una biblioteca paramétrica de SbN para drenaje urbano basada en las principales referencias internacionales del sector, entre ellas el manual SuDS de CIRIA (*The SuDs Manual*, 2016) y las clasificaciones desarrolladas en proyectos europeos como Urban GreenUP. El resultado fue un catálogo compuesto por 13 tipologías de SbN, cada una de ellas descrita mediante una ficha técnica que recoge sus características funcionales, criterios de diseño, limitaciones, condicionantes de implantación, requerimientos de mantenimiento y capacidad potencial para gestionar problemas relacionados tanto con la cantidad como con la calidad de la escorrentía.

La biblioteca quedó recogida en el entregable público D3.1 Parametric Library of Nature-Based Solutions (NBS) (Andrés-Valeri et al., 2023) disponible en acceso abierto en ZENODO y se complementó con una herramienta paramétrica en formato Excel destinada al prediseño de estas soluciones y a su integración en entornos BIM (Building Information Modelling), también disponible a través de ZENODO. La funcionalidad principal de esta herramienta se basa en relacionar las

características de cada SbN con los volúmenes de escorrentía a gestionar y con los objetivos de calidad del agua definidos para cada actuación.

3.1.1 Metodología de selección de SbN

La metodología desarrollada en D4RUNOFF se estructura en cuatro etapas principales:

3.1.1.1 Identificación del punto conflictivo

El primer paso consiste en identificar el punto del sistema donde existe una problemática asociada a la gestión de aguas pluviales.

Este punto puede corresponder a:

- Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR).
- Un bombeo o tanque de tormentas.
- Un aliviadero.
- Un tramo concreto de la red de saneamiento.
- Un cauce receptor afectado por vertidos.
- Una zona urbana con problemas recurrentes de inundación.

3.1.1.2 Caracterización de la cuenca drenante

Una vez identificado el punto de estudio, se realiza la delimitación y caracterización de las cuencas y subcuencas que vierten hacia él.

Este análisis considera:

- Superficie impermeable.
- Usos del suelo.
- Condiciones topográficas.
- Conectividad hidráulica.
- Sistema de drenaje existente.
- Volúmenes y caudales de escorrentía generados.

La calidad de esta fase condiciona directamente la capacidad posterior de identificar soluciones adecuadas.

3.1.1.3 Definición del problema a resolver

El siguiente paso consiste en definir claramente la naturaleza del problema que se pretende abordar.

Gestión de la cantidad de agua

Las SbN pueden seleccionarse principalmente para contribuir a:

- Reducción de volúmenes de escorrentía.
- Laminación de caudales punta.
- Infiltración y recarga de acuíferos.

Gestión de la calidad del agua

Las SbN también pueden orientarse a la eliminación o reducción de diferentes grupos contaminantes:

- Nutrientes.
- Sedimentos.
- Metales pesados.
- Bacterias.
- Aceites y grasas.
- Residuos sólidos.
- Contaminantes de preocupación emergente.

En el caso de estos últimos, la clasificación adoptada en D4RUNOFF distingue diferentes familias asociadas a la escorrentía urbana:

- Biocidas y productos de transformación.
- Derivados del desgaste de neumáticos.
- Productos de cuidado personal.
- Sustancias químicas de origen industrial.
- Fármacos.
- Productos fósiles y derivados de la combustión.
- Microplásticos.

Debe señalarse que el comportamiento de cada compuesto es específico y que las eficiencias de eliminación pueden variar significativamente entre compuestos de una misma familia, por lo que deben tenerse en cuenta los contaminantes prioritarios identificados en cada caso de estudio.

3.1.1.4 Selección de soluciones técnicamente viables

Finalmente, la información recopilada durante las etapas anteriores se utiliza para consultar la biblioteca paramétrica y obtener una lista de soluciones potencialmente adecuadas.

Además de los criterios hidráulicos y de calidad del agua, la metodología permite incorporar variables adicionales tales como:

- Escala de intervención.
- Disponibilidad de espacio.
- Costes de construcción.
- Costes de operación y mantenimiento.
- Beneficios ecosistémicos.
- Integración urbana.
- Requisitos de sostenibilidad.

3.1.1.5 Tipologías de SbN incluidas en la biblioteca

Las trece tipologías analizadas son:

1. Áreas de bioretención.
2. Balsas de detención.
3. Franjas filtrantes.
4. Cubiertas y fachadas verdes.
5. Balsas de infiltración.
6. Pozos de infiltración.
7. Zanjas de infiltración.
8. Pavimentos permeables.
9. Estanques de retención.
10. Sistemas lineales de drenaje sostenible (cunetas vegetadas y drenes filtrantes).

11. Balsas de sedimentación.

12. Humedales superficiales.

13. Humedales subsuperficiales.

3.1.1.6 Ejemplo de aplicación de la metodología

Aunque D4RUNOFF fue concebido como un proyecto de investigación y no contempló la financiación directa de actuaciones constructivas, algunas de las herramientas desarrolladas fueron utilizadas por los socios del proyecto para apoyar la planificación de actuaciones piloto.

Un ejemplo destacado es el desarrollado por la empresa gestora del ciclo urbano del agua Acque S.p.A. en Pontedera (Italia), donde se implantó una instalación experimental para el tratamiento de aguas pluviales asociadas a episodios de lluvia intensa.

La solución seleccionada consistió en un humedal artificial subsuperficial diseñado para favorecer la eliminación de contaminantes presentes en la escorrentía urbana mediante la combinación de sustratos minerales, vegetación acuática y comunidades microbianas específicas. Entre los contaminantes objetivo considerados en la instalación se encuentran PFAS, microplásticos, plaguicidas y metales pesados.

Este caso constituye un ejemplo práctico del tipo de actuaciones que pueden apoyarse mediante la metodología de selección y parametrización desarrollada dentro del proyecto.

3. 2 Capacidad de los sistemas híbridos para eliminar y/o retener contaminantes emergentes.

3.2.1 El reto de los contaminantes emergentes en la escorrentía urbana

Tal y como se ha expuesto en la introducción, la nueva Directiva Europea sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas refuerza la necesidad de controlar los CECs, impulsando la implantación de tratamientos cuaternario para reducir su liberación al medio receptor. Sin embargo, gran parte del debate regulatorio y tecnológico se ha centrado históricamente en los contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas, dominados principalmente por productos farmacéuticos y de cuidado personal. En contraste, los contaminantes presentes en la escorrentía urbana están estrechamente relacionados con los usos del suelo y las actividades desarrolladas en el entorno urbano.

