Manual Técnico de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y su Implementación en el Municipio de Gijón

emA
Gijón | Xixón



Universidad de Oviedo

Gijón. Febrero de 2024

Manual Técnico de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y su Implementación en el Municipio de Gijón

Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática

Para la **Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A.**

Universidad de Oviedo

Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:

Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Sañudo Fontaneda, L.A., Roces García, J., Allende Prieto, C., Rey Mahía, C., Suárez-Inclán, A.M. (2024). *Manual Técnico de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y su Implementación en el Municipio de Gijón*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.

No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2024 Universidad de Oviedo
© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.
Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.
Consulte las condiciones de la licencia en: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es

Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional.

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo
Edificio de Servicios - Campus de Humanidades
ISNI: 0000 0004 8513 7929
33011 Oviedo - Asturias
985 10 95 03 / 985 10 59 56
servipub@uniovi.es
www.publicaciones.uniovi.es

I.S.B.N.: 978-84-10135-10-9

CRÉDITOS

Esta publicación es el resultado del proyecto de investigación titulado "*Estudio para la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el Concejo de Gijón, Asturias*" con código FUO-21-226, y encargado por la Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A. al Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo a través de la Fundación de la Universidad de Oviedo.

Autores:

Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática, Universidad de Oviedo

Luis Ángel Sañudo Fontaneda (Coordinador de la obra)
Profesor Titular de Universidad, Área de Ingeniería de la Construcción.

Jorge Roces García
Profesor Contratado Doctor, Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería.

Cristina Allende Prieto
Profesora Contratada Doctora, Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría.

Carlos Rey Mahía
Investigador Predoctoral.

Antonio Menéndez Suárez-Inclán
Investigador Predoctoral.

Supervisado por:

Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A.

Fernando Alonso González
Jefe de los servicios técnicos de EMASA

Covadonga Gómez Pereiro
Ingeniera Oficina Técnica de EMASA

Fotografía de la portada: Escultura de Las Dríadas, de Manuel Álvarez Laviada, situada en el estanque pequeño del Parque de Isabel la Católica, Gijón. Autor: Jorge Roces García.

Fotografías de las portadillas de los capítulos:

- Capítulos 1, 2 y 3: Luis Manso Ibaseta (colaboración para el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo).
- Capítulo 4: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Las fotografías utilizadas en el documento han sido realizadas por:

- Luis Manso Ibaseta (colaboración para el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo): Fig. 1, 5, 65.
- Antonio Menéndez Suárez-Inclán: Fig. 68.
- Carlos Rey Mahía: Fig. 36, 37, 62, 64.
- Luis Ángel Sañudo Fontaneda: Fig. 2, 3, 4, 25, 26, 29, 38, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 54, 56, 57, 58, 59, 61, 63, 66, 67.
- Roberto Valcarce Vuelta: Fig. 43 (cortesía para el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo).
- Imágenes adaptadas o reutilizadas de fuentes publicadas en abierto:
    - Fig. 7: Suárez-Inclán et al. (2022).
    - Fig. 8 y 10: Ayuntamiento de Gijón (2018).
    - Fig. 41: Sañudo-Fontaneda et al. (2020).
    - Fig. 42: Núñez Collado et al. (2019).
    - Fig. 52 y 53: Sañudo-Fontaneda et al. (2018).

Todas las gráficas y tablas asociadas con cálculos de diseño han sido elaboradas y supervisadas por los autores.

La infografía y esquemas incluidos en el documento han sido elaboradas por los siguientes integrantes del Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo:

- Gerardo Irak Pérez Núñez, Jorge Roces García y Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Diseño y maquetación: Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Este manual técnico tiene el objetivo de servir de orientación e introducción para técnicos e investigadores en la planificación, diseño, dimensionamiento, construcción, operación, monitorización, conservación y mantenimiento de Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SUDS) en el municipio de Gijón, Principado de Asturias, España. El documento pretende acercar al lector a los aspectos más relevantes necesarios para un diseño integral de detalle de las técnicas SUDS, aportando un marco normativo extenso fruto de la recopilación de las normativas históricas que han tenido relación con los SUDS lo largo del tiempo.

La información presentada en este documento técnico incluye todos los cálculos hidrológicos asociados con las condiciones particulares de la ciudad de Gijón, pudiendo ser trasladada su metodología a otras ciudades del mundo, siendo ésta una de las contribuciones más destacadas del manual.

Es importante reseñar que este manual técnico no representa una normativa o una instrucción técnica, no debiéndose tomar como tal. Se recomienda que el usuario del manual se mantenga actualizado, tanto con los nuevos desarrollos de las técnicas SUDS y sus experiencias de implementación, uso de materiales innovadores, nuevos procedimientos de cálculo y modelización, etc., como en lo referente a las normativas que seguirán evolucionando en los próximos tiempos al respecto.

PRÓLOGO

"*Miles de personas han sobrevivido sin amor, ninguna sin agua*"

W. H. Auden.

Nos es grato presentar este "Manual Técnico de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y su Implementación en el Municipio de Gijón" realizado conjuntamente por el Grupo de investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo y los Servicios Técnicos de la Empresa Municipal de Aguas de Gijón (EMA).

Desde su fundación en 1966, en la EMA se ha puesto especial cuidado en la transmisión del conocimiento adquirido a través de sus muchas experiencias prácticas. Los problemas derivados de las inundaciones en determinadas áreas del concejo han ido creciendo con la urbanización de zonas que anteriormente estaban ocupadas por terrenos naturales. Aquella gota que antaño caía en los praos y que bien se infiltraba en el terreno, bien acometía un tortuoso camino de escorrentía hasta los sistemas de alcantarillado, goza ahora de una cómoda pista rápida por la que se desliza que acorta su desplazamiento hasta minutos o unas pocas horas. Como solución a las situaciones más críticas se construyeron sendos tanques de tormenta en el entorno del Museo del Ferrocarril, en el Parque de los Hermanos Castro y frente a la Playa del Arbeyal.

Otros espacios de la ciudad requieren ahora de cirugía de menor entidad, pero de igual precisión e importancia. En ellos se ha decidido por parte de la corporación la instalación sistemas de drenaje sostenible, al modo de los que se están comenzando a ejecutar en las ciudades europeas con mayor sensibilidad medioambiental. Se conseguirá así un doble efecto: la recogida de aguas pluviales en origen, evitando los inconvenientes tanto a peatones como a tráfico rodado y, por otra parte, la posible reutilización de esos caudales para otros usos de cercanía como riegos o baldeos.

La historia de la ciudad de Gijón, como la de la mayoría de asentamientos humanos, está llena de obras que la han permitido disfrutar del agua y protegerse de sus excesos. Y, aunque el poeta inglés que se cita en encabezamiento dijera que los humanos pueden sobrevivir sin amor, aún no conozco a ningún gijonés que no demuestre un incondicional y perenne enamoramiento de su ciudad.

Hagamos pues caso al vate británico, aunque no en lo que dice en el aserto citado sino en aquel otro verso del poema que se popularizó en la película «Cuatro bodas y un funeral», que asegura que «nada ahora podrá ser como antes». Cierto. Y por ello, desde la Universidad de Oviedo y la Empresa Municipal de Aguas de Gijón les damos la bienvenida al futuro del drenaje urbano.

Vidal Gago Pérez

Director Gerente de la EMA

Índice de contenidos

Capítulo 1 – Introducción 1

1.1 Antecedentes y necesidad del manual técnico 3

1.2 Marco 4

1.2.1 Marco normativo 4

1.2.1.1 Contexto Europeo 5

1.2.1.2 Normativa estatal 6

1.2.1.3 Normativa autonómica 10

1.2.1.4 Normativa de carácter municipal 12

1.2.1.5 Otras normativas y documentos legales relevantes asociados con el diseño de SUDS 14

1.2.2 Guías y manuales técnicos sobre SUDS 14

1.2.2.1 Nacionales 15

1.2.2.2 Internacionales 17

1.3 Experiencias previas y desarrollo actual de la implementación de SUDS en Gijón 21

1.4 Estructura del documento 24

Capítulo 2 – Planeamiento 27

2.1 Propuesta de criterios e indicadores 29

2.1.1 Establecimiento de objetivos estratégicos de la gestión de pluviales 30

2.1.2 Siguientes etapas de diseño 37

2.2 Identificación de áreas estratégicas para la implementación de SUDS 40

2.3 Sistemas de análisis multicriterio y toma de decisiones en SUDS 46

2.3.1 Tipos de MCDA aplicados a SUDS 46

2.3.2 Herramientas de análisis multicriterio y de modelización SUDS 50

2.3.2.1 B£ST 50

2.3.2.2 US EPA SWMM 51

2.3.2.3 Otras herramientas y esquemas de trabajo 51

2.3.2.4 Recomendación de posibles herramientas para su uso en Gijón 51

Capítulo 3 – Criterios mínimos de diseño 53

3.1 Aspectos generales de diseño 55

3.2 Condicionantes locales de Gijón 57

3.2.1 Hidrogeología 57

3.2.2 Cuencas hidrológicas asociadas a la gestión de pluviales en Gijón 58

3.2.3 Zonas inundables 59

***3.2.3.1** Zonas inundables de origen fluvial 60*

3.2.3.2 *Zonas inundables de origen marino* ... *60*
3.2.4 Tipología de usos del suelo ... 60
3.2.5 Caracterización de los patrones históricos de precipitaciones diarias en Gijón (1938-2022) ... 61
3.2.5.1 Análisis de frecuencias volumétricas ... *62*
3.2.5.2 Estadísticos descriptivos de los valores extremos ... *66*
3.2.5.3 Funciones de distribución de valores extremos ... *66*
3.2.5.4 Obtención de las curvas I-D-F de la serie histórica ... *72*
3.2.5.5 Determinación de los hietogramas de diseño ... *74*
3.2.6 Caracterización de los patrones de precipitaciones diarias por Cuencas en Gijón (2013-2022) 75
3.2.6.1 Análisis de frecuencias volumétricas ... *76*
3.2.7 Caracterización de los patrones de precipitaciones diezminutales por Cuencas en Gijón (2019-2022) 83
3.2.7.1 Identificación de los eventos independientes de lluvia ... *83*
3.2.7.2 Estadísticos descriptivos ... *86*
3.3 Criterios mínimos de diseño ... 87
3.3.1 Calidad: volumen de tratamiento de la calidad de aguas de la escorrentía ... 89
3.3.2 Cantidad: caudales pico de la escorrentía superficial ... 93

Capítulo 4 – Recomendaciones de diseño, construcción y mantenimiento ... 97

4.1 Áreas de biorretención ... 99
4.1.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 99
4.1.2 Recomendaciones de diseño ... 101
4.1.3 Variantes tipológicas ... 115
4.1.3.1 Alcorques inundables – BIO1 ... *115*
4.1.3.2 Parterres inundables – BIO2 ... *118*
4.1.3.3 Jardineras elevadas – BIO3 ... *118*
4.1.3.4 Cunetas de biorretención – BIO4 ... *119*
4.1.3.5 Sistemas de retención anaeróbicos – BIO5 ... *121*
4.1.4 Recomendaciones para la fase de construcción ... 121
4.1.5 Operación, mantenimiento y monitorización ... 125
4.1.6 Referencias especializadas en áreas de biorretención ... 128
4.1.6.1 Referencias a guías y manuales técnicos ... *128*
4.1.6.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión ... *129*
4.1.6.3 Casos de estudio ... *130*
4.1.6.4 Referencias a normativas ... *130*
4.2 Cunetas vegetadas ... 131
4.2.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 131
4.2.2 Recomendaciones de diseño ... 133
4.2.3 Variantes tipológicas ... 140

4.2.3.1 Cunetas vegetadas secas – CUN1 ... 140
4.2.3.2 Cunetas vegetadas húmedas – CUN2 ... 141
4.2.4 Operación, mantenimiento y monitorización ... 141
4.2.5 Referencias especializadas en cunetas vegetadas ... 145
4.2.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos ... 145
4.2.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión ... 146
4.2.5.3 Casos de estudio ... 147
4.3 Cubiertas vegetadas ... 149
4.3.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 149
4.3.2 Recomendaciones de diseño ... 150
4.3.3 Variantes tipológicas ... 155
4.3.4 Operación, mantenimiento y monitorización ... 156
4.3.5 Referencias especializadas en cubiertas vegetadas ... 159
4.3.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos ... 159
4.3.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión ... 159
4.3.5.3 Casos de estudio ... 160
4.4 Firmes permeables ... 161
4.4.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 161
4.4.2 Recomendaciones de diseño ... 162
4.4.3 Variantes tipológicas ... 171
4.4.3.1 Pavimento continuo – PAV1 ... 171
4.4.3.2 Pavimento discontinuo – PAV2 ... 172
4.4.4 Operación, mantenimiento y monitorización ... 176
4.4.5 Referencias especializadas en firmes permeables ... 182
4.4.5.1 Referencias a guías, normativas y manuales técnicos ... 182
4.4.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión ... 183
4.4.5.3 Casos de estudio ... 185
4.4.5.4 Referencias a normativas ... 185
4.5 Sistemas de infiltración ... 187
4.5.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 187
4.5.2 Recomendaciones de diseño ... 187
4.5.3 Variantes tipológicas ... 189
4.5.3.1 Zanjas y pozos de infiltración INF1 ... 189
4.5.3.2 Balsa de infiltración – INF2 ... 190
4.5.4 Operación, mantenimiento y monitorización ... 190
4.5.5 Referencias especializadas en sistemas de infiltración ... 193
4.5.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos ... 193
4.5.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión ... 193

4.5.5.3 Casos de estudio ... 193
4.6 Sistemas de filtración ... 195
4.6.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 195
4.6.2 Recomendaciones de diseño ... 196
4.6.3 Variantes tipológicas ... 201
4.6.3.1 Dren filtrante – FIL1 ... 201
4.6.3.2 Filtros de arena – FIL2 ... 202
4.6.4 Operación, mantenimiento y monitorización ... 203
4.6.5 Referencias especializadas en sistemas de filtración ... 205
4.6.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos ... 205
4.6.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión ... 205
4.6.5.3 Casos de estudio ... 208
4.6.5.4 Referencias a normativas ... 208
4.7 Tanques de almacenamiento ... 209
4.7.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 209
4.7.2 Recomendaciones de diseño ... 211
4.7.3 Variantes tipológicas ... 214
4.7.3.1 Depósitos domésticos / tanques de almacenamiento de viviendas unifamiliares – TAN1 ... 214
4.7.3.2 Depósitos reticulares – TAN2 ... 215
4.7.4 Operación, mantenimiento y monitorización ... 215
4.7.5 Referencias especializadas en tanques de almacenamiento ... 218
4.7.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos ... 218
4.7.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión ... 218
4.7.5.3 Casos de estudio ... 219
4.8 Estanques húmedos y humedales ... 221
4.8.1 Definición y descripción de su funcionamiento ... 221
4.8.2 Recomendaciones de diseño ... 222
4.8.3 Variantes tipológicas ... 224
4.8.3.1 Estanques húmedos – HUM1 ... 224
4.8.3.2 Humedales – HUM2 ... 226
4.8.4 Operación, mantenimiento y monitorización ... 227
4.8.5 Referencias especializadas en estanques y humedales ... 229
4.8.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos ... 229
4.8.5.2 Casos de estudio ... 230
4.9 Técnicas complementarias ... 231

Referencias ... 233

Índice de figuras

Figura 1. Sede de la Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A. impulsora de este manual técnico. Fotografía: Luis Manso para el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 4

Figura 2. Zona experimental de pavimento permeable en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía de Gijón, monitorizada por el GITECO de la Universidad de Cantabria. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 21

Figura 3. Zona experimental de pavimento permeable EN EL Parque Científico-Tecnológico de Gijón, siendo monitorizada por investigadores del GITECO de la Universidad de Cantabria. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 22

Figura 4. Aparcamiento de pavimento permeable y zona experimental del Palacio de los Deportes de La Guía. Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 22

Figura 5. Avenida de El Molinón con zonas verdes actuando de áreas de infiltración preferente de la escorrentía superficial. Fotografía de Luis Manso para el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 23

Figura 6. Pilares de diseño SUDS. Fuente: elaboración propia adaptado de Woods Ballard et al. (2015)..... 29

Figura 7. Red hidrológica natural y cuencas artificiales de la ciudad de Gijón. Fuente: Suárez-Inclán et al. (2022), adaptado de información de EMASA. 57

Figura 8. (Imagen izquierda) Arroyos y ríos que discurren dentro de los límites del Concejo de Gijón, así como localización del Embalse de San Andrés de Los Tacones – Aboño; (Imagen derecha) Unidades hidrogeológicas del Concejo de Gijón. Fuente: Ayuntamiento de Gijón (2018). 58

Figura 9. Cuencas, subcuencas y microcuencas para la gestión de pluviales en la ciudad de Gijón. Fuente: adaptado de los datos de la Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A. 59

Figura 10. Usos del suelo en el Concejo de Gijón. Fuente: Ayuntamiento de Gijón. 61

Figura 11. Representación gráfica de las precipitaciones máximas diarias anuales y de la media del nº de días con lluvia por cada mes..... 63

Figura 12. Curva de probabilidades de no excedencia de eventos de precipitación diaria en función de la altura de lluvia en mm. 65

Figura 13. Serie histórica de las precipitaciones máximas diarias anuales en el periodo 1938–2022 en la ciudad de Gijón. 66

Figura 14. Histograma de la frecuencia relativa de las precipitaciones máximas diarias anuales en el periodo 1938–2022. 67

Figura 15. Histograma de la frecuencia acumulada de las precipitaciones máximas diarias anuales en el periodo 1938–2022. 67

Figura 16. Curva de frecuencia de la precipitación máxima diaria anual en función del periodo de retorno en escala logarítmica. 68

Figura 17. Función de distribución en escala logarítmica de la frecuencia de la precipitación máxima diaria anual en función del periodo de retorno comparada con los valores de las distribuciones de Gumbel, GEV, SQRT-ET max por el método de los momentos, y SQRT-ET max por el método de los L-momentos. 70

Figura 18. Curvas I-D-F para la ciudad de Gijón obtenidas a partir de las precipitaciones máximas diarias de la serie histórica 1938-2022, resaltando las curvas del T = 10 y T = 25. 73

Figura 19. Hietogramas de las lluvias de diseño en función de su cuenca de implementación obtenidas por el método de los bloques alternos. 75

Figura 20. Representación gráfica de las precipitaciones máximas diarias anuales y de la media del n.º de días con lluvia por cada mes..... 77

Figura 21. Curva de probabilidades de no excedencia de eventos de precipitación diaria en función de la altura de lluvia en mm para la serie de precipitaciones 2013-2022 en la estación Gijón Campus. 79

Figura 22. Curva de probabilidades de no excedencia de eventos de precipitación diaria en función de la altura de lluvia en mm para la serie de precipitaciones 2013-2022 en la estación Gijón Musel. 81

Figura 23. Esquema de dos eventos de precipitación consecutivos e independientes utilizando las variables del proceso de Poisson. 84

Figura 24. Diagrama de flujo conceptual de los criterios mínimos de diseño. 87

Figura 25. Área de biorretención del tipo jardín de lluvia o parterre inundable gestionando la escorrentía procedente de un aparcamiento en el Campus de la North Carolina State University. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 99

Figura 26. Área de biorretención en el Campus de la North Carolina State University, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 101

Figura 27. Ejemplo de una sección transversal de un área de biorretención estándar, mostrando sus distintos elementos longitudinalmente (imagen izquierda) y transversalmente (imagen derecha). Fuente de las imágenes: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 101

Figura 28. Sección tipo de un área de biorretención propuesta, mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 102

Figura 29. Área de biorretención ejecutada mediante la inclusión de arbolado en sistema de alcorque inundable gestionando escorrentía de un aparcamiento en Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 116

Figura 30. Sección estándar de un alcorque inundable basada en la práctica internacional, mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 116

Figura 31. Sección estándar de un alcorque inundable de tipo "Estocolmo", mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 117

Figura 32. Sección estándar de un jardín de lluvia o parterre inundable, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa de superficie vegetada con lámina de escorrentía temporal; (2) Capa de filtro o suelo especialmente diseñado; (3) Terreno natural adyacente; (4) Elemento de ingreso de la escorrentía al SUDS con sistema antierosión; (5) Elemento de desagüe del sistema en caso de rebose; (6) Geosintético perimetral de filtrado al terreno subyacente o de impermeabilización dependiendo de la función final del diseño del SUDS; (7) Bajante de cubierta adyacente. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo, adaptado a partir de Woods Ballard et al. (2015) y North Carolina Department of Environmental Quality (2020). 118

Figura 33. Sección estándar de una jardinera elevada, mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 119

Figura 34. Sección estándar de una cuneta de biorretención, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa de superficie vegetada con lámina de escorrentía temporal transportada a lo largo del sistema; (2) Capa de filtro; (3) Capa de transición; (4) Capa drenante; (5) Tubería-dren de fondo perforada para la recolección del flujo filtrado a través de la cuneta; (6) Geosintético de filtro al terreno adyacente y de recogida de caudales sub-superficiales, o de impermeabilización, dependiendo de la función final de diseño del sistema; (7) Terreno adyacente. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 120

Figura 35. Sección estándar de una cuneta de biorretención, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa de superficie vegetada con lámina de escorrentía temporal transportada a lo largo del sistema; (2) Máxima altura de lámina de agua soportada por el sistema hasta el comienzo del rebose al drenaje convencional; (3) Capa de sustrato; (4) Capa de filtro; (5) Capa drenante; (6) Tubería-dren de fondo perforada para la recolección del flujo filtrado a través de la cuneta; (7) Tubería vertical de rebose; (8) Estructura de control de reboses y bypass al sistema convencional; (0) Terreno subyacente. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 121

Figura 36. Personal de la North Carolina State University llevando a cabo inspección visual sobre área de biorretención que gestiona la escorrentía de un aparcamiento adyacente en Raleigh, Carolina del Norte. Fotografía: Carlos Rey Mahía. 127

Figura 37. Ejemplo de cuneta vegetada implementada para gestionar las pluviales de una zona residencial. Fotografía: Carlos Rey Mahía. 131

Figura 38. Cuneta vegetada seca con represa situada en la parte superior de la imagen, Yorkshire, Reino Unido. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 132

Figura 39. Sección estándar de una cuneta vegetada seca, mostrando sus distintos componentes: (1) Entrada lateral al sistema desde berma amortiguadora de la escorrentía superficial; (2) Talud lateral de la cuneta; (4) Capa de filtro mezcla de arena y materia orgánica; (5) Capa de drenaje; (6) Terreno adyacente; (7) Tubería-dren longitudinal de evacuación de la escorrentía filtrada por la cuneta (optativa si se quiere evacuar el flujo de escorrentía tratado hacia un punto de desagüe en lugar de infiltrar al terreno); (8) Geosintético o geomembrana de filtro para recoger caudales subsuperficiales (en los casos en los que no desee infiltrar al terreno, este geosintético deberá de ser impermeable). Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 140

Figura 40. Sección estándar de una cuneta vegetada húmeda, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa superficial vegetada y altura máxima de lámina de agua asociada con el volumen de tratamiento de calidad de aguas; (2) Altura máxima de lámina de agua superficial permitida, asociada con el T = 10 años (en ocasiones se puede recomendar subir hasta el T = 25 años si las condiciones de peligrosidad lo recomiendan); (3) Capa de sustrato o mulch; (4) Capa de filtro; (5) Entrada lateral al sistema desde berma amortiguadora de la escorrentía superficial; (6) Terreno adyacente;. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 141

Figura 41. Instrumentación de una cuneta vegetada mediante sensor de presión para la obtención de la altura de agua en el punto de vertido de una cuneta vegetada, Coventry, Reino Unido. Fuente: Sañudo-Fontaneda et al. (2020). 144

Figura 42. Ejemplo de cubierta vegetada Parc Bit, Mallorca. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica, Núñez Collado et al. (2019). 149

Figura 43. Modelos experimentales de cubiertas vegetadas y azules en la zona piloto de SUDS del Grupo de Enxeñería da Auga y do Medio Ambiente (GEAMA), Universidade da Coruña. Fotografía: Cortesía de Roberto Valcarce Vuelta. 156

Figura 44. Ejemplo de pavimento permeable implementada para gestionar las aguas pluviales del aparcamiento y de la escorrentía superficial procedente de la cubierta de la edificación adyacente en North Carolina, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo. 161

Figura 45. Sección estándar de un firme permeable, mostrando sus distintos elementos. Fuente: infografía diseñada por el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo (2023). 167

Figura 46. Pavimento continuo conformado por mezcla bituminosa porosa tipo PA-12 tras 5 años de funcionamiento en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía, Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo. 172

Figura 47. Pavimento discontinuo conformado de adoquines impermeables en disposición permeable tras 5 años de funcionamiento en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía, Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo. 173

Figura 48. Pavimento discontinuo conformado de césped reforzado con celdas de plástico tipo Atlantis® tras 5 años de funcionamiento en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía, Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo. 173

Figura 49. Instrumentación de monitorización dispuesta en el interior de arqueta para el análisis del seguimiento discontinuo (puntual) del comportamiento hidrológico, calidad de aguas y biológico de un firme permeable, y diseñado por el GITECO, Universidad de Cantabria, implementado en el Parque Científico Tecnológico de Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 179

Figura 50. Instrumentación de monitorización dispuesta en el interior de la arqueta para el análisis del seguimiento del comportamiento hidrológico de un firme permeable en continuo, y diseñado por el North Carolina State University Stormwater Engineering Group, North Carolina, EE. UU. Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 180

Figura 51. Instrumentación de monitorización exteriores a la arqueta para el seguimiento en continuo del comportamiento hidrológico y de tratamiento de contaminantes de un firme permeable, y diseñado por el North Carolina State University Stormwater Engineering Group, North Carolina, EE. UU. Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 180

Figura 52. Monitorización de la capacidad de infiltración de pavimentos permeables continuos (imagen izquierda) y discontinuos (imagen derecha) llevada a cabo por el equipo de la Universidad de Oviedo en colaboración con la Universidad de Cantabria en el aparcamiento experimental de Las Llamas, Santander (Cantabria). Fotografías: Luis Ángel Sañudo publicadas en abierto en Sañudo-Fontaneda et al. (2018). 181

Figura 53. Gráfica de la pérdida de la capacidad de infiltración de firmes permeables en el aparcamiento permeable experimental de Las Llamas en Santander para hormigón poroso (PC), asfalto poroso (PA) y adoquines impermeables en disposición permeable según diseño (ICP-1 e ICP-2). Fuente: Sañudo-Fontaneda et al. (2019). 182

Figura 54. Balsa de infiltración gestionando escorrentía de centro comercial adyacente en Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 187

Figura 55. Sección transversal de un sistema de infiltración del tipo balsa de infiltración. Fuente: infografía diseñada por el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 188

Figura 56. Franja filtrante situada en el Centre for Agroecology, Water and Resilience (CAWR), Coventry University, Reino Unido. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 189

Figura 57. Balsa de infiltración en el Campus de la North Carolina State University, Raleigh, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 190

Figura 58. Demostración de operaciones de mantenimiento de la tubería de entrada al sistema de una balsa de infiltración durante la Conferencia de SUDS de la ASCE en Carolina del Norte. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 192

Figura 59. Ejemplo de labores de mantenimiento de un dren filtrante implementado para gestionar las pluviales de un tramo de la autopista M50 en Inglaterra, distinguiéndose la franja vegetada y la zanja que va rellenada de áridos. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 195

Figura 60. Sección estándar de un dren filtrante. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo. 202

Figura 61. Depósito de recolección y almacenamiento de escorrentía superficial procedente de cubierta de edificio en el Campus de la North Carolina State University. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 210

Figura 62. Tanques de almacenamiento para viviendas o edificios de servicios públicos. Fotografía: Carlos Rey Mahía. 215

Figura 63. Humedal en el área de la ciudad de Wilmington, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 221

Figura 64. Estanque en el Museo de Arte de Raleigh, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Carlos Rey Mahía. 225

Figura 65. Estanque o lago artificial en el Parque de Isabel la Católica, Gijón. Fotografía: Luis Manso Ibaseta. 225

Figura 66. Estanque gestionando la escorrentía superficial de una granja en Yorkshire, Reino Unido. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 226

Figura 67. Desarrollo de estanque hacia un humedal en las afueras de la ciudad de Wilmington, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda. 226

Figura 68. Estructuras flotantes de tratamiento instaladas en estanque y humedales en el Campus de la North Carolina State University, EE. UU. Fotografía: Antonio Menéndez Suárez-Inclán..... 227

Índice de tablas

Tabla 1. Criterios de diseño e indicadores asociados al control de volumen de la escorrentía. 31

Tabla 2. Criterios de diseño e indicadores asociados a la calidad de aguas. 31

Tabla 3. Criterios de diseño e indicadores asociados a la amenidad. 32

Tabla 4. Criterios de diseño e indicadores asociados a la biodiversidad. 32

Tabla 5. Criterios de diseño e indicadores asociados a las características específicas de la zona de estudio. 33

Tabla 6. Grado de aportación de cada tipología SUDS en función de su mecanismo de captación, su/s función/es hidrológica/s (en orden de importancia, comenzando por la principal) y los criterios de diseño en base a los pilares SUDS. 34

Tabla 7. Esquema secuencial de todas las posibles combinaciones de técnicas SUDS entre ellas para ser utilizadas dentro de trenes de tratamiento y funcionalidades hidrológicas obtenidas. 36

Tabla 8. Recopilación de indicadores utilizados en otros estudios para lograr la identificación de áreas estratégicas para la implementación de SUDS a una escala de ciudad. 42

Tabla 9. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio y periodos de tiempo de funcionamiento de cada una de ellas. 62

Tabla 10. Media de los valores de precipitaciones máximas diarias anuales y media del número de días con lluvia por cada mes. 63

Tabla 11. Percentiles de las precipitaciones diarias mostrando aquellos percentiles de cálculo habituales (80, 85 y 90), así como los valores extremos asociados a los percentiles de 95, 99 y 100. 64

Tabla 12. Parámetros de los estadísticos descriptivos de la serie de precipitaciones máximas diarias anuales de la serie 1938 – 2022. 66

Tabla 13. Valores de los parámetros de la función de distribución de Gumbel. 69

Tabla 14. Valores de los parámetros para la obtención de los cuantiles mediante la función de distribución GEV. 69

Tabla 15. Valores de los parámetros de la función de distribución SQRT-ET max para los métodos de los momentos y los L-momentos. 70

Tabla 16. Análisis estadístico llevado a cabo sobre la distribución Gumbel. 71

Tabla 17. Valores de precipitación de diseño para la gestión de la cantidad de escorrentía superficial en cuanto a los caudales pico según las distintas funciones de distribución aplicadas en este estudio. 72

Tabla 18. Datos de los valores de intensidad (mm/h) de las curvas I-D-F de la serie histórica de Gijón (1938-2022) para intervalos diezminutales, resaltando los valores de la intensidad para los tiempos de concentración de las cuencas Este (2,5 horas) y Oeste (3,5 horas) de Gijón en T = 10 y T = 25. 73

Tabla 19. Media de los valores de precipitaciones máximas diarias anuales y media del número de días con lluvia por cada mes en la serie 2013-2022. 76

Tabla 20. Percentiles de las precipitaciones diarias en la estación Gijón Campus para la serie 2013-2022, mostrando aquellos percentiles de cálculo habituales (80, 85 y 90), así como los valores extremos asociados a los percentiles de 95, 99 y 100. 78

Tabla 21. Percentiles de las precipitaciones diarias en la estación Gijón Musel para la serie 2013-2022, mostrando aquellos percentiles de cálculo habituales (80, 85 y 90), así como los valores extremos asociados a los percentiles de 95, 99 y 100. 80

Tabla 22. Determinación del año medio con los datos de la serie de precipitaciones 2014 – 2021 para la estación Gijón Campus. 82

Tabla 23. Determinación del año medio con los datos de la serie de precipitaciones 2014 – 2021 para la estación Gijón Musel. 82

Tabla 24. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio y periodos de tiempo de funcionamiento de cada una de ellas. 83

Tabla 25. Valores de t_b y CV de la distribución muestral de t_a para cada estación meteorológica, suponiendo un valor de humectación de 2 mm. 85

Tabla 26. Valores de t_b y CV de la distribución muestral de t_a para cada estación meteorológica, suponiendo un valor de humectación de 1 mm. 85

Tabla 27. Número de eventos de precipitación independientes estimados para cada estación meteorológica para un valor de humectación de 1 mm y un tiempo de separación entre eventos de lluvia de 7 horas. 86

Tabla 28. Parámetros de los estadísticos descriptivos de la serie de precipitaciones de los 342 y 343 eventos independientes estimados para la serie 2019 – 2022 en las estaciones Gijón Campus y Gijón Musel, respectivamente. 86

Tabla 29. Valores propuestos del índice de mitigación para los contaminantes propuestos según la tipología SUDS y sus variantes de diseño. Fuente: adaptado de Woods Ballard et al. (2015) y Fardel et al. (2019). 91

Tabla 30. Valores propuestos del índice de riesgo para los contaminantes propuestos según el tipo de uso del suelo. Fuente: adaptado de Woods Ballard et al. (2015) y de Suárez-Inclán et al. (2022). 92

Tabla 31. Periodos de retorno y tiempos de duración del evento de lluvia de diseño, así como volúmenes de tratamiento recomendados para el dimensionamiento de SUDS en las guías de diseño españolas. 94

Tabla 32. Granulometría recomendada para la construcción de la capa de filtro de un área de biorretención. 123

Tabla 33. Granulometría recomendada para la construcción de la capa de filtro de un área de biorretención. 123

Tabla 34. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un área de biorretención, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS. 125

Tabla 35. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en una cuneta vegetada, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS. 142

Tabla 36. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en una cubierta verde/azul, incluyendo inspecciones de comprobación de su funcionamiento. 157

Tabla 37. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un firme permeable, incluyendo inspecciones de comprobación de su funcionamiento. 176

Tabla 38. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un sistema de infiltración, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS. 191