Entre los compuestos frecuentemente asociados a la escorrentía se encuentran los derivados del desgaste de neumáticos y frenos, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS),

hidrocarburos, biocidas, aditivos industriales, plastificantes, metales pesados y microplásticos, cuya presencia puede generar riesgos ambientales significativos incluso a bajas concentraciones.

En este contexto, las SbN no deben entenderse únicamente como infraestructuras para la reducción de inundaciones o la gestión hidráulica de la escorrentía. Su capacidad para retener, transformar o eliminar contaminantes abre la posibilidad de utilizarlas como tratamientos descentralizados de calidad de agua, complementando las infraestructuras convencionales y contribuyendo a los objetivos de contaminación cero promovidos por la Unión Europea.

3.2.2 Evidencias existentes sobre la eliminación de contaminantes emergentes mediante SbN

Durante los últimos años se ha producido un crecimiento significativo de la literatura científica relacionada con la capacidad de las SbN para reducir la concentración de los contaminantes emergentes en los efluentes de salida. Entre los mecanismos responsables de esta eliminación están:

- Filtración física.
- Sedimentación.
- Adsorción sobre partículas del suelo y sustratos.
- Precipitación y complejación química.
- Absorción por vegetación.
- Transformación biológica por microorganismos.
- Procesos combinados de degradación natural.

Los sistemas más estudiados en la bibliografía son los humedales artificiales, que pueden actuar como infraestructuras de tratamiento cuaternario de aguas residuales. No obstante, el conocimiento relativo al comportamiento de contaminantes emergentes específicamente asociados a la escorrentía urbana es todavía limitado.

Durante sus cuatro años de ejecución, el proyecto D4RUNOFF amplió el conocimiento relativo a los contaminantes presenten en las aguas de escorrentía europeas y la capacidad que tienen las distintas SbN para gestionar algunos de ellos. Además se ha logrado ampliar el foco más allá de los fármacos e incorporando compuestos característicos del tráfico rodado, actividades industriales y contaminación urbana difusa.

3.2.3 Revisión del estado del arte y potencialidad de los sistemas.

Como primera aproximación, el equipo de la Universidad de Cantabria realizó una revisión sistemática de experiencias reales relacionadas con la eliminación de contaminantes emergentes mediante SbN, recopiladas en la base de datos denominada “NbS Pollutant Removal Review” y disponible en ZENODO en los datasets asociados al mencionado entregable D3.1.

La revisión incluyó exclusivamente estudios desarrollados a escala piloto o real, excluyéndose ensayos de laboratorio con el objetivo de obtener información transferible a la práctica profesional.

Cada registro fue clasificado según:

- Tipo de SbN.
- Familia de contaminantes emergentes.
- Compuesto individual.
- 3 identificadores: (1) Número CAS; (2) InChI Key y (3) SMILES.
- Evaluación cualitativa de la eficiencia de eliminación (alta, media o baja).
- Referencia bibliográfica.

La búsqueda se centró en sistemas de drenaje urbano y aguas pluviales. Sin embargo, dada la limitada información disponible para algunas tipologías de SbN, se incorporaron también estudios realizados con aguas residuales y aguas grises.

Uno de los principales hallazgos de esta revisión fue la enorme heterogeneidad metodológica existente entre estudios. Aspectos como el clima, la intensidad de lluvia, los tiempos de retención, los materiales empleados, la vegetación utilizada, los protocolos de muestreo o las técnicas analíticas utilizadas dificultan enormemente la comparación entre resultados. Por lo que esta base de datos se planteó como el punto de partida de la potencialidad de los sistemas para tratar emergentes.

Esta situación pone de manifiesto la necesidad de establecer protocolos armonizados de seguimiento que permitan generar datos comparables y proporcionar a los responsables de la toma de decisiones información robusta sobre el comportamiento real de las distintas SbN frente a los CECs.

3.2.4 Identificación de contaminantes emergentes en los casos de estudio de D4RUNOFF

La segunda aproximación desarrollada en el proyecto consistió en caracterizar los contaminantes presentes en la escorrentía urbana recogida en los distintos casos de estudio. Este paso resulta fundamental ya que, a diferencia de las aguas residuales, donde la composición química es relativamente conocida, la contaminación asociada a la escorrentía está fuertemente condicionada por el uso del suelo, la intensidad del tráfico, las actividades económicas presentes y las características específicas de cada cuenca urbana.

Las campañas de muestreo fueron diseñadas y coordinadas por la Universidad de Copenhague (UCPH) y el Servicio Geológico de Dinamarca y Groenlandia (GEUS) y llevadas a cabo por socios y colaboradores del proyecto en distintos puntos de España, Italia, Dinamarca, Eslovenia y Lituania. El equipo de la Universidad de Cantabria tomó muestras en varios puntos de la ciudad de Santander, entre ellos se tomaron muestras de las escorrentías de entrada de las dos SbNs de los casos de estudio, el parking permeable y la humedad artificial de Las Llamas. Los socios de los otros casos de estudio tomaron muestras de escorrentía a la entrada de otras SbNs como áreas de bioretención y balsas de retención y detención.

El posterior análisis de las muestras fue realizado por los laboratorios Daneses mediante análisis de compuestos diana (target) y análisis no dirigidos (non-target). Los resultados obtenidos muestran una composición de contaminantes claramente diferenciada de la observada habitualmente en las aguas residuales urbanas. Entre los contaminantes emergentes detectados en mayor concentración destacaron los incluidos en el cuadro 1 y aquellos que presentan los mayores riesgos toxicológicos se detallan en el cuadro 2:

Cuadro 1. Contaminantes emergentes con mayor concentración hallada en agua de escorrentía:

Compuesto Químico	Origen principal
6PPD-quinona (hasta 0,57 µg/L)	Desgaste de neumáticos
1,3-difenilguanidina (hasta 22,4 µg/L).	Derivados del caucho
Ácido benzotiazol-2-sulfónico (153 µg/L)	Tráfico y materiales industriales
Claritromicina	Uso farmacéutico

Cuadro 2. Contaminantes emergentes con mayor riesgo toxicológico:

Compuesto Químico	Origen principal
Claritromicina	Hasta 539 veces la PNEC[1]
6PPD-quinona (hasta 0,57 µg/L)	49 veces la PNEC
Ácido benzotiazol-2-sulfónico (153 µg/L)	32 veces la PNEC

Es necesario mencionar además otro compuesto relevante en el agua de escorrentía, el 4-Nitrophenol. Durante la coordinación de una campaña de Ciencia Ciudadana en la ciudad de Odense, Dinamarca (cuya metodología y resultados completos se encuentra en D5.4 en ZENODO

[1] PNEC, son las siglas en inglés de “Predicted No Effect Concentration”, en español “concentración prevista sin efecto”. Según el portal REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals): “La PNEC representa el límite de concentración de una sustancia química por debajo del cual no se esperan efectos adversos en el ecosistema o compartimento ambiental afectado (como agua, suelo o sedimentos)”.

(Roed Bonde, 2025)), donde de un total de 241 muestras, 149 contienen dicho compuesto por encima del límite de detección. Por tanto, se tuvo este compuesto en cuenta para el análisis de riesgos dentro del proyecto.

Cabe destacar además dos cuestiones. Por un lado, un resultado especialmente relevante para el contexto regulatorio europeo fue la detección de 6PPD-quinona(Tian et al., 2022), contaminante procedente del tráfico rodado y recientemente incorporado a la lista de observación europea debido a su elevada toxicidad para organismos acuáticos. Por otro lado, en diversos puntos de muestreo se detectaron compuestos típicamente asociados a aguas residuales, lo que sugiere aportaciones derivadas de conexiones erróneas en redes separativas de saneamiento, infiltraciones o descargas urbanas no identificadas. Las metodologías y resultados de estas campañas pueden hallarse en el mencionado entregable D5.4 y en el artículo “Inventory and risk characterisation of urban runoff pollutants in europe” (Molnár Karlsson et al., 2026), ambos de acceso público a través de ZENODO.

3.2.5 Evaluación de la capacidad de eliminación de las SbN

La tercera aproximación desarrollada en D4RUNOFF consistió en evaluar las eficiencias de eliminación obtenidas en distintas SbN mediante campañas de muestreo en entrada y salida. Los resultados mostraron que determinados contaminantes presentan elevadas tasas de eliminación en diferentes tipologías de SbN. Entre los ejemplos más destacados se encuentran:

- 4-nitrofenol: entre el 18 % y el 100 % de eliminación.
- 1,3-difenilguanidina: entre el 24 % y el 98 % de eliminación.
- 6PPD-quinona: entre el 49 % y el 96 % de eliminación.

Tal y como se puede observar hay una amplia variación en los porcentajes de eliminación de cada compuesto que difiere en función de la SbN, pero que además está limitada en algunas ocasiones por la dificultad para emparejar las muestras de entrada y de salida, puesto que se realiza en campañas separadas, en estacionalidades diferentes y con una aproximación del tiempo de retención del agua en el sistema.

No obstante, también se observaron incrementos de concentración para determinados compuestos, especialmente PFAS. Este fenómeno podría estar relacionado con procesos de acumulación previa y posterior liberación desde los materiales de la propia SbN o con aportes externos no detectados durante las campañas de monitorización. Este hecho se comprobó también en la literatura, donde hay eventos en los que la concentración de la salida del efluente presenta mayor concentración del CEC que a la entrada del sistema, por lo que los autores hipotetizaron con una acumulación y posterior liberación (Gu et al., 2021; Sébastian et al., 2015) .

En el caso del aparcamiento permeable del Parque de Las Llamas de Santander, se realizó un estudio más exhaustivo teniendo en cuenta los materiales de la base y el geotextil, además de dos campañas de muestreo en tiempo seco y tiempo húmedo. Los resultados de este análisis se encuentran recogidos en el artículo “Long-term operation of a permeable pavement parking area: water treatment performance and fate of pollutants”, actualmente en revisión.

Como conclusión a este apartado, se recomienda realizar muestreos periódicos y en distintas condiciones estacionales/hidráulicas de los efluentes de entrada y salida de cada SbN concreta, teniendo en cuenta su tiempo de retención y los materiales que están en contacto con el agua.

3.3 Metodología completa para la toma de decisiones

Tal y como se ha descrito en los apartados anteriores, uno de los principales retos para la implantación generalizada de SbN en los sistemas urbanos de drenaje es su incorporación efectiva a los procesos habituales de planificación y toma de decisiones.

Con el objetivo de superar esta barrera, la Universidad de Cantabria desarrolló en el marco del proyecto D4RUNOFF una metodología de análisis multicriterio para la toma de decisiones (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA), destinada a apoyar a técnicos municipales, operadores de empresas gestoras del ciclo urbano del agua y otros agentes implicados en la planificación urbana. La metodología permite identificar las SbN más adecuadas para cada situación concreta a partir de la evaluación simultánea de criterios técnicos, ambientales, económicos, sociales y de viabilidad de implementación y a su vez cada uno de estos criterios se divide en varios subcriterios.

Además de identificar las soluciones potencialmente más adecuadas, la herramienta permite establecer una clasificación jerarquizada o ranking de las alternativas disponibles, facilitando la comparación objetiva entre diferentes opciones, favoreciendo la integración de las SbN en los procesos convencionales de diseño y planificación de infraestructuras hidráulicas.

No obstante, la selección de una determinada SbN no depende únicamente de su idoneidad. En un proceso real de hibridación resulta igualmente necesario considerar los requisitos y limitaciones asociados a su ubicación física dentro del entorno urbano. Por este motivo, la metodología MCDA se complementa con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten identificar las áreas con potencial para albergar SbN y evaluar su integración dentro de los sistemas de drenaje existentes. La combinación MCDA-SIG constituye así una metodología integral para el diseño de configuraciones híbridas de drenaje urbano, donde infraestructuras verdes y grises actúan de forma complementaria.

Tanto la metodología MCDA-SIG como el catálogo de SbN desarrollado en D4RUNOFF fueron desarrollados y validados mediante procesos participativos con diferentes grupos de interés, incluyendo operadores de servicios de agua, técnicos municipales y entidades ambientales. En el caso de Santander participaron, entre otros agentes, representantes del ayuntamiento y de AQUALIA, técnicos de la empresa pública MARE y representantes de SEO/BirdLife, aportando perspectivas complementarias sobre la gestión de las aguas pluviales y la renaturalización urbana.