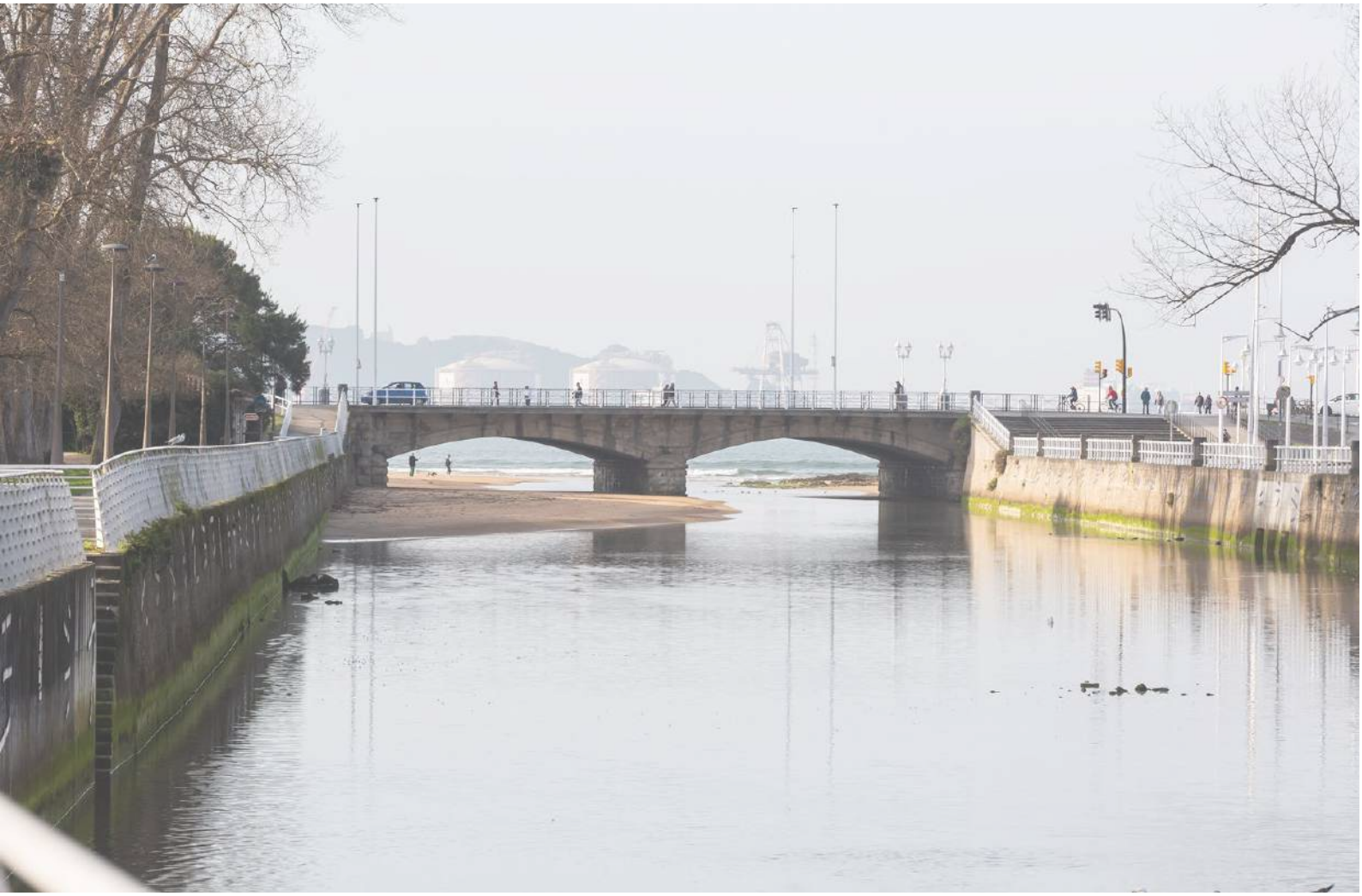
Tabla 39. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un dren o franja filtrante, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS. 203

Tabla 40. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un tanque de almacenamiento, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS. 217

Tabla 41. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un estanque / humedal, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS. 228

01

Capítulo 1 – Introducción



1.1 Antecedentes y necesidad del manual técnico

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se han consolidado en España como una herramienta fundamental para la implementación del urbanismo regenerativo, aportando beneficios medioambientales que contribuyen a adaptar las ciudades al cambio climático, usando como base la infraestructura de gestión de las aguas pluviales. De esta manera, se permite que los entornos urbanos puedan alcanzar con éxito los criterios de sostenibilidad y regeneración descritos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y promulgados desde las Naciones Unidas. Estos objetivos son llevados a cabo en nuestro país a través de la Agenda Urbana Española (AUE) cuyo horizonte está fijado en el año 2030. Dentro de este contexto de implementación se han desarrollado una serie de guías básicas de diseño SUDS, tanto a nivel local en las ciudades de Madrid (Perales Momparler & Calcerrada Romero 2018), Castellón (Perales Momparler et al. 2019), Barcelona (Carballo et al. 2020) y Valencia (De la Fuente et al. 2021), entre otras, como a nivel nacional a través del Ministerio para la Transición Ecológica (Núñez Collado et al. 2019). Además, se han llevado a cabo estudios más detallados sobre el aprovechamiento de las aguas pluviales mediante SUDS en ciudades como Barcelona (Green Blue Management 2018), profundizando en sus particularidades locales. Recientemente, en el año 2021, se desarrolló la última Jornada de la RedSUDS nacional en la que se describieron los últimos avances y grado de implementación de los SUDS en España, destacando el impulso decidido que éstos han recibido desde el ámbito municipal por todo el país. En el momento de elaboración y redacción de este manual técnico, los SUDS son considerados como técnicas que aportan un beneficio significativo al ordenamiento urbano, necesitando de que se consideren los aspectos normativos y de gobernanza, así como el establecimiento claro de los roles de mantenimiento por parte de cada Departamento en las estructuras de gestión municipales.

El Ayuntamiento de Gijón, pionero en la implementación de SUDS en España, se ha unido a estas ciudades anteriormente mencionadas, incluyendo la propuesta de SUDS como elementos de gestión sostenible de las aguas pluviales en los nuevos desarrollos urbanos de la ciudad. Esta decisión ha conllevado la elaboración de proyectos urbanísticos que proponen la construcción de SUDS dentro del Concejo; si bien, se carecía de una guía técnica para abordar con garantías el diseño y posterior construcción y mantenimiento de los SUDS en el Concejo.

Este manual surge, pues, de la necesidad de elaborar un manual técnico particularizado al caso específico del Concejo de Gijón, el cual permita superar esa primera barrera

existente para la exitosa futura implementación de los SUDS en la ciudad de Gijón basada en una ingeniería robusta reflejada en dimensionamientos más precisos y detallados.



Figura 1. Sede de la Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A. impulsora de este manual técnico. Fotografía: Luis Manso para el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

1.2 Marco

El marco del manual técnico viene dado por sus antecedentes y contexto actual, viéndose sin duda afectado por un marco normativo variable y en constante evolución en cuanto a la implementación y consideración de los SUDS. Además, existe una proliferación de guías y manuales técnicos en todo el mundo durante los últimos años, partiendo de los trabajos precursores en los EE. UU. que se remontan hasta la década de los años 1990.

1.2.1 Marco normativo

El marco normativo resulta extenso y, en ocasiones, puede resultar confuso, ya que durante mucho tiempo no se mencionaron los SUDS de forma directa o clara. De esta manera, los proyectistas e investigadores en el ámbito de los SUDS tuvieron que interpretar las normativas para poder asociar la práctica de la implementación de los SUDS con cada una de ellas en ámbitos medioambientales, de gestión del agua, de sostenibilidad, y urbanismo y ordenación del territorio, entre otras. Se muestran, a continuación, las normativas asociadas con la práctica del diseño, construcción,

explotación, mantenimiento y conservación de SUDS, contenidas en varias categorías en función del ámbito o escala administrativa territorial (europea, estatal, regional y local).

Destacar que se indicarán a continuación todas las normativas históricas que han estado relacionada de manera más o menos directa con las prácticas SUDS, estando algunas de ellas ya derogadas. Es responsabilidad de los usuarios el mantenerse actualizado en el aspecto normativo, ya que las normas evolucionan a lo largo del tiempo y este manual técnico tiene el objetivo de ser orientativo para el lector, acercándole a distintos aspectos y criterios mínimos de diseño.

1.2.1.1 Contexto Europeo

Las normativas asociadas de manera directa o indirecta a los SUDS en el contexto de la Unión Europea se recogen a continuación.

Directivas comunitarias sobre protección de aguas:

- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación.
- Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.
- Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño y por la que se deroga la Directiva 76/160/CEE.
- Directiva 2006/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de septiembre de 2006, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces.
- Directiva 2006/11/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2006, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la comunidad.
- Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación.

- Directiva 96/82/CE del Consejo, de 9 de diciembre de 1996, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
- Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats natural y de la fauna y flora silvestres.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Directiva 85/337/CEE del Consejo, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.

Otros documentos relevantes:

- El Pacto Verde Europeo COM/2019/640.
- Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo.
- The EU Strategy on Green Infrastructure.

1.2.1.2 Normativa estatal

Las normativas asociadas de manera directa o indirecta a los SUDS en el territorio nacional se recogen a continuación.

Alcance territorial general:

- Ley de Aguas: Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas.
- Ley de Costas: RD 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de la Ley de Costa y Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y modificación de la Ley 22/1988, de Costas.

Dominio Público Hidráulico:

- Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de abril; el Reglamento de la Administración Pública del Agua, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio; y el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y

VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas y sus modificaciones: RD 606/2003, de 23 de mayo; RD 9/2008, de 11 de enero; RD 1290/2012, de 7 de septiembre y RD 638/2016, de 9 de diciembre. y sus modificaciones: RD 606/2003, de 23 de mayo; RD 9/2008, de 11 de enero, RD 1290/2012, de 7 de septiembre y RD 638/2016, de 9 de diciembre.

- Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 198/2015, de 23 de marzo, por el que se desarrolla el artículo 112 bis del texto refundido de la Ley de Aguas y se regula el canon por utilización de las aguas continentales para la producción de energía eléctrica en las demarcaciones intercomunitarias.

Demarcaciones y planificación hidrográficas:

- Real Decreto 125/2007, de 2 de febrero, por el que se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas.
- Real Decreto 126/2007, de 2 de febrero, por el que se regulan la composición, funcionamiento y atribuciones de los comités de autoridades competentes de las demarcaciones hidrográficas con cuencas intercomunitarias.
- Real Decreto 1626/2011, de 14 de noviembre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del Agua de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental y por el que se modifica el Real Decreto 126/2007, de 2 de febrero, por el que se regulan la composición, funcionamiento y atribuciones de los comités de autoridades competentes de las Demarcaciones Hidrográficas con cuencas intercomunitarias.
- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional y sus modificaciones: RD-Ley 2/2004, de 18 de junio y Ley 11/2005, de 22 de junio.
- Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.
- Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica.
- Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los ámbitos territoriales de los Organismos de cuenca y de los planes hidrológicos.
- Orden TEC/921/2018, de 30 de agosto, por la que se definen las líneas que indican los límites cartográficos principales de los ámbitos territoriales de las

Confederaciones Hidrográficas de acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 650/1987, de 8 de mayo, por el que se definen los ámbitos territoriales de los organismos de cuenca y de los planes hidrológicos.

- Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro.
- Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 400/2013, de 7 de junio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental.

Gestión de riesgos de inundación:

- Aguas continentales y costas.
    - Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas. Artículo 11
    - Real Decreto 849/1986, de 11 de abril por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Artículo 14
    - Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo Títulos II y III de la Ley de Aguas. Artículo 59.3
    - Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas22/1988, 28 de julio de Costas.
    - Real Decreto 1471/1989, de 1 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento general para desarrollo y ejecución de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
- Código civil.
    - Real Decreto de 24 de julio de 1889, texto de la edición del Código Civil mandada publicar en cumplimiento de la Ley de 26 de mayo último.

- Protección civil.
    - Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil.
    - Resolución de 2 de agosto de 2011, por la que se aprueba el Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones.
    - Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de Interior por la que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones.
    - Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de Protección Civil (6. Riesgos objeto de planes especiales).
- Suelo y ordenación territorial.
    - Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley del Suelo.
- Evaluación y gestión de los riesgos de inundación.
    - Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.

Ley del suelo:

- Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana y Real Decreto 2159/1978, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Planeamiento para el desarrollo y aplicación de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana.

Edificación:

- REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Recomendaciones sobre instalaciones para reutilización de agua de lluvia para uso doméstico.
- REAL DECRETO 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la REGENERACIÓN Y RENOVACIÓN URBANAS, 2013-2016.

Otros aspectos legales:

- Real Decreto 2090/2008, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
- Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad

- Real Decreto-ley 17/2012, de 4 de mayo, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.
- Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).
- Real Decreto 822/2008, de 16 de mayo, por el que se crea la Oficina del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento.
- Real Decreto 2618/1986, de 24 de diciembre, por el que se aprueban medidas referentes a acuíferos subterráneos al amparo del artículo 56 de la Ley de Aguas
- Ley 1/2018, de 6 de marzo, por la que se adoptan medidas urgentes para paliar los efectos producidos por la sequía en determinadas cuencas hidrográficas y se modifica el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

Informes de viabilidad de Infraestructuras hidráulicas: Demarcación hidrográfica del Cantábrico (creada por RD 266/288):

- Instrucciones para la realización de los Informes de Viabilidad.
- Anteproyecto para la mejora de las instalaciones de tratamiento de la EDAR de Gijón Oeste (Asturias).
- Anteproyecto de la EDAR de Gijón - Este, T.M. de Gijón (Asturias).

1.2.1.3 Normativa autonómica

La normativa autonómica en España que está relacionada con la implementación de SUDS es variada en cuanto a su implicación directa con los SUDS. Un estudio recientemente publicado por las Universidades de Cantabria, Coruña y la Universidad Politécnica de Valencia en colaboración con la empresa Green Blue Management S.L. (Grupo TYPSA) ha destacado las siguientes normativas y guías (Andrés-Doménech et al. 2021).

- País Vasco. Manual Para la Redacción de Planeamiento Urbanístico Con Criterios de Sostenibilidad, promovido por la Sociedad Pública de Gestión Ambiental Gobierno Vasco en 2005. Se menciona el papel clave de los SUDS para una mejor gestión del agua en entornos urbanos.
- Galicia. Instrucciones Técnicas para Obras Hidráulicas en Galicia (vol. 2), promovido por la Xunta de Galicia en 2009. Establece criterios para la implementación de SUDS.

- País Vasco. Guía para el Desarrollo Sostenible de los Proyectos de Urbanización, elaborado por SPRILUR en 2010. Se promueve el almacenamiento de agua de lluvia y el uso de SUDS para la infiltración.
- Cataluña. *Aprofitament d'Aigua de Pluja a Catalunya. Dimensionament de Dipòsits d'Emmagatzematge*. Promovido por la *Agència Catalana de l'Aigua* de Barcelona en 2011. Son unas guías destinadas al almacenamiento de agua de lluvia.
- Comunidad Valenciana. *Diari Oficial de la Comunitat Valenciana*. Ley 5/2014, de 25 de Julio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje, de la Comunitat Valenciana. Promoción de infraestructura verde en áreas urbanas consolidadas y en desarrollo.
- Comunidad Valenciana. *Diari Oficial de la Comunitat Valenciana*. Decreto 201/2015, de 29 de Octubre, del Consell, por el que se Aprueba el Plan de Acción Territorial Sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana. Se proponen los SUDS para la gestión de las aguas pluviales.
- Canarias. Boletín Oficial de Canarias. Decreto 52/2015, de 16 de Abril, por el que se dispone la Suspensión de la Vigencia del Plan Hidrológico Insular de El Hierro, Aprobado por el Decreto 102/2002, de 26 de Julio, y se Aprueban las Normas Sustantivas Transitorias de Planificación Hidrológica. Uso obligatorio de SUDS en nuevos desarrollos urbanos.
- Región de Murcia. Boletín Oficial de la Región de Murcia. Ley 13/2015, de 30 de Marzo, de Ordenación Territorial y Urbanística de la Región de Murcia. Se propone el uso de SUDS para la renaturalización en la adaptación al cambio climático.
- Comunidad de Madrid. Normas para Redes de Saneamiento, promovida por el Canal de Isabel II en 2016 y actualizada en 2020. Recomendaciones técnicas para la implementación de SUDS.
- Región de Murcia. Boletín Oficial de la Región de Murcia. Decreto-Ley no. 2/2019, de 26 de Diciembre, de Protección Integral del Mar Menor.

En el caso del Principado de Asturias, cabe destacar las siguientes normativas asociadas directa o indirectamente a la implementación de SUDS.

- Normativas Comunitarias Sobre Protección de las Aguas.
    - Ley 1/1994, de 21 de febrero, sobre Abastecimiento y Saneamiento de Aguas en el Principado de Asturias.

  - Ley 6/2002, de 18 de junio, sobre protección de los ecosistemas acuáticos y de regulación de la pesca en aguas continentales.
  - Ley 5/2002, de 3 de junio, sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos de saneamiento.
  - Ley 1/2001, de 6 de marzo, del Patrimonio Cultural.
- Ordenación del Territorio y Urbanismo.
  - Decreto 278/2007, de 4 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Ordenación del Territorio y Urbanismo del Principado de Asturias.
- Documentos relevantes.
  - Plan de Gestión del Riesgo de Inundación 2016-2021, Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental.

1.2.1.4 Normativa de carácter municipal

En el caso de la normativa municipal, existen experiencias previas en España que cabe resaltar a continuación.

- Girona. *Ordenança Municipal Reguladora de Les Aigües Residuals i Pluvials Del Sistema Públic de Sanejament de Girona*, elaborada en 2004. Esta ordenanza municipal promueve la infiltración y la retención para la gestión del impacto hidrológico generado por los procesos de urbanización.
- Madrid. Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente Del Agua en la Ciudad de Madrid de 2006. Esta ordenanza municipal establece unos valores mínimos de pavimentos permeables en los espacios públicos.
- Madrid. Criterios Para Una Jardinería Sostenible en la Ciudad de Madrid de 2007. Promoción del uso de pavimentos permeables y de los procesos hidrológicos naturales de infiltración y almacenamiento de agua de lluvia.
- Santander. Plan General de Ordenación Urbana. Anexo XIX. Colaboración Interadministrativa. Informe de Sostenibilidad Ambiental. Elaborada en 2012. Introduce nuevas prescripciones sobre la obligatoriedad de introducir SUDS o técnicas de infiltración.
- Valencia. Normativa Para Obras de Saneamiento Y Drenaje Urbano de la Ciudad de Valencia de 2015. Promoción del uso de SUDS en nuevos desarrollos urbanos.
- Barcelona. *Guia de Criteris Tècnics Generals de la Xarxa de Clavegueram de la Ciutat de Barcelona de 2015*. Promoción del uso de SUDS en nuevos desarrollos urbanos.

- Sevilla. Instrucciones Técnicas Para Redes de Saneamiento (PD 005.12) Rev. 6. de 2019. Promoción del uso de SUDS con el objetivo de reducir los volúmenes de vertido a los cauces naturales.

En el ámbito de la ciudad de Gijón existen una serie de reglamentos e instrucciones que podrían estar asociadas a los SUDS.

- Plan General BOPA 14 febrero 2019.
- Catálogo Urbanístico de Gijón BOPA 14 febrero 2019.
- Reglamento orgánico de organización, funcionamiento y régimen jurídico del ayuntamiento de Gijón/Xixón.
- Instrucción 1/2017 por la que se establecen los criterios a los que ha de ajustarse la tramitación de expedientes de obras y actividades.
- Plan Integral de Movilidad Sostenible y Segura de Gijón 2018-2024.
- Ordenanza de la prestación patrimonial de carácter público no tributario, del servicio municipal de agua y alcantarillado de Gijón.
- Ordenanza sobre Protección del Medio Acuático frente a Contaminación por Vertidos No Domésticos.
- Ordenanza Municipal de Residuos e Higiene Urbana de Gijón
- Aprobación de pliegos modelo de cláusulas administrativas particulares, para la contratación de obras, servicios y suministros en el ayuntamiento de Gijón/Xixón.

Por último, cabe destacar que el presente proyecto se alinea con el Plan Estratégico de Gijón 2026 y con el Plan de Acción Local de Gijón de la Agenda Urbana 2030, y más concretamente en los siguientes aspectos:

- Plan Estratégico de Gijón 2026. El proyecto se asocia con el ámbito de "Crecimiento Sostenible", y más concretamente con la línea estratégica de "L5.4. Conservación del Medio Natural y Mitigación del Impacto Ambiental", cuyo proyecto estratégico de ciudad se denomina "P11. Gijón Verde". Uno de los baluartes de esta línea estratégica es "… el despliegue de una batería de medidas de control y mejora de los diferentes impactos medioambientales presentes en el municipio". Los SUDS fueron tomados como una de las principales técnicas. De la misma manera, el proyecto tiene su encaje en la línea estratégica "L5.3. Economía Circular", a través del objetivo "5.3.2. Optimizar la gestión integral del ciclo del agua", todo ello dentro del mismo proyecto estratégico "P11. Gijón Verde", en el cual participa también la empresa EMASA, apoyo en este proyecto.

- Agenda Urbana Gijón 2030. Los proyectos motores del objetivo 1 "Ordenar el territorio, conservarlo y protegerlo": "P1. Ampliación del Parque Científico Tecnológico PCTG La Pecuaria" y "P2. Ejecución del Plan Director de Naturalización Urbana". El primero de ellos incluye la implementación de SUDS como medidas de gestión obligatoria de las pluviales mediante redes separativas. El segundo de ellos contempla como objetivo "Potenciar Gijón como referente de las ciudades medias en infraestructura verde e integración natural". Por otra parte, el proyecto impacta también en el objetivo 3 "Reducir el impacto del cambio climático y aumentar la resiliencia", destacando los proyectos "P18. Gestión integral del agua" y "P21. Plan de actuación y adaptación al cambio climático y estrategias para la reducción de riesgos de desastres naturales".

1.2.1.5 Otras normativas y documentos legales relevantes asociados con el diseño de SUDS

Por último, cabe resaltar la existencia de otras normativas asociadas, principalmente, al diseño de SUDS, aunque no los nombren explícitamente en ellas. Destacan aquellas asociadas al drenaje superficial y las secciones de firmes, las cuales han venido siendo utilizadas como instrucciones normativas de apoyo para el diseño y predimensionamiento de SUDS.

- Instrucción 6.1 y 2 IC de secciones de firme. Ministerio de Fomento.
- Instrucción 5.2-IC Drenaje Superficial. Ministerio de Fomento.
- Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Ministerio de Fomento.
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases del Régimen Local.
- Ley 57/2003, de 16 de diciembre, de medidas para la modernización del gobierno local.

1.2.2 Guías y manuales técnicos sobre SUDS

Las guías básicas sobre el diseño de SUDS han proliferado en España, mientras que en otros ámbitos internacionales lo han hecho los manuales con mayor nivel de detalle técnico que las guías españolas. En este apartado, se enumeran los documentos más destacados de entre los existentes, distinguiendo entre los diferentes ámbitos geográficos y el ámbito de aplicación de los SUDS (ej.: áreas urbanas, áreas rurales, zonas costeras, zonas de montaña, infraestructuras de transporte, etc.). En la mayoría de los casos el ámbito será el urbano, mientras que la audiencia a la que van dirigidos estos documentos

suele centrarse en casi todos los casos en técnicos de autoridades locales, compañías de aguas, consultores y constructores, y promotores urbanos. Además, existen guías introductorias de estas técnicas para los ciudadanos de forma que se diseminen los beneficios de los SUDS y se dé a conocer su funcionamiento.

1.2.2.1 Nacionales

En España existen en este momento cuatro guías básicas sobre SUDS, siendo tres de ellas impulsadas por autoridades locales, mostrándose todas ellas a continuación en orden de aparición en el tiempo. Cabe destacar que en España todas las guías tienen el mismo ámbito de aplicación: áreas urbanas.

- **Madrid** (Perales Momparler & Calcerrada Romero 2018), noviembre de 2018, bajo el título "Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres". Esta guía fue editada por la Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verdes del Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad del Ayuntamiento de Madrid, con la colaboración del Departamento de Obras e Infraestructuras y la Universidad Politécnica de Madrid. La guía fue redactada por la empresa Green Blue Management S.L.U. Esta guía tiene el objetivo de describir las principales técnicas SUDS, estableciendo un proceso de diseño inicial, así como presentando algunos ejemplos de construcción de SUDS.
- **Castellón de la Plana** (Perales Momparler et al. 2018), noviembre de 2019, con el título "Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el Término Municipal de Castelló de la Plana". Esta guía básica fue elaborada por la empresa Green Blue Management S.L., siendo impulsada y editada por el Ayuntamiento de Castellón de la Plana. Se trata de una guía cuyo alcance y objetivo es muy similar a la anteriormente elaborada para Madrid. Si bien es una guía algo más desarrollada, el nivel de detalle no permite abordar todas las necesidades de diseño, construcción, operación, mantenimiento y monitorización de SUDS. En cualquier caso, son guías muy valiosas para introducirse en la temática y comenzar a hacer diseños preliminares de SUDS.
- **Barcelona** (Carballo et al. 2020), abril de 2020, con el título "*Guia tècnica per al disseny de sistemes de drenatge urbà sostenible SUDS*", elaborada por la *Comissió de Sistemes de Drenatge Urbà Sostenible* (SUDS), y promovida por la misma Comisión dentro del Departamento de *Medi Ambient i Serveis Urbans, Ecologia Urbana* del Ayuntamiento de Barcelona. El objetivo de esta guía, íntegramente redactada en

catalán, es el de impulsar, potenciar y establecer las condiciones básicas para la implementación de SUDS en la ciudad de Barcelona. Además, este documento pretende servir de apoyo para los proyectistas en el proceso de selección de los SUDS, así como en la definición del plan de mantenimiento de estas técnicas. El ámbito de aplicación queda restringido a todos aquellos espacios públicos de la ciudad en los que se realicen actuaciones de urbanización y edificación.

- **Valencia** (De la Fuente et al. 2021), junio de 2021, con el título "Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València", promovida por Cicle Integral de l´Aigua del Ayuntamiento de Valencia. La guía fue elaborada por Green Blue Management S.L. (Grupo TYPSA) y la Universidad Politécnica de Valencia. Es la guía más actualizada de las llevadas a cabo hasta la fecha; si bien, su alcance no diverge con respecto a las anteriormente desarrolladas por esta empresa española especialista en SUDS junto a las Universidades Politécnicas de Madrid y Valencia. Son documentos de gran valor para introducirse dentro del predimensionamiento y gestión inicial de SUDS.

En el ámbito nacional, existe una única guía mostrada a continuación:

- **Ministerio para la Transición Ecológica** (Núñez Collado et al. 2019), Gobierno de España, octubre de 2019, con el título "Guías para la adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible". La elaboración del trabajo corrió a cargo de la empresa TRAGSATEC del Grupo TRAGSA bajo la coordinación de la Dirección General del Agua. Esta guía tiene como objetivo profundizar en aquellas causas que provocan las inundaciones urbanas, sirviendo como elemento para concienciar a la sociedad de la necesidad de prevenirlas mediante el uso de SUDS. Aporta información básica sobre las distintas técnicas SUDS, pero no es suficiente para afrontar de manera segura el diseño holístico de SUDS. No obstante, sirve como posible lectura introductoria a la temática.

Además de estas guías, existen una serie de documentos técnicos de relevancia sobre el diseño de SUDS, destacando el siguiente:

- **Barcelona** (Green Blue Management 2018), abril de 2018, bajo el título "Estudio de aprovechamiento de las aguas pluviales mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en la actualización del Plan Técnico para el Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Alternativos de Barcelona". Este

estudio pormenorizado sobre el uso de SUDS en el ámbito municipal de Barcelona fue elaborado por la empresa Green Blue Management S.L. asociado a diseños SUDS para la ciudad de Barcelona. Cabe destacar que en dicho estudio se incluyen el predimensionamiento, modelización y análisis coste-beneficio de SUDS.

En adición a las guías básicas y documentos técnicos anteriores, hay que sumarle aquellos que se están redactando de forma paralela al manual técnico de Gijón, contribuyendo al aumento del conocimiento de diseño de los SUDS, siguiendo una experiencia que pudiera catalogarse de continuista con aquellas previamente desarrolladas en países como EE. UU., Australia y Reino Unido, principalmente. En otras palabras, España está desarrollando su propia experiencia nativa, permitiendo que a futuro se pueda desarrollar normativa técnica en SUDS, así como se hizo hace décadas en otras disciplinas constructivas como ingeniería de carreteras o ingeniería portuaria, por ejemplo.

1.2.2.2 Internacionales

Existe un alto número de manuales de buenas prácticas en todo el mundo. No obstante, antes de comenzar a enumerar los más significativos y relevantes para el futuro desarrollo del documento para la ciudad de Gijón, cabe mencionar los distintos nombres que reciben los SUDS internacionalmente. De esta manera, se pueden identificar dichos manuales y guías de buenas prácticas.

Los Estados Unidos de América destacan como el país más prolífico en el desarrollo de documentos técnicos en torno a los SUDS. Allí reciben el nombre de *Low Impact Development* (LID), *Stormwater Best Management Practices* (BMPs), *Stormwater Control Measures* (SCMs) y *Stormwater Green Infrastructure* (SGI). A continuación, se muestran las principales guías de buenas prácticas consultadas y su ámbito de aplicación.

- *The Stormwater Design Manual* del *North Carolina Department of Environmental Quality* (2017), desarrollado en colaboración con la Universidad de *North Carolina State*. Se comenzó a aplicar en enero de 2017, siendo actualizado constantemente hasta la fecha actual. Se trata de un manual completo disponible en abierto con ámbito de aplicación amplio, incluyendo áreas urbanas y rurales, así como infraestructura de transporte de tipo carretera y aeropuertos. Este manual aporta fórmulas de cálculo y secciones transversales, así como datos relevantes para el mantenimiento de SUDS, además de servir como elemento regulatorio en la

implementación de SUDS en todo el estado de Carolina del Norte. El manual de Carolina del Norte incluye, además, una hoja Excel de apoyo al cálculo del impacto hidrológico de la implementación de un SUDS o un tren de tratamiento con varios SUDS en relación a la situación hidrológica preexistente.

- *Caltrans Storm Water Quality Handbook*. California Department of Transportation (2012). Manual de gestión de la calidad de las aguas pluviales a través de SUDS que se comenzó a aplicar en septiembre de 2012. Se trata de un completo manual que aporta, tanto secciones transversales, como ecuaciones de cálculo. Este manual sirve, además, para la instalación, construcción y operación de los SUDS diseñados. Existe una versión nueva del año 2017, la cual incluye fichas de los distintos SUDS.
- Coastal Stormwater Management Through Green Infrastructure. A Handbook for Municipalities, elaborado por la United States Environmental Protection Agency (US EPA 2014) en diciembre de 2014. Este manual está especializado en la implementación de los SUDS en municipios con ambientes costeros, representando un buen cimiento para los posibles futuros desarrollos de las áreas costeras de Gijón. Este manual propone, además, un proceso de planificación para la implementación de SUDS a nivel municipal.
- *Florida Statewide Airport Stormwater Study Best Management Practices Manual*, elaborado por el *Department of Transportation* del Estado de Florida en abril de 2013. Este manual tiene el objetivo de aportar información técnica sobre el diseño, regulación y operación de SUDS para la gestión de pluviales en infraestructura aeroportuaria.
- *New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual*, elaborado por el *New Jersey Department of Environmental Protection* (2020), entrando en funcionamiento en abril de 2004 y recibiendo su última actualización en marzo de 2021. Como ocurre con el manual de Carolina del Norte, el manual de Nueva Jersey es utilizado para el diseño, operación, planificación y regulación de SUDS.
- *The San Francisco Stormwater Management Requirements and Design Guidelines (SMRs)*, elaborado en mayo de 2016 por el Ayuntamiento de San Francisco (City of San Francisco 2016) con la colaboración de administraciones locales y empresas. Al igual que las anteriores cubre todos los aspectos desde la planificación, al diseño y operación, así como la vertiente regulatoria de los SUDS, todo ello particularizado para la ciudad de San Francisco.

- *Low Impact Development Standards Manual*, elaborado por el *County of Los Angeles Department of Public Works* (2014) en febrero de 2014. El manual proporciona una guía para la implementación de SUDS en nuevas áreas de desarrollo urbano y en áreas en proceso de rehabilitación urbana. Este manual supone una actualización de documentos previos tanto regulatorios como técnicos elaborados desde el 2002 hasta el 2010. Así mismo, sirve como marco a otros documentos legales asociados con el control de la calidad del agua en el municipio de Los Ángeles.
- *Port of Portland Stormwater Design Standards Manual*, elaborado por Port of Portland (2017) en colaboración con Gresham, Smith and Partners, Geosynthetic Consultants Inc, y HDR Engineering y Good Company para el Port of Portland y que entró en funcionamiento en enero de 2014, siendo actualizado en 2017. Este manual sirve para el diseño de SUDS en ambientes marinos, puertos y aeropuertos controlados por el Port of Portland. Este documento sirve para sentar las bases reguladoras para la implementación de SUDS en la infraestructura bajo control del Puerto de Portland. Por lo tanto, no saldrán adelante hacia construcción proyectos que no cumplan con el manual.

En Europa, el país pionero en la aplicación de SUDS ha sido el Reino Unido, desarrollando manuales de referencia internacional. En el Reino Unido los SUDS son denominados como *Sustainable Drainage Systems* (SuDS) cuando son aplicados en ámbito urbano y en infraestructura de transportes de carretera, mientras que son denominados como *Rural SuDS* a aquellos diseñados específicamente para los ambientes rurales. Los documentos más destacados y de mayor significancia para el trabajo a desarrollar en Gijón son los siguientes:

- *The SuDS Manual* es el documento más detallado que existe en el mundo sobre los SUDS (Woods Ballard et al. 2015). Elaborado por el CIRIA en 2015, como una actualización de anteriores versiones, muestra todas las fases del diseño, construcción y mantenimiento de los SUDS, particularmente desarrolladas para la normativa británica. El manual de SUDS permite afrontar la planificación, diseño y construcción de SUDS en ámbitos urbanos y en infraestructuras de carreteras. Es sin duda un documento de referencia para el futuro manual de Gijón.
- *Rural Sustainable Drainage Systems* (RSuDS) de la *UK Environmental Agency* de junio de 2012 (Avery 2012). Este documento sentó las bases para la identificación de las medidas de drenaje sostenible más adecuadas para zonas rurales. El

objetivo fundamental fue el de ayudar a dichas áreas con gran actividad de granjas y ganadería a lograr alcanzar los objetivos de la Directiva Marco del Agua europea, adaptarse al cambio climático y reducir los riesgos de inundación.

- *SuDS in London – A Guide*, elaborado por el *Transport for London*, *Mayor of London* (2016), en noviembre de 2016. Esta guía tiene el objetivo de mostrar cómo se pueden implementar los SuDS en las calles de Londres.