Los resultados obtenidos en los tres casos de estudio principales del proyecto muestran que las SbN que alcanzan una valoración más favorable son los humedales construidos, las cubiertas verdes y los sistemas lineales de drenaje sostenible, particularmente las cunetas vegetadas de infiltración. Estas tipologías destacan por su capacidad para gestionar simultáneamente aspectos relacionados con la cantidad y la calidad de la escorrentía, incluyendo la retención de contaminantes convencionales y contaminantes emergentes.

Sin embargo, la clasificación obtenida debe interpretarse teniendo en cuenta determinadas limitaciones asociadas a cada tipología.

Las cubiertas y techos verdes presentan una elevada valoración debido a su potencial para reducir el volumen de escorrentía en origen, mejorar el microclima urbano y aportar beneficios ecosistémicos adicionales. No obstante, su ámbito de actuación queda limitado principalmente a las aguas pluviales generadas sobre los propios edificios y no al conjunto de la escorrentía urbana. Además, su implantación puede verse condicionada por restricciones urbanísticas, limitaciones estructurales de los edificios existentes o la presencia de patrimonio arquitectónico protegido, especialmente en centros históricos.

Los humedales construidos, por su parte, destacan por su elevada capacidad de laminación y depuración, siendo además una de las tipologías que presenta mejores resultados documentados para la reducción de contaminantes emergentes. Sin embargo, su implantación suele estar condicionada por la disponibilidad de superficie, lo que limita su aplicación en áreas urbanas densamente edificadas y favorece su localización en espacios periurbanos o zonas verdes de mayor tamaño.

En el caso de los pavimentos permeables, aunque frecuentemente no incorporan vegetación, constituyen soluciones que reproducen algunos de los procesos hidrológicos naturales asociados al suelo. Estos sistemas permiten almacenar temporalmente la escorrentía, favorecer la infiltración o laminar antes de derivar el agua hacia otras infraestructuras del sistema de drenaje. No obstante, su diseño debe adaptarse a las condiciones específicas de cada emplazamiento. En determinadas localizaciones puede ser necesario limitar la infiltración al terreno por razones geotécnicas o ambientales, optando por configuraciones que almacenen temporalmente el agua o la conduzcan posteriormente a la red de saneamiento. Este es precisamente el enfoque adoptado en el caso de estudio de Santander, donde el pavimento permeable actúa como sistema de tratamiento y laminación previo a la incorporación del agua al sistema convencional de alcantarillado, reduciendo la carga contaminante que finalmente llega a la estación depuradora.

El proceso participativo desarrollado en Santander puso asimismo de manifiesto la importancia de incorporar visiones complementarias a las estrictamente hidráulicas. En este sentido, SEO/BirdLife planteó una estrategia más ambiciosa de renaturalización urbana alineada con el Reglamento (UE) 2024/1991 sobre la Restauración de la Naturaleza. Esta visión amplía el concepto de hibridación más allá de la simple incorporación puntual de SbN, proponiendo actuaciones que incluyan la recuperación de cauces urbanos, la protección de suelos periurbanos frente a la impermeabilización y la incorporación sistemática de infraestructuras verdes en nuevos desarrollos urbanísticos.

Asimismo, se destaca la necesidad de aumentar la resiliencia de las infraestructuras de drenaje en zonas densamente urbanizadas mediante actuaciones distribuidas de pequeña escala, aprovechando reformas de calles, plazas y espacios públicos para incorporar soluciones naturales capaces de gestionar la escorrentía en origen y mejorar simultáneamente la calidad ambiental del entorno urbano.

La metodología MCDA desarrollada en D4RUNOFF, junto con el catálogo paramétrico de SbN descrito anteriormente, se encuentra disponible a través del entregable público del proyecto D3.2 (Andrés-Valeri et al., 2024) depositado en el repositorio ZENODO. La metodología ha sido concebida para facilitar su reutilización y adaptación en otros contextos urbanos, permitiendo a administraciones y operadores avanzar hacia modelos híbridos de gestión de aguas pluviales

alineados con los objetivos europeos de resiliencia climática, reducción de la contaminación urbana y restauración ecológica. Para facilitar su aplicación práctica, el proyecto a través de sus socios del Instituto Tecnológico de Galicia (ITG) ha desarrollado una plataforma web específica que integra las distintas herramientas metodológicas generadas por el consorcio y permite visualizar de forma conjunta los resultados de los procesos de selección y evaluación de SbN, además de otras funcionalidades. El acceso a esta plataforma se realiza a través de la página web del proyecto D4RUNOFF.

Cabe destacar que una vez finalizado el proyecto D4RUNOFF, una filial de la empresa Acque Spa ha contactado con la Universidad de Cantabria para utilizar la metodología desempeñada en el proyecto con el fin de incorporar las áreas identificadas y los beneficios evaluados para la posible implementación de las SbN dentro del Plan Director de la ciudad de Pontedera, con el fin de mejorar el comportamiento global del sistema, especialmente durante los episodios de lluvia.

3.4 Evaluación económica y ambiental de la hibridación de sistemas consolidados

Los apartados anteriores permiten identificar las tipologías de SbN más adecuadas para cada problemática, determinar sus posibles ubicaciones y evaluar su capacidad para gestionar tanto la cantidad como la calidad de la escorrentía urbana, incluyendo la eliminación de contaminantes de preocupación emergente (CECs).

No obstante, una cuestión fundamental permanece abierta: una vez identificadas las soluciones más adecuadas, ¿es posible la hibridación entre las infraestructuras convencionales y las SbN?, ¿es realmente viable y necesario gestionar el 100 % de la escorrentía mediante SbN? ¿o es ya eficiente una implantación progresiva que combine infraestructuras verdes y grises?

Para responder a estas preguntas, el proyecto D4RUNOFF desarrolló una metodología de evaluación ambiental y económica basada en Análisis de Ciclo de Vida (ACV o LCA en inglés) y Coste de Ciclo de Vida (CCV o LCC en inglés), permitiendo cuantificar los impactos asociados a diferentes configuraciones de drenaje urbano.

La evaluación se realizó en colaboración con la empresa danesa VCS, gestora del ciclo urbano del agua en Odense y con amplia experiencia en la implementación y mantenimiento de SbN. Para ello se empleó su herramienta StormLCA, desarrollada por la empresa a partir del software SimaPro, utilizando el método de caracterización de impactos ReCiPe 2016.