Australia es uno de los países con mayor desarrollo de guías y manuales SUDS a todos los niveles, teniendo especial relevancia su desarrollo regulatorio. Los SUDS son conocidos como Water Sensitive Urban Design (WSUD) en Australia, por lo que cualquier búsqueda de información a llevar a cabo en dicho país tendrá que realizarse con esas palabras clave. Cabe destacar algunos manuales de referencia a continuación:

- *Technical Manual for water sensitive urban design in Greater Adelaide*, publicado en diciembre de 2010, siendo promovido por el Department of Planning and Local Government del Government of South Australia. Si bien, este document no es prescriptivo como sí que lo eran otros mostrados con anterioridad en otros países, pretende servir como una guía hacia las técnicas SUDS a utilizar, así como su diseño y planificación. No obstante, puede ser utilizada para alcanzar los objetivos locales, regionales y estatales en materia de gestión de la calidad de aguas urbanas.
- *Water Sensitive Urban Design Guidelines, South Eastern Councils*, promovido por *Melbourne Water* y *State Government Victoria* en abril de 2013. Este documento tiene especial importancia en la elaboración de esquemas de planificación y diseño de SUDS, proponiendo una serie de etapas secuenciales a desarrollar en ambos casos, y en la línea de las mostradas en mayor nivel de detalle por el CIRIA británico.
- *City of Melbourne WSUD Guidelines, Applying the Model WSUD Guidelines, An initiative of the Inner Melbourne Action Plan*, promovido por Melbourne Water y City of Melbourne (2014). Este documento aporta el marco legislativo y regulatorio asociado a los SUDS en la ciudad de Melbourne, así como los pasos a seguir para la implementación y construcción de SUDS en dicha ciudad australiana.

En América latina los SUDS se escriben de la misma forma que en España, aunque en el pasado utilizaron diferentes denominaciones. El país con un desarrollo a nivel de regulación, guías y manuales es Colombia, existiendo una guía técnica con un alto nivel

de detalle en Bogotá, la cual fue promovida por la empresa municipal de aguas de Bogotá (Acueducto de Bogotá) y elaborada por la Universidad de los Andes en febrero de 2017 bajo el título "Guía Técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)". Dicho documento sirve como guía para los técnicos en la planificación y diseño de SUDS en la ciudad de Bogotá, Colombia.

1.3 Experiencias previas y desarrollo actual de la implementación de SUDS en Gijón

Existen multitud de experiencias previas en el Concejo de Gijón relacionadas con los SUDS, estando la mayoría de ellas asociadas con la actividad del Departamento de Parques y Jardines del Ayuntamiento y con proyectos de investigación desarrollados en colaboración con las Universidades de Cantabria y Oviedo. A continuación, se enumeran algunos de los casos más representativos, describiendo la tipología de SUDS empleada.

- **Aparcamientos de pavimento permeable**.
    - Palacio de los Deportes de La Guía. 15 plazas experimentales ejecutadas con 4 tipos distintos de superficies permeables (hormigón y asfalto porosos, adoquines impermeables en disposición permeable y césped reforzado con celdas) diseñados y monitorizados por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria.



Figura 2. Zona experimental de pavimento permeable en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía de Gijón, monitorizada por el GITECO de la Universidad de Cantabria. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

- Parque Científico Tecnológico de Gijón. 8 plazas experimentales con superficie permeable ejecutada mediante asfalto poroso y adoquines impermeables en disposición permeable diseñados y monitorizados por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria. En este caso, se modificó el material de la capa de sub-base, utilizando escoria reciclada de alto horno.



Figura 3. Zona experimental de pavimento permeable EN EL Parque Científico-Tecnológico de Gijón, siendo monitorizada por investigadores del GITECO de la Universidad de Cantabria. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

- Ecoparking vegetado del Palacio de los Deportes de La Guía. El aparcamiento permeable se ejecutó mediante césped reforzado con celdas como capa de superficie.



Figura 4. Aparcamiento de pavimento permeable y zona experimental del Palacio de los Deportes de La Guía. Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

  - Aparcamiento permeable en la ciudad romana de Veranes diseñado por Parques y Jardines del Ayuntamiento de Gijón.
- **Depósitos reticulares de infiltración** aplicados en el Parque de Los Pericones.
- **Alcorques inundables** de tipo "Estocolmo" diseñado por Parques y Jardines del Ayuntamiento de Gijón.
- **Jardines de lluvia** y áreas de biorretención situadas estratégicamente en varias áreas ajardinadas de la ciudad diseñado por Parques y Jardines del Ayuntamiento de Gijón.
- **Zonas preferentes de infiltración** al terreno como en el caso de la Avenida de El Molinón diseñado por Parques y Jardines del Ayuntamiento de Gijón.

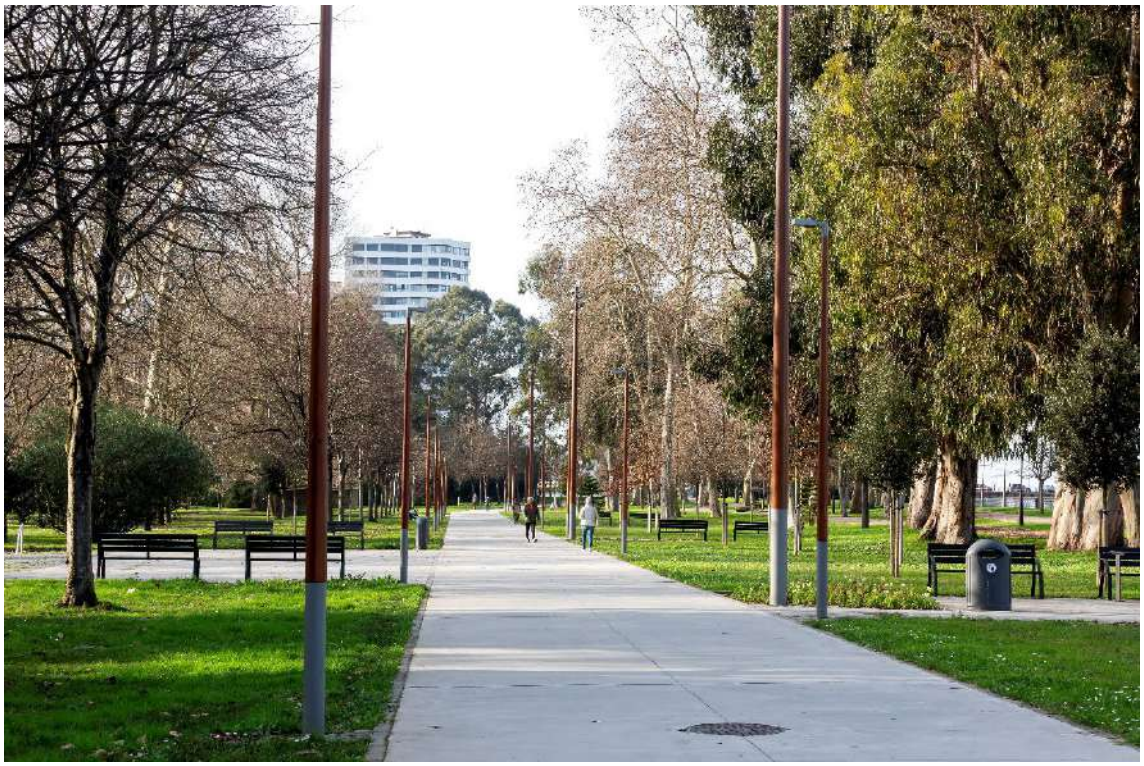


Figura 5. Avenida de El Molinón con zonas verdes actuando de áreas de infiltración preferente de la escorrentía superficial. Fotografía de Luis Manso para el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

Existen más experiencias previas desarrolladas desde el Departamento de Parques y Jardines del Ayuntamiento de Gijón, las cuales pueden ser consultadas para más detalle con dicho Departamento del Ayuntamiento.

Por otra parte, se están llevando a cabo más iniciativas que propugnan la implementación de SUDS con el objetivo de renaturalizar la ciudad, tales como el proyecto Gijón Ecoresiliente o la construcción de estructuras de alcorques inundables

mediante árido reciclado procedente de COGERSA, como el caso del proyecto RecyBlock Sostenible.

Por otra parte, es esperable que se dé un importante aumento en el diseño y construcción de SUDS por toda la ciudad aprovechando los fondos europeos Next generation como el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTP) y los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) del Gobierno de España, en los cuales se promociona la implementación de soluciones basadas en la naturaleza y la gestión sostenible del agua de escorrentía superficial.

1.4 Estructura del documento

El presente manual técnico se organiza en torno a 4 grandes capítulos y una sección final de referencias bibliográficas que han servido de soporte para la investigación del proyecto que ha dado como fruto principal este documento.

El Capítulo 1 contiene una introducción al manual técnico, aportando los antecedentes y necesidades de elaboración de este documento, así como, la descripción del proyecto de investigación que ha permitido su desarrollo. Por otra parte, se enumeran las normativas que sirven de marco al manual técnico desde un punto de vista histórico y actual. A continuación, se enumeran y describen las principales guías básicas y manuales técnicos de SUDS nacionales e internacionales, además de presentar algunas de las experiencias previas en la implementación de SUDS en el Concejo de Gijón.

El planeamiento para la implementación de SUDS se desarrolla en el Capítulo 2, en el cual se proponen criterios e indicadores a través del establecimiento de objetivos estratégicos y etapas de diseño posteriores. A continuación, se desarrollan los aspectos necesarios para poder identificar áreas estratégicas para la implementación de SUDS en Gijón y se describen las principales herramientas y métodos multicriterio para su aplicación en el planeamiento de SUDS.

Por otra parte, el Capítulo 3 facilita los criterios mínimos de diseño SUDS para que los usuarios del manual puedan seguir una guía de mínimos para un correcto desarrollo de sus diseños y dimensionamientos. Con ese objetivo, el capítulo proporciona los aspectos generales de diseño, los condicionantes específicos del Concejo de Gijón en cuanto a su hidrogeología, cuencas hidrológicas, zonas inundables y tipos de suelo generales. Por último, se lleva a cabo una caracterización de los patrones de precipitaciones máximas diarias de la serie histórica de la ciudad, además de dos particularizaciones para el

periodo de los 10 años más recientes distinguiendo entre las dos grandes cuencas de la ciudad, y el análisis de los datos diezminutales desde el año 2019. Finalmente, se proponen don enfoques fundamentales para el diseño de un SUDS, ambos asociados con su dimensionamiento hidrológico y estructural, diferenciando entre los criterios de calidad / volumen de tratamiento de la escorrentía, y cantidad / caudales pico.

El Capítulo 4 aporta los detalles técnicos y recomendaciones de diseño, construcción, variantes, operación, mantenimiento y monitorización de cada una de las grandes tipologías SUDS analizadas para el caso de estudio de Gijón. Se aportan, además, referencias bibliográficas a investigaciones, documentos técnicos, casos de estudio y normativas asociadas con cada una de las tipologías para que el usuario de este manual pueda profundizar en su conocimiento de cada una de estas técnicas cuando lo necesite.

02

Capítulo 2 – Planeamiento



2.1 Propuesta de criterios e indicadores

El diseño SUDS conlleva una gran complejidad dadas las relaciones transversales de dependencia existentes entre las distintas categorías asociadas a los principales beneficios aportados por estas técnicas, y recogidos en los denominados pilares de diseño integral de los SUDS (Figura 6).

- Control de volumen.
- Calidad de aguas.
- Amenidad / servicio, comodidad y calidad de vida.
- Biodiversidad.



Figura 6. Pilares de diseño SUDS. Fuente: elaboración propia adaptado de Woods Ballard et al. (2015).

Experiencias previas de implementación, tanto nacionales, como internacionales, han demostrado que el diseño óptimo de SUDS comienza por una planificación coordinada a nivel de escala de municipio, incluyendo a Departamentos técnicos de un Ayuntamiento como pudieran ser (no de manera exclusiva): Urbanismo, Obras Públicas, Parques y Jardines, Movilidad, Vivienda y Empresa Municipal de Aguas; los cuales estarían relacionados con los pilares de control de volumen, calidad de aguas y biodiversidad. Además, puede requerir de la participación de otras áreas como Cultura y Educación, y Servicios Sociales, en su relación con la vertiente de amenidad / servicio y percepción social de los SUDS. En definitiva, requiere de la participación de todos los agentes envueltos en el desarrollo urbano, recomendando los procesos de participación activa de las y los ciudadanos.

Por lo tanto, la identificación de variables necesarias para el diseño de SUDS debe de llevarse a cabo trabajando desde varios enfoques integrales y diferenciados, que conforman el proceso de diseño holístico de los SUDS propuesto internacionalmente por manuales y guías técnicas, adaptándolo para el caso de la ciudad de Gijón. Como elemento inicial de aproximación, se plantean los siguientes cuatro niveles o etapas de planificación y diseño de SUDS para Gijón:

1. Establecimiento de los objetivos estratégicos de la gestión de pluviales para la zona de estudio.
2. Aproximación inicial mediante un diseño conceptual de los SUDS que pudieran utilizarse para la gestión de pluviales de la zona de estudio.
3. Propuesta de diseño de los SUDS, incluyendo un predimensionamiento y una estrategia de optimización del diseño.
4. Proyecto detallado de diseño, operación y mantenimiento de los SUDS propuestos, y esquema de construcción, incluyendo la validación de la propuesta.

2.1.1 Establecimiento de objetivos estratégicos de la gestión de pluviales

El establecimiento de los objetivos de gestión de pluviales es dependiente de cada zona de estudio dentro del municipio, pudiéndose destacar objetivos estratégicos como los siguientes, propuestos en orden de desarrollo:

1. Alcanzar unos valores mínimos de calidad de aguas en los cauces naturales del municipio.
2. Establecer objetivos de gestión del riesgo de inundaciones.
3. Necesidades asociadas al hábitat y a la biodiversidad.
4. Necesidades y requerimientos de adaptación al cambio climático de infraestructuras de gestión de pluviales.
5. Planeamiento de mejora de los servicios urbanos asociados a los SUDS.
6. Percepción social de los SUDS y sus beneficios.
7. Requerimientos de adopción de SUDS en el municipio.
8. Identificación de las limitaciones y barreras de implementación SUDS asociadas a la red de drenaje existente.
9. Viabilidad técnica y económica a largo plazo de las operaciones de mantenimiento de los SUDS.

En este primer estadio de diseño, ligado a las condiciones del lugar de implementación de los SUDS, y a los requisitos de gestión de pluviales establecidos para el Concejo, es necesario definir los criterios y los indicadores relacionados con las cuatro categorías de principales beneficios proporcionados por los SUDS. Se comienza por la categoría de control del volumen de escorrentía (ver Tabla 1).

Tabla 1. Criterios de diseño e indicadores asociados al control de volumen de la escorrentía.

Criterio de diseño	Indicadores propuestos
CDCV01 – Escorrentía superficial como recurso	IPCV01 – Porcentaje de la escorrentía superficial que es infiltrada o que es almacenada.
CDCV02 – Preservación de la hidrología natural de la zona de estudio	IPCV02 – Porcentaje de modificación de la hidrología natural de la zona en comparación a su condición preexistente.
CDCV03 – Protección de la ecología y morfología de las aguas naturales receptoras	IPCV03 – Volúmenes y ratios de descarga de acuerdo con los estándares recogidos en las normativas de calidad de aguas.
CDCV04 – Drenaje eficiente de la zona de estudio	IPCV04 – Tiempo de drenaje de la escorrentía superficial gestionada por el/los SUDS diseñados de forma que no se vea reducida su efectividad en subsecuentes eventos de lluvia.
CDCV05 – Gestión local de los eventos de inundación de origen pluvial	IPCV05 – Existencia de rutas de rebosamiento y almacenamiento de la escorrentía que los SUDS diseñados no pueden gestionar.
CDCV06 – Flexibilidad y adaptabilidad del sistema a futuros cambios	IPCV06 – Existencia de factores de seguridad al cambio climático y el posible crecimiento urbano, permitiendo futuras adiciones de elementos correctores.

A continuación, se proponen los criterios e indicadores ligados a la calidad del agua como segundo pilar de diseño de los SUDS (ver Tabla 2).

Tabla 2. Criterios de diseño e indicadores asociados a la calidad de aguas.

Criterio de diseño	Indicadores propuestos
CDCA01 – Apoyo a la gestión de la calidad de aguas en las aguas receptoras superficiales y subterráneas	IPCA01.1 – Extensión de las medidas preventivas contra la contaminación en la cuenca de estudio. IPCA01.2 – Extensión de las medidas preventivas para la gestión de riesgo de vertidos *insitu*. IPCA01.3 – Proporción de áreas permeables, cubiertas verdes y/o descargas a sistemas de almacenamiento del agua de lluvia o elementos basados en suelos diseñados. IPCA01.4 – Provisión de la interceptación y tratamiento necesarios para cumplir con los requerimientos mínimos de calidad de aguas. IPCA01.5 – Proporción de los sistemas de gestión del agua superficial que están en superficie o cerca de la superficie facilitando el tratamiento de la calidad de aguas. IPCA01.6 – Alcance de las medidas destinadas a la retención de sedimentos como separadores hidrodinámicos o vasos de sedimentación.
CDCA02 – Diseño resiliente considerando cambios futuros	IPCA02 – El diseño permite complementos para la adaptación futura a cambio climático o crecimiento urbano.

En el caso de la amenidad, el foco se pone en la percepción social de los SUDS y en cómo éstos permiten crear mejores espacios donde vivir y desarrollar las comunidades allí donde se implementan. Se proponen una serie de criterios que llevan asociados unos indicadores que permiten su cuantificación y comparación (Tabla 3).

Tabla 3. Criterios de diseño e indicadores asociados a la amenidad.

Criterio de diseño	Indicadores propuestos
CDAm01 – Maximización de la multifuncionalidad.	IPAm01 – Número, variedad y calidad de usos adicionales de los SUDS, tales como áreas de recreación, aparcamientos, etc.
CDAm02 – Mejora del aspecto visual del paisaje urbano o natural.	IPAm02 – Proporción de los SUDS que son diseñados para ser visualmente atractivos, aportando valor añadido a la zona de estudio, apoyando el patrimonio local, el carácter del paisaje de la zona y la adecuada integración en el área que los rodea.
CDAm03 – Provisión de sistemas de gestión de las aguas superficiales seguros.	IPAm03 – Consideraciones de seguridad dentro del diseño de los SUDS diseñados bajo criterios multifuncionales que incluyan, por ejemplo, usos recreacionales.
CDAm04 – Apoyo al desarrollo de resiliencia y adaptabilidad al cambio futuro.	IPAm04.1 – Proporción de sistemas de drenaje con un complemento que permita hacer frente a futuros efectos asociados al cambio climático y al desarrollo urbano. IPAm04.2 – Proporción de sistemas de drenaje que contribuyen al desarrollo de resiliencia climática como, por ejemplo, aquellos que colaboren en la reducción de las necesidades de climatización de edificios (ej.: proporcionando sobra al edificio, incluyendo elementos de energía renovables dentro de la estructura del SUDS, etc.).
CDAm05 – Maximización de la claridad	IPAm05 – Proporción del sistema que es visible dentro del paisaje urbano o natural.
CDAm06 – Fomento del aprendizaje medioambiental de la ciudadanía	IPAm06 – El Grado y extensión de las estrategias de sensibilización de ciudadanas, estrategias de educación ciudadana, participación de los colegios, etc.

Por último, el pilar asociado a la biodiversidad contaría con los siguientes criterios e indicadores expuestos en la Tabla 4.

Tabla 4. Criterios de diseño e indicadores asociados a la biodiversidad.

Criterio de diseño	Indicadores propuestos
CDBi01 – Apoyo y protección del hábitat natural y especies locales.	IPBi01 – Extensión, calidad y significancia de los hábitats locales protegidos o mejorados por la implementación de los SUDS.
CDBi02 – Contribución a la ejecución de objetivos de biodiversidad locales.	IPBi02 – Hábitats desarrollados a partir del diseño de SUDS que permiten alcanzar los objetivos establecidos a nivel de marco de estrategias de biodiversidad en la zona de estudio.
CDBi03 – Contribución a la conectividad de hábitats.	IPBi03 – Grado de integración de los SUDS diseñados dentro de esquemas más amplios de estrategias de infraestructura asociadas a corredores verdes o azules, apoyando la conexión de hábitats.
CDBi04 – Creación de ecosistemas autosostenibles, resilientes y diversos.	IPBi04 – Rango y diversidad de tipos de hábitats suministrados a través del diseño de SUDS, así como su potencial resiliencia a cambios futuros.

Posteriormente, se deberán de definir las características específicas de la zona de estudio, como por ejemplo: topografía de la zona, definición de cuencas y sub-cuencas asociadas

a la escorrentía superficial, rutas de flujo de avance de la escorrentía dentro del área de estudio, identificación de los potenciales puntos de descarga diferida al drenaje convencional (en caso de existir en la zona de actuación) o de vertido a cauce natural o infiltración al terreno; así como la definición de las zonas inundables, los usos del suelo y la existencia previa de infraestructuras superficiales y enterradas en la zona de estudio. Además, deberán de considerarse las características del suelo, la biodiversidad y la existencia de hábitats locales. Por último, es importante incluir variables asociadas al paisaje natural y urbano de la zona de estudio, prestando especial atención al patrimonio histórico, cultura, industrial y de obra civil del municipio. Todo ello se traduce en los siguientes criterios e indicadores, mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Criterios de diseño e indicadores asociados a las características específicas de la zona de estudio.

Criterio de diseño	Indicadores propuestos
CDCE01 - Adecuación a la topografía de la zona de estudio	IPCE01.1 – Pendiente media de la zona de estudio (%). IPCE01.2 – Pendiente máxima de la zona de estudio (%).
CDCE02 – Definición de cuencas y sub-cuencas asociadas a la escorrentía superficial	IPCE02.1 – Definición de cuencas y sub-cuencas. IPCE02.2 – Porcentaje de área de las sub-cuencas con respecto a la cuenca (%). IPCE02.3 – Ratio impermeable vs permeable.
CDCE03 – Identificación del flujo de avance de la escorrentía superficial en la cuenca de estudio y en cada una de sus sub-cuencas	IPCE03.1 – Longitud máxima de recorrido de la escorrentía en la cuenca de estudio (km). IPCE03.2 – Longitud máxima de recorrido de la escorrentía en cada sub-cuenca de estudio (km).
CDCE04 – Identificación de los potenciales puntos de descarga diferida al drenaje convencional (en caso de existir en la zona de actuación) o de vertido a cauce natural o infiltración al terreno	IPCE04.1 – Puntos bajos del área de estudio y de las sub-cuencas analizadas. IPCE04.2 – Presencia de la red de drenaje convencional. IPCE04.3 – Puntos de vertido al cauce natural.
CDCE05 – Definición de las zonas inundables, los usos del suelo y la existencia previa de infraestructuras superficiales y enterradas en la zona de estudio	IPCE05.1 – Definición de zonas inundables (periodos de retorno) IPCE05.2 – Usos del suelo (coeficientes de escorrentía asociados). IPCE05.3 – Contaminantes presentes (tipos y valores). IPCE05.4 – Presencia de infraestructura superficial y enterrada.
CDCE06 – Características del suelo, biodiversidad y existencia de hábitats locales.	IPCE06.1 – Permeabilidad del suelo (m/s). IPCE06.2 – Presencia de hábitats locales a proteger. IPCE06.3 – Tipo y diversidad de especies presentes.

De la misma manera, es importante definir las características asociadas con el futuro desarrollo urbano de la zona de estudio, en caso de que se trate de un nuevo desarrollo urbanístico. En ese contexto, deberán de tenerse en cuenta los siguientes aspectos: topografía, usos del suelo y paisaje propuestos, nuevas estrategias de gestión de los riesgos de inundación, implementación de nueva infraestructura, estilos y formas de las nuevas edificaciones y construcciones civiles de la zona de estudio, así como la propuesta de implementación y mantenimiento de sistemas de gestión de las pluviales

del área de estudio. De estas características emanarán los futuros criterios e indicadores a desarrollar. Una vez completada la construcción de los distintos criterios e indicadores mostrados anteriormente, se deberá de hacer una primera aproximación a la selección de tipologías SUDS. Con dicho objetivo, es necesario tener en cuenta los principales beneficios aportados por cada tipología SUDS en cuanto a su mecanismo de captación de la escorrentía superficial, su grado de aportación a cada uno de los pilares de diseño integral de los SUDS (Tabla 6).

Tabla 6. Grado de aportación de cada tipología SUDS en función de su mecanismo de captación, su/s función/es hidrológica/s (en orden de importancia, comenzando por la principal) y los criterios de diseño en base a los pilares SUDS.

Tipología de SUDS	Mecanismo de captación / Funciones hidrológicas	Criterio de diseño			
		Cantidad	Calidad	Amenidad	Biodiversidad
Cubiertas vegetadas	Superficial / Detención y retención	Alta[1]	Alta	Alta	Alta
Cubiertas azules	Superficial / Detención y retención	Alta[1]	Alta	Media	Baja
Áreas de biorretención	Puntual / Filtración, detención e infiltración*(1)	Alta[1,2,3]	Alta	Alta	Alta
Balsas de detención e infiltración	Puntual / Detención e infiltración	Alta[1,2]	Alta	Alta	Alta
Cunetas vegetadas	Lateral / Transporte, filtración e infiltración*(1)	Alta[1,2,3]	Alta	Alta	Alta
Alcorques estructurales*(2)	Puntual / Filtración, detención e infiltración*(1)	Alta[1,2]	Alta	Alta	Alta
Firmes permeables	Superficial / Filtración e infiltración*(1)	Alta[1,2,3]	Alta	Media	Media
Drenes filtrantes	Lateral / Transporte, filtración y detención	Alta[2]	Alta	Media	Media
Pozos de infiltración	Puntual / Infiltración y filtración	Alta[1,2,3]	Alta	Media	Alta
Zanjas de infiltración	Lateral / Filtración e infiltración	Alta[2]	Alta	Media	Media
Depósitos reticulares	Puntual / Detención e Infiltración*(1)	Alta[2]	Media	Baja	Baja
Humedales artificiales y estanques	Puntual / Filtración, detención e infiltración	Alta[2]	Alta	Alta	Alta
Sistemas de almacenamiento*(3)	Puntual / Retención y detención	Alta[1,3]	Nula	Baja	Nula

*(1) *Cuando se diseñe con ese objetivo.*
*(2) *El sistema de plantación Estocolmo utilizado en la ciudad de Gijón entraría dentro de esta tipología.*
*(3) Ej.: *aljibes para volúmenes de gran tamaño y barriles de almacenamiento para volúmenes menores.*
[1] *Atenuación de volúmenes de escorrentía superficial generados por eventos de lluvia de baja intensidad.*
[2] *Atenuación del pico de volumen de escorrentía superficial.*
[3] *Atenuación de volúmenes de escorrentía superficial generados por eventos de lluvia de alta intensidad.*

Teniendo en cuenta el potencial diseño de un tren de tratamiento compuesto por varios sistemas SUDS actuando de manera secuencial, es indispensable considerar todos los aspectos previamente descritos.

Por último, se debe de llevar a cabo una etapa final de cierre mediante la optimización del tren de tratamiento SUDS, en caso de haberse considerado tal escenario, basada en la necesidad de alcanzar un grado u otro de cumplimiento de los criterios de diseño integral de SUDS. Ello vendrá marcado por las necesidades específicas de cada zona de estudio, imponiendo el requerimiento de una tipología de SUDS determinada.

Si se tiene en cuenta un tren de tratamiento, ha de contemplarse las posibilidades de conexión y trabajo en conjunto de las distintas tipologías, tal y como se muestra en la

Tabla 7, considerando las principales funciones hidrológicas de cada técnica y su disposición dentro de la secuenciación de éstas dentro del tren de tratamiento.

Tabla 7. Esquema secuencial de todas las posibles combinaciones de técnicas SUDS entre ellas para ser utilizadas dentro de trenes de tratamiento y funcionalidades hidrológicas obtenidas.

Primer elemento del tren / Elemento final de la secuencia	Cubiertas vegetadas	Áreas de biorretención	Balsas de infiltración	Cunetas vegetadas	Alcorques estructurales	Firmes permeables	Drenes filtrantes	Pozos y zanjas de infiltración	Depósitos reticulares	Humedales y estanques	Sistemas de almacenamiento
Cubiertas vegetadas	-----	D – F D – F – Re	D – I	D – Tte	D – F D – F – Re	D – F – I	D – Tte D – F – I	D – F – I	-----	-----	D – R D – Re
Áreas de biorretención	-----	F – Tte	F – I	F – Tte	F – D F – D – I	D – F D – F – I	F – Tte	-----	F – I	-----	F – R F – R – Re
Cunetas vegetadas	-----	F – Tte	F – I	-----	F – D F – D – I	Tte – F Tte – F – I	Tte – I	Tte – I	Tte – D – I	Tte – D – F Tte – D – I	Tte – F – D Tte – F – R
Alcorques estructurales	-----	D – F – Re	-----	D – Tte	-----	F – D – I	D – Tte	-----	-----	-----	-----
Firmes permeables	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	F – D - Re
Drenes filtrantes	-----	-----	Tte – D – I	Tte – I	Tte – F – I	-----	-----	Tte – I	-----	Tte – F – I	Tte –R Tte – F – Re
Pozos y zanjas de infiltración	-----	I – D – Re Tte – F – I	-----	I – Tte	Tte – I Tte – F – Re	-----	-----	-----	-----	Tte – F – I Tte – F – Re	F – D – Re F – I – R

(F) - Filtración; (I) - Infiltración; (D) - Detención; (R) - Retención; (Tte) - Transporte; (Re) - Reutilización en usos no potables (ej.: riego y/o baldeo de calles).

2.1.2 Siguientes etapas de diseño

Las etapas que prosiguen en el diseño, más allá de la planificación urbana descrita con anterioridad, serán tratadas en el siguiente capítulo asociado con los criterios mínimos de diseño SUDS (Capítulo 3) y las recomendaciones relacionadas con cada una de las técnicas SUDS analizadas en este manual técnico (Capítulo 4). No obstante, cabe adelantar algunas de ellas, a continuación, para clarificar el proceso completo de planificación y diseño de SUDS propuesto:

Las etapas que prosiguen en el diseño, más allá de la planificación urbana descrita con anterioridad serán tratadas en la siguiente etapa del proyecto dentro de la sección de diseño de SUDS. No obstante, cabe adelantar algunas de ellas a continuación para clarificar el proceso completo de planificación y diseño de SUDS propuesto:

- La primera fase tras el establecimiento de los objetivos estratégicos de la gestión de pluviales en la zona de estudio y la definición esquemática de los componentes SUDS a incluir en el posible tren de tratamiento, abordado inicialmente en el apartado 2.1.1, es una aproximación inicial mediante el diseño conceptual de la gestión de pluviales en la zona de estudio. Esta fase se caracteriza por las siguientes etapas secuenciales, las cuales serán revisadas globalmente al terminar con la última de ellas, comprobando si se cumple con os criterios de diseño previamente establecidos. En caso de no alcanzarse dichos objetivos, deberá de refinarse y optimizarse la selección propuesta.
    - Establecimiento de los métodos de captación de escorrentía superficial en las distintas sub-cuencas.
    - Selección de los elementos de intercepción de pluviales para las superficies impermeables presentes en la zona de estudio.
    - Selección de los elementos de almacenamiento, en caso de establecerse objetivos de este tipo dentro de la estrategia de gestión de pluviales en la zona de estudio.
    - Selección de las técnicas SUDS de transporte entre los elementos de captación e intercepción y los elementos de final de línea o almacenamiento, en caso de que se este último proceso hidrológico sea elegido como final del tren de tratamiento.
    - Establecimiento de los criterios de tratamiento a proporcionar a la escorrentía superficial presente en el área de estudio, proponiendo para ello los SUDS más adecuados para el objetivo de tratamiento perseguido.

- Identificación de las rutas de rebose de los SUDS dentro del área de estudio.

- En una segunda fase se elabora un diseño esquemático de los SUDS a escala de la zona de estudio y de las sub-cuencas en las que se divide, basado en las siguientes etapas secuenciales:
  - Dimensionamiento de los SUDS a escala de la zona de estudio.
    - Estimación de los picos y volúmenes de descarga de la escorrentía superficial permitidos.
    - Estimación de volúmenes de escorrentía superficial procedentes de las áreas urbanas consolidadas en la zona de estudio, así como de aquellas áreas propuestas en el desarrollo futuro de la zona de estudio, incluyendo complementos o coeficientes de seguridad al cambio climático y futuro crecimiento urbano.
    - Estimación del control de escorrentía superficial y volúmenes de atenuación requeridos en la zona de estudio.
    - Estimación del potencial de los procesos hidrológicos en la zona de estudio (ej.: filtración, infiltración, retención, detención, transporte y tratamiento).
  - Desarrollo de un diseño a escala de sub-cuenca. Dependiendo del grado de cumplimiento de la segunda fase, se deberán de afrontar diferentes acciones a nivel de sub-cuenca, entre las que se encuentran las siguientes, pudiendo ser excluyentes unas de otras.
    - Distribución de la capacidad de almacenamiento y/o infiltración de la zona de estudio entre las distintas sub-cuencas.
    - Distribución de la capacidad de atenuación de volúmenes de escorrentía superficial entre las distintas sub-cuencas y elementos SUDS presentes en ellas, proponiendo elementos de control del volumen aguas abajo de los componentes de almacenamiento y/o detención.
    - De manera no necesariamente excluyente a las dos anteriores acciones, se debería de desarrollar un esquema de gestión de las aguas pluviales a largo plazo dentro de la escala de sub-cuenca, distinguiendo las siguientes fases secuenciales:

- Distribución de la capacidad de almacenamiento y/o detención a largo plazo de la zona de estudio entre las distintas sub-cuencas.
- Estimación de los valores pico de escorrentía superficial provocada por eventos impredecibles de manera individualizada por cada sub-cuenca.
- Estimación de los picos de volumen gestionados por cada uno de los SUDS en la sub-cuenca, así como su el del punto de descarga.
- Estimación de los SUDS de transporte.
- Verificación de las rutas de rebose de los SUDS y su capacidad.

  - Comprobación de la funcionalidad de diseño y del cumplimiento de los objetivos. En caso de no alcanzarse en la funcionalidad y objetivos esperados se refinará el esquema de nuevo.

- Diseño de detalle y modelización de los SUDS. En esta fase se deberán de aportar todos los cálculos de detalle del dimensionamiento de los SUDS, distinguiendo entre dos etapas secuenciales principales:
  - Análisis del comportamiento hidráulico del esquema propuesto en los puntos anteriores, evaluando que dicho esquema cumple con todos los objetivos y criterios de diseño establecidos para la zona de estudio (criterios asociados a los cuatro pilares del diseño integral de SUDS: cantidad, calidad, amenidad y biodiversidad). En caso de no cumplirse alguno de los objetivos habría que refinarse el esquema; mientras que, si el resultado del análisis es positivo, se pasaría a una segunda etapa de finalización de los diseños y modelización presentada a continuación.
  - Finalización del diseño y modelización:
    - Certificación de la estrategia de diseño propuesta.
    - Dimensionamiento y diseño de detalle de cada componente SUDS.
    - Definición del método y proceso constructivo de cada componente SUDS.
    - Plan de mantenimiento para los distintos SUDS diseñados.
    - Evaluación de riesgos de seguridad y salud.
    - Evaluación coste-beneficio de la implementación de SUDS.