La metodología completa se encuentra descrita en el entregable público D5.5 (Damkjaer et al., 2026) y en las publicaciones derivadas del proyecto, actualmente en revisión con el título “Life cycle framework assessment of urban stormwater management strategies integrating nature-based solutions”.

3.4.1 Escenarios de hibridación evaluados

Uno de los principales objetivos del análisis fue evaluar el comportamiento ambiental y económico de diferentes grados de hibridación de los sistemas urbanos de drenaje. Partiendo de la realidad europea, caracterizada por la coexistencia de sistemas unitarios y separativos, se definieron cuatro escenarios representativos que se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Escenarios elegidos para la comparación de sistemas de drenaje alternativos:

Escenario	Origen principal
E1	Sistema unitario convencional, donde el 100 % de las aguas residuales y de la escorrentía pluvial se transportan mediante una única red de saneamiento.
E2	Sistema basado en SbN, donde el 100 % de la escorrentía pluvial se gestiona mediante soluciones basadas en la naturaleza y únicamente las aguas residuales son transportadas a través de la red de saneamiento.
E3	Sistema separativo convencional, con redes independientes para aguas residuales y aguas pluviales.
E4	Sistema híbrido, donde el 80 % de la escorrentía continúa gestionándose mediante la red convencional y el 20 % restante se trata mediante SbN.

El escenario híbrido (E4) se definió como una aproximación realista a corto plazo, considerando que una reducción aproximada del 20 % del volumen de escorrentía gestionado por la red convencional podría traducirse en reducciones energéticas superiores al 30 % asociadas a la recogida, transporte y tratamiento de aguas pluviales.

Las tipologías evaluadas incluyeron pavimentos permeables, áreas de bioretención y balsas de retención o detención, al tratarse de sistemas presentes en los casos de estudio monitorizados durante el proyecto.

3.4.2 Incorporación de contaminantes emergentes al análisis de ciclo de vida

Uno de los principales avances metodológicos del proyecto fue la incorporación explícita de contaminantes emergentes asociados a la escorrentía urbana dentro del análisis de ciclo de vida.

Tal y como se describió en el apartado anterior, D4RUNOFF identificó más de un centenar de contaminantes emergentes presentes en la entrada de las SbN monitorizadas. Sin embargo, la integración de estos compuestos en una metodología ACV exige la existencia previa de factores de caracterización compatibles con las bases de datos de SimaPro y en concreto en ReCiPe 2016.

La selección de los compuestos finalmente incluidos siguió el siguiente procedimiento:

1. Identificación de contaminantes detectados en los casos de estudio en la entrada de las SbN por encima de los límites de detección analíticos.
2. Verificación de la existencia de factores de caracterización disponibles en ReCiPe para:
    - Eutrofización de agua dulce.
    - Eutrofización marina.
    - Ecotoxicidad en agua dulce.
    - Ecotoxicidad marina.
    - Daño a ecosistemas.
3. Selección de un conjunto representativo de contaminantes asociados a usos urbanos e industriales.

Los contaminantes incorporados finalmente al ACV fueron los detallados en el cuadro 4.

Cuadro 4. Contaminantes emergentes incluidos en el ACV de D4RUNOFF:

Compuesto Químico	Origen principal
4-Nitrofenol	Industrial
Cafeína	Natural / alimentario
Tris(2-butoxietil) fosfato	Industrial
4-Ácido Hidroxibenzoico	Natural e industrial
Bis(2-etilhexil) fosfato	Industrial

Debe señalarse que esta selección presenta una limitación importante. Algunos de los contaminantes identificados como más relevantes en los casos de estudio, como la 6PPD-quinona, la 1,3-difenilguanidina, el ácido benzotiazol-2-sulfónico o la claritromicina, no disponen actualmente de factores de caracterización compatibles con ReCiPe, lo que impide su incorporación directa al análisis.

Esta limitación resulta especialmente relevante ya que algunos de estos compuestos fueron identificados como prioritarios tanto por los análisis toxicológicos del proyecto como por la metodología de evaluación de riesgos desarrollada por socios del proyecto dentro del entregable D5.4.

Sí fue posible incorporar el 4-nitrofenol, seleccionado tanto por su disponibilidad para ACV como por su elevada frecuencia de detección en las campañas de monitorización desarrolladas en Odense.

3.4.3 Eficiencias de eliminación consideradas

Para incorporar el efecto de las SbN en el análisis ambiental se utilizaron las eficiencias de eliminación obtenidas a partir de la monitorización realizada en los casos de estudio. Los resultados se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Eficiencias de eliminación calculadas en el proyecto D4RUNOFF para cada contaminante y para cada tipo de SbN.

Compuesto Químico	Balsa de retención (%)	Bioretención (%)	Pavimento permeable (%)	Cuneta (%)
4-Nitrofenol	67	57	77	8
Cafeína	88	0	0	45
Tris(2-butoxietil) fosfato	35	0	76	1
4-Ácido Hidroxibenzoico	64	0	0	0
Bis(2-etilhexil) fosfato	68	56	0	39

Estas eficiencias deben interpretarse como valores orientativos y no como rendimientos absolutos. Tal y como se discutió en el apartado 3.2, los resultados disponibles proceden de campañas de monitorización realizadas bajo diferentes condiciones climáticas, hidráulicas y operacionales.

No obstante, representan una aproximación razonable al comportamiento real a largo plazo de estas infraestructuras y permiten incorporar la eliminación de contaminantes emergentes dentro de una metodología ACV comparable.

3.4.4 Resultados del análisis de ciclo de vida

Los análisis se realizaron considerando el desarrollo de un nuevo barrio urbano en el que todavía no existe infraestructura de drenaje, permitiendo comparar de forma homogénea las distintas configuraciones.

Los resultados muestran que los sistemas unitarios convencionales presentan menores impactos asociados a la construcción de infraestructuras. Sin embargo, durante la fase de operación generan elevadas demandas energéticas debido al transporte y tratamiento conjunto de aguas residuales y pluviales en las EDAR. Asimismo, presentan impactos relevantes asociados a la presencia de contaminantes emergentes.

Por su parte, los sistemas separativos convencionales muestran los mayores impactos ambientales relacionados con la calidad del agua debido a que se consideró el vertido directo de escorrentía urbana sin tratamiento previo. Aunque presentan menores consumos energéticos durante la operación, los impactos asociados a los contaminantes liberados al medio receptor son significativamente superiores.