- Evaluación global del impacto de los SUDS mediante la herramienta multicriterio propuesta.
- Propuesta de una estrategia de participación, diseminación, información y educación de la comunidad.

Una vez establecido el plan esquemático de trabajo para la planificación y diseño de SUDS, se analizarán en la siguiente fase del proyecto los criterios específicos asociados al lugar de implementación de los SUDS, particularizándolos para la ciudad de Gijón. Dentro de este apartado, se proporcionará información igualmente para el establecimiento específico de SUDS en ambientes urbanos, en infraestructuras de carretera y en ambientes costeros y rurales dentro del Concejo. Además, se comenzará con la redacción del manual técnico en el que se irán detallando todos y cada uno de los procesos de diseño, sus criterios y sus indicadores.

2.2 Identificación de áreas estratégicas para la implementación de SUDS

La metodología de identificación de áreas estratégicas para la implementación de SUDS es un proceso que debe estar acompañado de un análisis de toda la información del área de estudio que pueda repercutir directa e indirectamente en la implantación de estas técnicas de drenaje. Por lo tanto, el proceso de selección debe adaptarse a la información disponible y a partir de ella, realizar la mejor estimación del sitio más apropiado para la implementación de SUDS. El objetivo principal de este proceso operativo es la identificación de las zonas del área de estudio donde la implantación de SUDS conllevaría principalmente más beneficios de índole funcional (mejora del manejo de escorrentía superficial y su calidad), medioambiental y social. Este estudio se realiza a una escala de toda la ciudad, el cual permite tener una visión global de la necesidad de implantación de SUDS, así como una primera aproximación de las áreas estratégicas. Posteriormente en base a los resultados obtenidos en este análisis a escala ciudad, se estará en disposición de realizar un análisis más detallado (escala local) en el que se identificará y seleccionará las tipologías de SUDS más acordes para las áreas estratégicas identificadas, así como para toda el área de estudio. A continuación, se explicará brevemente los pasos generales de los que se compone la metodología.

El primer paso de la metodología propuesta consiste en delimitar el área de estudio mediante un marco de referencia espacial que restrinja el terreno de interés en un área específica de estudio. Este marco de referencia debe abarcar todo el territorio sobre el

que se extiende la acción administrativa en materia de gestión del agua del gobierno local (ayuntamiento o municipio) u organismo con competencias en esa materia. Una vez establecido este marco de referencia se requiere dividir el área limitada en unidades de análisis más pequeñas, de esta manera se podrá realizar un análisis más detallado y facilitar la implementación de esta metodología. Por ejemplo, para proyectos municipales como el caso de Gijón, las divisiones podrían ser: barrios, distritos municipales o electorales, así como cuencas y subcuencas urbanas prioritarias.

El siguiente paso general consiste en establecer cuál es el alcance del proyecto, es decir cuáles son los objetivos que se busca cumplir con la implementación de SUDS. Teniendo en cuenta, que en este caso se está realizando un análisis con una escala de ciudad y que la implementación de SUDS tiene el potencial de mejorar simultáneamente múltiples características del área urbana. Los objetivos generales que se plantean en la metodología propuesta están relacionados con los pilares de diseño de SUDS (cantidad de agua, calidad de agua, amenidad y biodiversidad). Cabe mencionar, que en esta fase las reuniones con los "*key stakeholders*" del proyecto son clave para definir si los objetivos planteados están relacionados con los resultados esperados tras la implementación de SUDS. Los objetivos generales en el alcance de un proyecto son:

- Mantener y proteger el ciclo hidrológico natural, así como apoyar la gestión del riesgo de inundaciones mediante el control de los volúmenes de escorrentía superficial reduciendo los caudales punta procedentes de áreas impermeables.
- Gestionar la calidad de la escorrentía superficial que se origina en ámbitos urbanos, reteniendo los contaminantes arrastrados en ella para prevenir la contaminación difusa.
- Crear y mantener mejores espacios donde las personas puedan vivir, es decir mejorar el paisaje de las ciudades conformando cursos y/o láminas de agua en el entorno y creando espacios verdes. Contribuyendo a revalorizar y/o recuperar áreas urbanas mejorando su desarrollo estético.
- Crear y preservar las condiciones naturales de los lugares donde se implantan, de tal manera que se contribuya al aumento de la biodiversidad.

Luego de establecer el alcance de la intervención se sugiere iniciar la búsqueda de toda la información disponible para el área delimitada en el marco de referencia, tomando en consideración los objetivos establecidos en dicho alcance. Un aspecto clave, es el estudio de todo el marco regulador normativo de ámbito comunitario, estatal, autonómico, municipal y local, que pueda repercutir directa e indirectamente en la implementación

de SUDS. En particular, con la finalidad de realizar un análisis de la manera más eficaz, tiene especial importancia el estudio del Reglamento de Ordenación del Territorio Urbano del marco de referencia. Usualmente este reglamento contempla tres tipos de directrices: regionales, subregionales y sectoriales, las cuales constituyen el principal elemento de planificación y coordinación territorial y la base para el desarrollo de las actuaciones con incidencia territorial que hayan de producirse en el área de estudio. Uno de los principales condicionantes normativos que hay que tener en cuenta es la morfología y composición urbana, la cual queda definida en los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) y normas subsidiarias. Con la finalidad de estudiar e implementar el modelo urbano del marco de referencia en la metodología, hay que estudiar aquellos artículos del PGOU que hacen referencia a la regulación de la clase de suelo (Suelo No urbanizable, Suelo Urbanizable y Suelo Urbano).

El siguiente paso de este proceso de identificación de área estratégicas es seleccionar los criterios sostenibles ligados a los pilares de diseño de los SUDS que van a ser objeto de estudio. Para esto es necesario identificar, de la información disponible, cuál es la necesaria para priorizar una u otra área en particular, a partir de los objetivos establecidos. La Tabla 8 muestra una recopilación de los criterios ligados a los pilares de diseño de SUDS utilizados en otros estudios, donde al igual que en este caso se busca lograr la identificación de áreas estratégicas para la implementación de SUDS a una escala de ciudad.

Tabla 8. Recopilación de indicadores utilizados en otros estudios para lograr la identificación de áreas estratégicas para la implementación de SUDS a una escala de ciudad.

Pilar de diseño	Indicador	Observaciones	Variable
Cantidad de agua	Cuerpos de agua (ríos, lagos, embalses, …)	Ubicación y superficie de todos los cuerpos de agua	Porcentaje de superficie de cuerpos de agua por unidad de análisis [% A_{CA}]
	Inundación fluvial y costera	Cartografía de las zonas inundables asociadas a periodos de retorno (10, 50, 100 y 500 años). Áreas de riesgo potencial significativo de inundación: a la población, actividades económicas, puntos de especial importancia y de importancia ambiental (10, 50 y 100 años)	Porcentaje de superficie de inundación fluvial y costera por unidad de análisis [% A_{ZI}]
	Precipitación	A partir del registro histórico pluviométrico de las estaciones meteorológicas del área de estudio, se	Profundidad de lluvia [mm]

		genera un indicador con la profundidad máxima de precipitación para una duración "t" horas y un periodo de retorno de "T" años	
	Profundidad de escorrentía superficial/ Volumen de tratamiento	Contiene información de los valores de profundidad de escorrentía de cada unidad de análisis. Se requiere realizar un diseño hidrológico previo	Profundidad de escorrentía [mm]/ Volumen de tratamiento [m^3]
	Capacidad del sistema de alcantarillado	Este criterio contiene información de los elementos de drenaje del sistema	Estimación de la capacidad de captación de volúmenes de escorrentía superficial de cada unidad de análisis [Vol./km^2]
	Zonas de encharcamiento	Áreas dentro de las unidades de análisis, donde se reportan habitualmente zonas de acumulación de escorrentía superficial, como consecuencia de sobrecarga del sistema	Porcentaje de superficie con acumulación de escorrentía por unidad de análisis [$\%A_{AE}$]
	Puntos críticos del sistema de saneamiento	Este criterio hace referencia a los puntos del sistema de alcantarillado que presentan problemas derivados de su envejecimiento o requieren una renovación	Número de puntos críticos por unidad de análisis [$N.^{o}_{PC}$]
Calidad de agua	Calidad de los cuerpos de agua	Ubicación e información de los puntos de muestreo de concentración de contaminantes de los cuerpos de agua	Concentración de contaminantes (DBO5, DQO, SS, Fosfatos, Nitratos, …)
	Tipología de la red de saneamiento (Unitaria o Separativa) y CSO (Combined Sewer Outflow)	Información de la tipología de la red de saneamiento e información de los puntos de vertido del sistema de alcantarillado combinado al medio receptor	Porcentaje de superficie instalada con red unitaria o separativa de cada unidad de análisis [$\%A_{TR}$] Número de puntos de vertido por unidad de análisis [$N.^{o}$ V]
	Usos de suelo	Cartografía de los usos de suelo siguiendo la nomenclatura europea CORINE (Coordination of Information of the Environment) Land Cover project	Porcentaje de área de usos de suelo susceptibles de ser una fuente potencial de contaminantes en cada unidad de análisis [$\%US_{FP}$]
	Densidad de población	Este criterio hace referencia a los valores de densidad de población que posee cada unidad de análisis, aquellas áreas con mayor densidad se estima que existirá una mayor contaminación difusa	Número de habitantes por superficie de unidad de análisis [Hab/km^2]

Amenidad y Biodiversidad	Zonas con deterioro urbanístico y social	Información de las áreas de la zona de estudio que presentan obsolescencia o decadencia urbanas debido al desuso o falta de calidad de los espacios, calles, infraestructuras y edificios	Porcentaje de área con deterioro urbanístico y social en cada unidad de análisis [%A_{DU}]
	Zonas con nuevos procesos de urbanización o reordenamiento urbano	Hace referencia a las áreas que van a sufrir nuevos procesos de reurbanización o nueva urbanización en un futuro próximo	Porcentaje de área con nuevos procesos de urbanización o reordenamiento urbano en cada unidad de análisis [%A_{NU}]
	Espacios públicos	Contiene información sobre los espacios públicos donde existe una alta viabilidad de aplicación de SUDS, como, por ejemplo: viales públicos (carreteras, caminos peatonales, aceras), aparcamientos, plazas, parques urbanos, arbolado, instalaciones públicas.	Porcentaje de superficie de espacios públicos por unidad de análisis considerada [% A_{EP}]
	Áreas verdes	Comprende información de todas las áreas verdes públicas de la zona de estudio	Porcentaje de superficie de áreas verdes por unidad de análisis considerada [% A_{EP}]
	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Este índice hace referencia a la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación de las zonas de estudio	Valor del NDVI de cada unidad de análisis [NDVI]

La selección de la ubicación más acorde de los SUDS, en función de los criterios sostenibles considerados, es un problema de alto nivel de complejidad. Esto se debe, a la escala del estudio donde usualmente existen numerosas unidades de análisis y al carácter interdisciplinar de los criterios. Además, la falta de metodologías transversales que permitan la aplicación de estas técnicas, desde un punto de vista urbanístico integrador, contribuye a incrementar el nivel de complejidad.

Existen numerosas técnicas multicriterio para la gestión de los recursos hídricos en zonas urbanas, las cuales se describen en mayor detalle en el punto 2.3 de este manual técnico. El proceso de identificación de áreas estratégicas para la implementación de SUDS a una escala de ciudad en Gijón, se ha realizado mediante un marco geoespacial sistémico que combina un SIG de código abierto llamado Quantum GIS (QGIS) con AHP, donde el objetivo principal es determinar qué áreas tienen el mayor potencial y las mayores limitaciones para la implementación de SUDS. Este proceso de identificación de zonas adecuadas y no adecuadas para la implantación de SUDS se ha desarrollado estudiando nueve criterios relacionados con los pilares de diseño de los SUDS mostrados en la Tabla

8. Cabe mencionar, que los indicadores asignados fueron aquellos de los que se disponía información para realizar el análisis correspondiente.

Los resultados empíricos, tras aplicar el AHP a estos indicadores vinculados a los pilares de diseño de los SUDS, permitieron identificar en qué alternativas la introducción de estas técnicas de drenaje aportaría mayores beneficios funcionales y sociales. El análisis de consistencia aplicado a estos resultados muestra que fueron aceptables, y se puede concluir que en términos generales la necesidad de implantación de SUDS en la ciudad de Gijón está científicamente justificada. Los resultados han mostrado que las alternativas situadas en la parte norte del área de estudio, que se clasifican como tejido urbano continuo o suelo urbano consolidado, la introducción de SUDS ayudaría principalmente a reducir los volúmenes de escorrentía superficial y a mejorar su calidad. En esta parte, se encuentran las alternativas con mayor potencial de implantación, ya que la introducción de SUDS ayudaría a reducir los riesgos de inundación, además de contribuir a la renaturalización del río que atraviesa estas áreas de estudio y aumentaría en gran medida el impacto social positivo. La parte oeste, caracterizada por la zona industrial de la ciudad, también identificó alternativas con gran potencial, principalmente por los resultados obtenidos en el indicador de la relación entre el uso del suelo y la calidad del agua.

Por lo tanto, el marco propuesto presenta resultados satisfactorios y coherentes en cuanto al grado de necesidad de implantación de SUDS en el caso estudiado. Prácticamente todas las alternativas estudiadas alcanzaron, al menos, una ponderación significativa en alguno de los criterios relacionados con los pilares de diseño de cantidad de agua, la calidad del agua y la amenidad-biodiversidad. Se ha concluido que la introducción de los SUDS ayudará al sistema de drenaje convencional a reducir los riesgos de inundación, mejorar la calidad de sus masas de agua y, por otro lado, aumentar la biodiversidad y la calidad de vida de los habitantes del municipio. Además, el estudio detallado del marco normativo del municipio (usos del suelo y estructura urbana según el Plan General de Ordenación Urbana) y el hecho de que las alternativas seleccionadas fueran las cuencas urbanas identificadas por la empresa de gestión de aguas pluviales, ayudarán a que el marco conceptual propuesto se convierta en una herramienta para las autoridades encargadas de la gestión del agua en el caso de estudio e incluso en la incorporación a las políticas locales.

El resultado de este trabajo puede consultarse en abierto en la publicación Suárez-Inclán et al. (2022) incluida en las referencias bibliográficas de este documento y publicada

recientemente por el equipo redactor de este manual técnico. Esta experiencia es pionera en España y sentó las bases de la consideración de los SUDS en la planificación estratégica.

2.3 Sistemas de análisis multicriterio y toma de decisiones en SUDS

Con el objetivo de profundizar en las diferentes herramientas de análisis multicriterio utilizadas principalmente en los trabajos de implementación SUDS en investigaciones internacionales, se elabora el presente punto del manual, pretendiendo que sea de utilidad en el apoyo de las posibles actividades de planeamiento del usuario. En este apartado se muestran los principales métodos de análisis multicriterio, así como las herramientas más usadas en todo el mundo en el ámbito del diseño de los SUDS. Además, se propone un método flexible para el caso de Gijón en base a todo lo existente y a sus posibilidades de particularización hacia el caso específico de Gijón.

2.3.1 Tipos de MCDA aplicados a SUDS

El análisis de criterios múltiples o decisiones multicriterio (MCA o MCDA, por sus siglas en inglés) es una herramienta que se utiliza ampliamente en campos relacionados con la gestión del agua urbana como la planificación estratégica y selección de infraestructura. El principal objetivo de esta herramienta es ayudar a los responsables en la toma de decisiones a encontrar el mejor compromiso (o solución) entre muchas opciones de un problema complicado.

Los MCDA suelen utilizarse a menudo en situaciones y problemas complejos (cuando hay que evaluar varias opciones con respecto a más de una perspectiva) ya que proporciona una forma estructural y transparente de evaluar y comparar diferentes opciones entre sí. La principal ventaja del MCDA es que tiene en cuenta muchas perspectivas diferentes (como; parámetros económicos, medioambientales, técnicos y sociales, etc.) en el análisis.

La problemática respecto a la toma de decisiones viene dada por la dificultad en la definición del propio problema, por lo que un aspecto clave en cualquier MCA o MCDA es su correcta definición en la etapa inicial del proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, el primer paso es establecer los objetivos del MCA e identificar los diferentes grupos de interés que están (o deberían estar) involucrados en el análisis. A veces se recomienda asegurarse de que las estructuras sociales, políticas y administrativas que rodean la decisión se establezca al principio en el proceso. Con carácter general las partes

interesadas en un proyecto para incluir en un MCA son: cualquiera que pueda hacer una contribución al MCA (científicos, ingenieros consultores, funcionarios públicos, ciudadanos, etc.) y cualquiera persona que tenga un interés en el resultado del MCA (instituciones gubernamentales, empresas privadas, ciudadanos, etc.). El siguiente paso es la identificación de un conjunto de alternativas que necesitan ser jerarquizadas por criterios cuantitativos o cualitativos. Estas alternativas han de ser evaluadas en función de un conjunto de criterios que las definen y que generalmente están medidos en diferentes unidades. Posteriormente, un MCA necesita establecer buenos criterios para el análisis ya que son la base de comparación entre las diferentes opciones. Los criterios elegidos deben ser prácticos, operativos y que el número de ellos no sea excesivo, de modo que se pueda realizar fácilmente una clasificación entre las alternativas seleccionadas. Algunos ejemplos de criterios pueden ser: el impacto medioambiental, los aspectos sociales, el rendimiento técnico, etc. Tras agrupar y dividir los criterios en diferentes subcriterios, es importante describir las consecuencias de cada opción investigada en el MCA. A menudo, una simple descripción cualitativa de consecuencias (es decir, una matriz de rendimiento) será suficiente para este paso, que tiene columnas y filas separadas para cada criterio y opción. Luego se selecciona la tipología de MCA o MCDA que mejor se adapta a los requerimientos del proyecto y se aplica un conjunto de medidas de rendimiento con las que se otorga un valor a cada criterio de forma que podemos considerar varios criterios sin que todos tengan la misma importancia a la hora de evaluar las alternativas. El peso de cada criterio refleja tanto el rango de diferencia entre las opciones y cuánto importa esa diferencia. Cuando se hayan asignado pesos a los criterios, será el momento de calcular las puntuaciones ponderadas globales de cada alternativa para llegar a una conclusión sobre el resultado del MCA. Por último, se examinarán los resultados y con carácter general se realiza un análisis de sensibilidad y de consistencia de los resultados obtenidos.