Los sistemas completamente basados en SbN permiten reducir de forma muy significativa los impactos relacionados con la calidad del agua y las emisiones de contaminantes emergentes. Sin embargo, requieren mayores inversiones iniciales y también mayores costes de mantenimiento, asociados a la vegetación, los sustratos filtrantes y la gestión de sedimentos. A este respecto, las diferencias entre tipologías de SbNs resultan relevantes. Los estanques o balsas de retención presentan impactos constructivos superiores a los observados en áreas de bioretención o cunetas vegetadas, debido al mayor volumen de excavación y materiales requeridos.

Finalmente, los resultados integrados del análisis ACV y CCV muestran que los sistemas híbridos constituyen la alternativa que proporciona el mejor equilibrio entre rendimiento ambiental, eficiencia energética y viabilidad económica.

3.4.5 Implicaciones para la transición del sistema de drenaje urbano

Una de las principales lecciones aprendidas del proyecto D4RUNOFF es que la transición hacia modelos híbridos no requiere necesariamente una sustitución completa de las infraestructuras existentes por SbN.

De hecho, los resultados indican que incluso niveles moderados de hibridación, como el escenario del 20 %, generan mejoras ambientales y energéticas significativas. Esto plantea una reflexión relevante para la planificación futura de las ciudades europeas: reducciones relativamente modestas de la escorrentía gestionada por la red convencional ya producen beneficios apreciables, facilitando la implantación progresiva de objetivos de hibridación para lograr ventajas aún mayores. Esta conclusión cobra especial relevancia en España, donde aproximadamente tres cuartas partes de las redes de saneamiento son unitarias y donde gran parte de las EDAR operan todavía con tratamientos secundarios. En este contexto, las importantes inversiones requeridas para adaptarse a la nueva Directiva Europea de Aguas Residuales Urbanas deberían contemplar la incorporación simultánea de SbN como herramienta complementaria para gestionar la escorrentía urbana en origen, reduciendo así la problemática a resolver en las EDAR.

La combinación de infraestructuras convencionales y SbN permite reducir consumos energéticos, mejorar la calidad del agua y disminuir las cargas contaminantes que reciben las masas de agua receptoras, entre los beneficios más destacados. En consecuencia, la hibridación aparece no sólo como una estrategia ambientalmente favorable, sino como una vía realista y económicamente viable para avanzar hacia sistemas urbanos de drenaje más sostenibles y resilientes.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el proyecto D4RUNOFF muestran que la hibridación progresiva de los sistemas urbanos de drenaje mediante Soluciones Basadas en la Naturaleza constituye una estrategia técnicamente viable para gestionar tanto la cantidad como la calidad de la escorrentía urbana, incluyendo la reducción de contaminantes de preocupación emergente. Las metodologías desarrolladas durante el proyecto demuestran que estas soluciones pueden diseñarse, seleccionarse y evaluarse con un nivel de rigor comparable al de las infraestructuras convencionales, facilitando su integración en los procesos de planificación y gestión urbana.
Desde una perspectiva ambiental y económica, los sistemas híbridos presentan el mejor equilibrio entre rendimiento hidráulico, calidad del agua, consumo energético y costes de implantación y operación. Los análisis realizados muestran que incluso niveles moderados de hibridación generan mejoras significativas respecto a sistemas unitarios o separativos convencionales.

Además, la hibridación aporta beneficios que trascienden el ámbito estrictamente ambiental. En un contexto caracterizado por el envejecimiento de las redes de saneamiento, la baja tasa de renovación de infraestructuras y las elevadas inversiones requeridas para cumplir la Directiva (UE) 2024/3019, las SbN pueden contribuir a reducir los volúmenes transportados por las redes, disminuir las cargas hidráulicas que llegan a las estaciones depuradoras y reducir los consumos energéticos asociados a la recogida, transporte y tratamiento de las aguas pluviales. De este modo, las SbN no deben considerarse únicamente como elementos de adaptación climática o renaturalización urbana, sino también como infraestructuras capaces de complementar y optimizar el funcionamiento de los sistemas convencionales existentes

Asimismo, resulta recomendable impulsar proyectos demostrativos, programas de monitorización y mecanismos de intercambio de experiencias entre administraciones y operadores con el fin de generar confianza institucional y evidencias locales que respalden la adopción progresiva de modelos híbridos de drenaje urbano. La acumulación de casos de éxito permitirá acelerar la incorporación de estas soluciones en normativas urbanísticas, planes municipales y estrategias de adaptación al cambio climático.

5. RECOMENDACIONES Y RETOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en el proyecto europeo D4RUNOFF ponen de manifiesto que la hibridación progresiva de los sistemas urbanos de drenaje mediante Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) constituye una estrategia viable para afrontar simultáneamente los retos asociados al cambio climático, la calidad de las aguas urbanas, la adaptación a la nueva Directiva Europea de Aguas Residuales Urbanas y la renovación de unas infraestructuras cada vez más envejecidas.

No obstante, alcanzar una implantación generalizada de estos sistemas requiere continuar avanzando tanto desde la gestión pública como desde la investigación y el desarrollo tecnológico.

5.1 Recomendaciones para técnicos y tomadores de decisiones

La principal recomendación es integrar las SbNs en las estrategias de renovación y adaptación de infraestructuras. Las importantes inversiones necesarias para adaptar las redes de saneamiento y las estaciones depuradoras a los requisitos establecidos por la Directiva (UE) 2024/3019 representan una oportunidad para incorporar Soluciones Basadas en la Naturaleza dentro de las estrategias de modernización del ciclo urbano del agua. En lugar de abordar la adaptación exclusivamente mediante ampliaciones de capacidad o nuevas tecnologías de tratamiento centralizado, se recomienda evaluar conjuntamente actuaciones de hibridación que permitan reducir caudales, disminuir cargas contaminantes y gestionar la mayor parte posible de la escorrentía en origen. Esta aproximación puede contribuir a reducir costes energéticos, prolongar la vida útil de las infraestructuras existentes y mejorar la eficiencia global del sistema.

Como recomendaciones concretas, desde el proyecto D4RUNOFF se destacan las siguientes cuestiones:

- Los nuevos desarrollos urbanísticos representan una oportunidad única para implantar sistemas híbridos de drenaje desde el origen, minimizando costes futuros de adaptación y evitando la generación de nuevos problemas asociados a la escorrentía urbana.

- En ciudades consolidadas, donde la sustitución completa de los sistemas existentes no resulta viable técnica ni económicamente, se recomienda aprovechar actuaciones puntuales de reurbanización, renovación de calles, plazas, aparcamientos o espacios públicos para incorporar progresivamente SbN.

- Favorecer el uso de materiales locales y de bajo impacto ambiental para minimizar los impactos ambientales y económicos de la implantación de las SbNs.

- La experiencia obtenida en D4RUNOFF demuestra que incluso porcentajes moderados de hibridación generan mejoras significativas desde el punto de vista ambiental y energético. Por ello, la transición puede abordarse mediante objetivos progresivos de implantación.

- Las administraciones y operadores deberían desarrollar programas de monitorización a largo plazo para evaluar el comportamiento real de las SbN implantadas, incluyendo fundamentalmente el control del rendimiento hidráulico y la eliminación de contaminantes convencionales y emergentes, pero también la evaluación de componentes ecosistémicos y sociales, precisamente en el marco de la renaturalización de las ciudades.

- Se recomienda así mismo revisar el “D6.11 Final Policy Brief to address diffuse pollution from runoff in urban areas” disponible en ZENODO, donde se profundiza en las principales lecciones aprendidas durante las pruebas en casos de estudio del proyecto D4RUNOFF y se recopilan en forma de recomendaciones para los responsables políticos.

5.2 Retos futuros para la comunidad científica

Futuros estudios deberían evaluar cómo diferentes porcentajes de hibridación afectan a la capacidad necesaria de redes de saneamiento, estaciones de bombeo y EDAR, así como a los costes derivados de la implantación de tratamientos avanzados exigidos por la nueva Directiva Europea de Aguas Residuales Urbanas. Esta información permitirá incorporar de forma más precisa las SbN en los procesos de planificación estratégica y análisis coste-beneficio de las inversiones públicas.

Aunque durante D4RUNOFF se identificaron más de un centenar de contaminantes emergentes en aguas de escorrentía urbanas, todavía existe un conocimiento limitado sobre su origen, transporte, transformación y efectos ecológicos. Resulta especialmente necesario ampliar el conocimiento sobre contaminantes asociados al tráfico rodado, materiales urbanos, microplásticos y PFAS.
Una de las principales conclusiones del proyecto es que no existe una SbN universalmente óptima para todos los contaminantes. Las futuras investigaciones deberían avanzar hacia la identificación de relaciones específicas entre los materiales de construcción, la vegetación empleada, el tiempo de residencia hidráulica y el tratamiento de cada compuesto emergente individual.

Gran parte de la información disponible proviene de estudios de corta duración realizados bajo condiciones particulares. Se necesitan programas de seguimiento plurianuales que permitan evaluar: los procesos de envejecimiento del sistema, la capacidad de acumulación de contaminantes y su posterior liberación o bien la necesidad de tratamiento de dichos materiales al final de su vida útil o cómo influye la variabilidad estacional entre otros factores.

Incorporar nuevos contaminantes emergentes a las bases de datos de ACV ya que uno de los principales obstáculos identificados durante el proyecto fue la imposibilidad de incluir algunos de los contaminantes más relevantes, detectados en la escorrentía urbana, como por ejemplo los mencionados en el cuadro 1 (6PPD-quinona, 1,3-difenilguanidina, Ácido benzotiazol-2-sulfónico, Claritromicina) dentro de los análisis de ciclo de vida.

Por otro lado, la elevada heterogeneidad metodológica observada entre estudios continúa dificultando la comparación de resultados. Por lo que resulta necesario avanzar hacia protocolos armonizados de: muestreo, caracterización química o de la evaluación del riesgo y del rendimiento de las SbN.

Finalmente, se recomienda aplicar y validar las metodologías desarrolladas en D4RUNOFF en otras ciudades y regiones climáticas. Incluyendo las particularidades de cada intervención.

5.3 Principal lección aprendida

La principal lección aprendida durante D4RUNOFF es que la transición hacia sistemas urbanos de drenaje más sostenibles y resilientes no pasa por tratar de sustituir completamente las infraestructuras convencionales, sino por su evolución hacia configuraciones híbridas capaces de combinar las ventajas de las infraestructuras grises con los beneficios ambientales, climáticos y sociales de las Soluciones basadas en la Naturaleza. La consolidación de estas soluciones como infraestructuras plenamente

integradas en los procesos de planificación urbana requerirá continuar generando evidencias técnicas, económicas y ambientales que permitan evaluarlas con el mismo rigor que cualquier otra infraestructura del ciclo urbano del agua.

Bibliografía

Andrés-Valeri, V. C., García-Argüelles, S., Manchado del Val, C., Rodriguez-Hernandez, J., Indacoechea, I., & Castro Fresno, D. (2023). *D3.1. Parametric library of Nature Based Solutions (NBS)*. www.d4runoff.eu

Aryal, R., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Naidu, R. (2010). Urban stormwater quality and treatment. In *Korean Journal of Chemical Engineering* (Vol. 27, Number 5, pp. 1343–1359). https://doi.org/10.1007/s11814-010-0387-0

Cojoc, L., de Castro-Català, N., de Guzmán, I., González, J., Arroita, M., Besolí-Mestres, N., Cadena, I., Freixa, A., Gutiérrez, O., Larrañaga, A., Muñoz, I., Elosegi, A., Petrovic, M., & Sabater, S. (2024). Pollutants in urban runoff: Scientific evidence on toxicity and impacts on freshwater ecosystems. *Chemosphere*, *369, 143806*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.

Andrés-Valeri, V. C., Roldán Valcarce, A., García-Argüelles, S., Rodriguez-Hernandez, J., Pascual-Muñoz, P., & Castro-Fresno, D. (2024). *D3.2. Multi-criteria decision analysis (MCDA) for selection and location of hybrid solutions*. www.d4runoff.eu

Roed Bonde, L. (2025). *D5.4 Final testing report in case studies Data driven implementation of hybrid nature-based solutions for preventing and managing diffuse pollution from urban water runoff*. www.d4runoff.eu

Damkjaer, J. A., Denmark, V., Esparza, R. A. N., & Pascual Muñoz, P. (2026). *D5.5 Validation Report in Case Studies M40 Data driven implementation of hybrid nature-based solutions for preventing and managing diffuse pollution*. www.d4runoff.eu

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental. (2025). *Ficha 01_Contaminación puntual urbana*. https://www.chcantabrico.es/plan-hidrologico-de-la-demarcacion-hidrografica-del-cantabrico-occidental-2028-2033

DiBlasi, C. J., Li, H., Davis, A. P., & Ghosh, U. (2009). Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility. *Environmental Science and Technology*, *43*(2), 494–502. https://doi.org/10.1021/es802090g

Directiva (UE) 2024/3019. (2024). *Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE)*. http://data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/ojhttp://data.europa.eu/eli/C/2023/250/oj.

Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., Dubois, P., Kajeiou, M., Meffray, L., Partibane, C., Saad, M., Lima, M. V. de A., & Gromaire, M. C. (2019). Stochastic method for evaluating removal, fate and associated uncertainties of micropollutants in a stormwater biofilter at an annual scale. *Water (Switzerland)*, *11*(3). https://doi.org/10.3390/w11030487

Flanagan, K., & Caupos, E. (2018). *Biofiltration for the on-site management of micropollutants in urban runoff: lessons from a field study*. https://www.researchgate.net/publication/327645747

Franco, J., & Matamoros, V. (2016). Mitigation of polar pesticides across a vegetative filter strip. A mesocosm study. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(24), 25402–25411. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7516-1

Gu, X., Rodgers, T. F. M., Spraakman, S., Van Seters, T., Flick, R., Diamond, M. L., Drake, J., & Passeport, E. (2021). Trace Organic Contaminant Transfer and Transformation in Bioretention Cells: A Field Tracer Test with Benzotriazole. *Environmental Science and Technology*, *55*(18), 12281–12290. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01062

Typsa, KPMG & Comisión Europea. *Guía para las decisiones estratégicas sobre la colaboración público-privada en la gestión de las plantas de aguas residuales*. (2021).

iAgua Data. (2026). *Cuánto cuesta a España la nueva Directiva de aguas residuales*.

Krutz, L. J., Senseman, S. A., Zablotowicz, R. M., & Matocha, M. A. (2005). *Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips: a review*.

Lange, K., Magnusson, K., Viklander, M., & Blecken, G. T. (2021). Removal of rubber, bitumen and other microplastic particles from stormwater by a gross pollutant trap - bioretention treatment train. *Water Research*, *202*. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117457

Lange, K., Österlund, H., Viklander, M., & Blecken, G. T. (2022). Occurrence and concentration of 20–100 µm sized microplastic in highway runoff and its removal in a gross pollutant trap – Bioretention and sand filter stormwater treatment train. *Science of the Total Environment*, *809*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151151

Molnár Karlsson, T., Bollmann, U. E., Kosjek, T., Arāja, A., Bērtiņš, M., Tempestini, S., Águila, J. F., Morales, N., Díez-Montero, R., Johnsen, A. R., & Christensen, J. H. (2026). Inventory and risk characterization of urban runoff pollutants in Europe. *Water Research*, *297*. https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125680

Montagna, M. T., De Giglio, O., Calia, C., Pousis, C., Triggiano, F., Murgolo, S., De Ceglie, C., Bagordo, F., Apollonio, F., Diella, G., Narracci, M., Acquaviva, M. I., Ferraro, G. B., Mancini, P., Veneri, C., Brigida, S., Grassi, T., De Donno, A., Di Iaconi, C., Mascolo, G. (2020). Microbiological and chemical assessment of wastewater discharged by infiltration trenches in fractured and karstified limestone (Sca.re.s. project 2019–2020). *Pathogens*, *9*(12), 1–20. https://doi.org/10.3390/pathogens9121010

Müller, A., Österlund, H., Marsalek, J., & Viklander, M. (2020). The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. In *Science of the Total Environment* (Vol. 709). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125

Rühmland, C. S., Wick, A., Ternes, T. A., & Barjenbruch, M. (2015). Fate of pharmaceuticals in a subsurface flow constructed wetland and two ponds. *Ecological Engineer Ing*, *80*, 125–139. https://doi.org/10.1016/j

Sébastian, C., Becouze-Lareure, C., Lipeme Kouyi, G., & Barraud, S. (2015). Event-based quantification of emerging pollutant removal for an open stormwater retention basin - Loads, efficiency and importance of uncertainties. *Water Research*, *72*, 239–250. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.014

Stejskalová, L., Ansorge, L., Rosendorf, P., Fiala, D., Chernysh, Y., Blanco, A., Minguez, L., Kučera, J., Břicháčková, A., Vološinová, D., Smetanová, L., & Váňa, M. (2026). Grey water footprint of pharmaceuticals and personal care products discharged via urban wastewater. *Scientific Reports*, *16*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-026-48905-5

Tapera, M., Chokwe, R. C., Munonde, T. S., Mamba, G., & Madikizela, L. M. (2026). Pharmaceutical pollutants in wastewater treatment plants: A global review of occurrence, treatment efficiency, and implications for receiving water bodies. *Next Research*, *6*, 101430. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101430

Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Asheley, R. & Kellagher, R. (2016).*The SuDs Manual*. CIRIA (C753).

Tian, Z., Zhao, H., Peter, K. T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C., Hu, X., Prat, J., Mudrock, E., Hettinger, R., Cortina, A. E., Biswas, R. G., Vinicius, F., Kock, C., Soong, R., Jenne, A., Du, B., Hou, F., He, H., … Kolodziej, E. P. (2022). *A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon*. https://www.science.org

Wang, M., Zhao, J., Xiong, Z., Zhang, M., Wang, L., & Tan, S. K. (2025). Strategic deployment of nature-based solutions for urban flood management in high-density urban landscapes. *Ecological Indicators*, *176*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113681

Xiong, C., & Chui, T. F. M. (2026). Tracing technique review: Contamination in municipal separate storm sewer systems (MS4s). In *Water Research* (Vol. 290). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.125059

Zhang, K., Zheng, Z., Mutzner, L., Shi, B., McCarthy, D., Le-Clech, P., Khan, S., Fletcher, T. D., Hancock, M., & Deletic, A. (2024). Review of trace organic chemicals in urban stormwater: Concentrations, distributions, risks, and drivers. In *Water Research* (Vol. 258). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121782

CONAMA 2026