En estos últimos años ha habido una tendencia creciente del uso de MCDA como herramientas para abordar decisiones en cuestiones ambientales y más concretamente en la toma de decisiones aplicado a la planificación y diseño de SUDS. Esto se debe, a que los SUDS han ganado confianza como elementos clave para el control de las inundaciones urbanas, convirtiéndose en las técnicas de drenaje más utilizadas para adaptar con éxito las zonas urbanas a estos retos climáticos presentes y futuros. Sin embargo, existen algunos factores institucionales que limitan la implantación de los SUDS, como el escaso respaldo legislativo, los intereses comerciales privados y la falta

de recursos de las autoridades locales. Es importante realizar estudios interdisciplinares y análisis holísticos de estas técnicas en su implantación y funcionamiento en zonas urbanas. Uno de los aspectos fundamentales es la colaboración entre investigadores, partes interesadas, administración pública y comunidades. La falta de metodologías transversales que permitan la aplicación de estas técnicas, desde un punto de vista urbanístico integrador, contribuye a reducir los efectos beneficiosos que proporcionan los SUDS. En consecuencia, esta cuestión se ha convertido en un tema central para los administradores y académicos involucrados en la gestión de las aguas pluviales y la planificación urbana.

En este escenario, el diseño y la ubicación de los SUDS es un problema complejo de alto nivel. Por lo que, la modelización y el uso de herramientas para la toma de decisiones, como las matrices multicriterio y la optimización, son fundamentales para localizar de forma eficiente los SUDS (tipo, diseño y ubicación), así como para predecir su comportamiento mientras se evalúa su impacto en el sistema urbano.

Existen numerosos MCDA para la gestión de los recursos hídricos en zonas urbanas. Dentro de los métodos y técnicas MCDA utilizados en este campo y más concretamente en la gestión de agua pluvial mediante SUDS, son los siguientes: Teoría de la Utilidad Multi-Atributo (MAUT), Teoría del Valor Multi-Atributo (MAVT), Proceso Analítico Jerárquico (AHP), AHP difuso, Proceso Analítico de Redes (ANP), Lógica difusa, Técnica de Preferencia de Orden por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS), TOPSIS difuso, Modelo de Ponderación Aditiva Simple (SAW), Eliminación y Elección Expresando la Realidad (ELECTRE), y PROMETHEE-GAIA. Las características de algunos de los métodos más comúnmente usados se describen a continuación.

- **MAUT y MAVT**: son modelos compensatorios, significa que las puntuaciones se combinan para obtener una puntuación final. Por lo tanto, un buen análisis de un criterio puede compensar los malos resultados de otro. Los dos modelos se diferencian por el hecho de que MAUT puede tener en cuenta incertidumbres. Sin embargo, esto dificulta su uso, por lo que rara vez se utiliza en aplicaciones de la vida real. Los modelos aditivos lineales son versiones simples de MAVT que pueden utilizarse si los criterios son preferentemente independientes entre sí. Preferentemente independencia significa que las puntuaciones de cada criterio pueden asignarse sin conocer las puntuaciones de otros criterios.
- **AHP**: es un método aditivo lineal basado en la comparación por pares. Por lo tanto, los resultados de este proceso son matrices de preferencia, una para cada

criterio, que representa el rendimiento relativo de cada alternativa según ese criterio específico. Para la ponderación de los criterios, se aplica el mismo procedimiento de comparación por pares para todos los criterios y los analistas establecen la importancia de un criterio en comparación con los demás.

- **ELECTRE y PROMETHEE-GAIA**: conocidos usualmente como métodos "outranking", utilizan comparaciones por pares y también valores umbral. Un "outranking" puede ocurrir cuando hay suficientes argumentos, criterios, para decir que una alternativa supera a otra y no hay ninguna objeción fuerte. Los umbrales están diseñados para determinar si alternativas son indiferentes o si hay una preferencia hacia una de las alternativas en la comparación. Además, si una alternativa es muy superior en un criterio no puede ser superada por otra alternativa independientemente de su rendimiento en otros criterios. Por lo tanto, estos métodos de "outranking" son en cierto modo no compensatorios.
- **TOPSIS**: está basado en la idea de que un problema de toma de decisión con criterios múltiples se puede resolver mediante la jerarquización del problema planteado. El método TOPSIS afronta el problema de establecer un orden en las alternativas utilizando la idea de distancia a la alternativa ideal y a la alternativa anti-ideal.

En base al estudio del estado de la técnica sobre el análisis multicriterio y de toma de decisiones aplicado a la planificación y diseño de SUDS, se han encontrado pocos estudios que abordan esta temática. La mayoría de las referencias encontradas aplican herramientas como los SIG para la planificación y diseño de SUDS (Ariza et al., 2019; Ávila, Amaris, & Buelvas, 2016; Failache, Pons, Pejon, & Zuquette, 2022; Jato-Espino, Charlesworth, Bayon, & Warwick, 2016; Kuller, Bach, Ramirez-lovering, & Deletic, 2017; Langemeyer et al., 2020; Martin-Mikle, de Beurs, Julian, & Mayer, 2015; Muthanna, Sivertsen, Kliewer, & Jotta, 2018; Rezazadeh Helmi, Verbeiren, Mijic, van Griensven, & Bauwens, 2019; Surma, 2015).

Otras referencias utilizan herramientas como los programas de modelización hidrológica para el proceso de planificación de SUDS. Es el caso del software HEC-RAS (acrónimo de Hydrologic Engineering Center y River Analysis System) (Gomes Calixto, Wendland, & Melo, 2020) o el software SWMM (acrónimo de Storm Water Management Model) (Alves, Rufino, Feitosa, Djordjević, & Javadi, 2020; Barreto et al., 2020; Goncalves et al., 2018; Jato-Espino et al., 2016; Pappalardo, La Rosa, Campisano, & La Greca, 2017; Radinja, Comas, Corominas, & Atanasova, 2019).

En cuanto a las referencias que aplican MCDA, los métodos AHP Y TOPSIS son algunos de los métodos de ponderación más utilizados. Además, se ha identificado el modelo AHP como el método que más se combina con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis de aspectos relacionados con el diseño de SUDS como la susceptibilidad a las inundaciones. La mayoría de los estudios analizados aplican un MCDA para la identificación de zonas potenciales para la implementación de SUDS, a continuación, se muestra los estudios y los métodos aplicados para alcanzar este objetivo: MAUT y MAVT (Li, Qin, & Du, 2019), TOPSIS (de Oliveira Campos et al., 2020; Luan et al., 2019; Wang, Sweetapple, Fu, Farmani, & Butler, 2017), TOPSIS difuso (Dang, Wang, & Van-Thac Dang, 2019), AHP (Ahammed, Hewa, & Argue, 2012; Gudiyangada Nachappa et al., 2020; Sheoran & Parmar, 2020; Xiong, Sun, & Ren, 2020; Yang & Zhang, 2021), AHP difuso (Dang et al., 2019) y ANP (El Hattab, Theodoropoulos, Rong, & Mijic, 2020; Gudiyangada Nachappa et al., 2020). Por otro lado, existen otros estudios que aplican MCDA para la selección de zonas potenciales en función de diversas tipologías de SUDS (Loc et al., 2015; Saadat Foomani & Malekmohammadi, 2020).

Por último, se ha identificado que las técnicas SIG-MCDA son las que más potencial tienen para servir a la implantación de los SUDS dentro de la planificación urbana, debido a su capacidad para reflejar las preferencias de las partes interesadas, para computar datos masivos, para visualizar los resultados y debido a su facilidad de uso.

2.3.2 Herramientas de análisis multicriterio y de modelización SUDS

El análisis y evaluación de SUDS requiere del uso de herramientas que sean capaces de abordar múltiples criterios e indicadores, tanto cualitativos, como cuantitativos. Si bien, existen herramientas de cálculo para el diseño considerando los pilares de diseño SUDS de cantidad y calidad, no existen herramientas que conjuguen los cuatro pilares en una sola. Por ello, es obligatorio un uso combinado de varias herramientas. A continuación, se muestran las más utilizadas internacionalmente, destacando en las dos primeras secciones aquellas de uso libre.

2.3.2.1 B£ST

El CIRIA de Reino Unido ha elaborado una herramienta libre para la estimación de los beneficios proporcionados por los SUDS. La herramienta tiene como objetivo permitir evaluar y monetizar los beneficios aportados en el ámbito social, financiero y medioambiental, aspectos éstos de difícil evaluación en programas de modelización del

comportamiento hidrológico en gestión de volúmenes y tratamiento de la calidad de aguas de escorrentía superficial.

La herramienta B£ST presenta evidencias de casos actualizados hasta el año 2018, así como valores de precios hasta el año 2017. Esta herramienta está elaborada sobre un Excel automatizado y programado, disponiendo de una guía de usuario para poder trabajar con ella.

2.3.2.2 US EPA SWMM

El US EPA's Storm Water Management Model (SWMM) es una conocida herramienta usada ampliamente en todo el mundo para la planificación, análisis y diseño de drenaje urbano que contiene, además, un módulo de LID asociado a los SUDS, permitiendo incluir el diseño y modelización de SUDS dentro de una red de drenaje. Se trata, sin duda, de una herramienta importante que debe tenerse en cuenta para el diseño de los pilares asociados con la cantidad y la calidad de aguas.

2.3.2.3 Otras herramientas y esquemas de trabajo

Ante la dificultad de conjugar distintos programas informáticos de acceso abierto para el diseño SUDS, se llevó a cabo una investigación en la Universidad de Oviedo, donde se logró implementar el uso de herramientas GIS en abierto y el SWMM como motor de cálculo y modelización del comportamiento hidráulico de SUDS. Otra opción consistiría en la adquisición de licencias de alto coste económico de los programas especializados. Por ejemplo, la combinación del programa Innovyze Solutions, que puede trabajar e integrarse con ArcGIS, siendo la herramienta más utilizada en Reino Unido.

Por otro lado, existe una herramienta denominada Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation (MUSIC), la cual es la herramienta más utilizada en Australia para la modelización de distintos escenarios con SUDS. Sin embargo, se trata de una herramienta de pago como ocurre en el caso de Innovyze.

Dependiendo de las necesidades que pudiera tener EMASA en ese aspecto, se podría recomendar una vía u otra, aunque en ambos casos se estaría centralizando todo en el diseño en base a los pilares de cantidad y calidad mediante modelización hidráulica. El resto de los pilares habría que cubrirlo mediante el uso de herramientas similares a la propuesta por el CIRIA británico (B£ST).

2.3.2.4 Recomendación de posibles herramientas para su uso en Gijón

Dada la complejidad de escenarios que presenta el Concejo de Gijón, la propuesta es la de desarrollar una combinación de las herramientas anteriores, en acceso abierto, para

la elaboración de un único esquema que permita afrontar dicha dificultad. Con dicho objetivo, se propone utilizar el SWMM en combinación con software GIS de acceso libre para el análisis de los criterios asociados a cantidad y calidad de aguas, así como para introducir en distintas capas del GIS los indicadores asociados a amenidad y biodiversidad. De esta manera, se podría completar el diseño integral de SUDS, considerando sus cuatro pilares de diseño. Esta metodología permite también el uso de una herramienta similar al B£ST particularizada al caso de Gijón, dotando de flexibilidad a futuros cambios de criterios e indicadores, así como a datos específicos asociados con la ciudad de Gijón

03

Capítulo 3 – Criterios mínimos de diseño



3.1 Aspectos generales de diseño

El diseño hidrológico de un SUDS consiste en la definición de los parámetros específicos de la zona de estudio de cada proyecto en el Concejo de Gijón. Los SUDS, una vez implementados dentro de la red de drenaje urbana de la ciudad, o bien, desconectados de ella, contribuyen a modificar su comportamiento hidráulico/hidrológico. DE esta manera, se incrementa la capacidad de tratamiento de las aguas pluviales, acercando el funcionamiento del sistema a aquél propio de un área natural y sus procesos hidrológicos asociados: precipitación, evaporación, infiltración y recarga de acuíferos subterráneos, así como la absorción y la transpiración por medio de la acción biológica de las plantas. De esta manera, los SUDS permiten promover el aumento de fenómenos asociados a estos procesos físico-biológicos:

- **Infiltración al terreno natural**. La escorrentía superficial se introduce entre los poros de un suelo natural o de una capa de filtro artificialmente construida como capa estructural de un SUDS. Dentro de este proceso hidrológico se produce el fenómeno de filtración en el que se reduce la carga contaminante de la escorrentía superficial a través del contacto con los materiales naturales o artificialmente tratados incluidos en las distintas capas que atraviesa la escorrentía superficial en su paso hacia la infiltración final al terreno subyacente.
- **Detención dentro del sistema**. La RAE define la detención como la "acción y efecto de detener o detenerse". El traslado de este concepto al efecto provocado por el SUDS sobre el flujo de la escorrentía superficial queda asimilado como el aumento del tiempo de concentración de dicho flujo dentro de la estructura del SUDS mediante un almacenamiento temporal del volumen de escorrentía a tratar por el sistema. De esta forma se permite una mejora en la efectividad de la reducción de los contaminantes presentes en la escorrentía superficial y la posibilidad de verter dicho volumen de manera controlada hacia los elementos de desagüe del sistema (en el caso de drenaje diferido al sistema convencional) o hacia el terreno subyacente (en el caso de infiltrar al terreno).
- **Retención dentro del sistema**. Este fenómeno queda definido de una forma similar al anterior; si bien, existe una diferencia significativa en cuanto a que el almacenamiento de la escorrentía superficial se hace de manera permanente. Esto promociona un mayor tiempo de contacto de la escorrentía con los materiales y/o especies naturales utilizadas para construir el SUDS, potenciando a su vez la reducción de caudales pico de la escorrentía.

- **Biorretención a través de la componente biológica de los SUDS con base vegetal**. En el caso en que los fenómenos de detención e infiltración se entremezclen con un componente biológico significativo dentro de las capas del SUDS, se estaría en un caso de biorretención, donde la escorrentía superficial captada por el sistema se filtraría a través de las distintas capas con actividad biológica y recibiría el consiguiente tratamiento y detención del flujo.
- **Evaporación y transpiración a través de las capas superficiales de base vegetal de los SUDS**. Procesos biológicos asociados con las especies vegetales utilizadas en el SUDS mediante las cuales se elimina una parte del volumen de la escorrentía superficial captada por el sistema y de la precipitación directa sobre el propio SUDS, a través de la evaporación y transpiración de las plantas.

Una vez definidos los procesos y fenómenos físicos que gobiernan el comportamiento hidrológico de los SUDS, quedan por precisar las consideraciones generales que contribuyen a concretar los parámetros fundamentales de diseño hidrológico de estos sistemas basados en la naturaleza. Numerosas guías y manuales internacionales concuerdan en especificar dos tipos de consideraciones generales para fijar dichos parámetros.

- **Consideraciones generales sobre la configuración del esquema de drenaje de la zona de estudio**, diferenciando entre esquemas de trabajo que reciben la denominación de "en línea", donde el SUDS recibe el agua de escorrentía superficial previamente captado por el sistema de drenaje convencional aguas arriba y lo trata en el propio SUDS para, posteriormente, verterlo aguas abajo al mismo sistema de drenaje convencional, continuando siempre en la misma traza en planta; y el esquema denominado "fuera de línea", definido por una derivación de un volumen determinado de caudal transportado desde aguas arriba por el sistema de drenaje convencional hacia el SUDS, produciéndose el tratamiento de dicho volumen fuera de la traza del sistema convencional. El tipo de configuración seleccionado permite promover una serie de propiedades hidrológicas asociadas a cada tipología de SUDS, aportando al proyectista numerosas posibilidades de diseño.
- **Consideraciones generales ligadas a la pluviometría y las formulaciones de cálculo de la zona de estudio**. La pluviometría es dependiente de las series de datos a las que se tiene acceso por parte de los técnicos con el objetivo de lograr una mayor o menor precisión en los cálculos (ej.: series temporales de

precipitaciones con diversa periodicidad en el intervalo de recogida de datos de precipitaciones: diarios, horarios, t-minutales). Estas consideraciones se tratarán en mayor detalle a través de una serie de recomendaciones o criterios mínimos de diseño dentro de la sección 3.3 de este manual.

3.2 Condicionantes locales de Gijón

3.2.1 Hidrogeología

Se adjuntan los datos hidrogeológicos proporcionados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España, los cuales pueden visualizarse a través del Geo Portal de la infraestructura de datos espaciales (IDE) del Ministerio (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2022). Los principales datos hidrogeológicos a considerar para el diseño de los SUDS son los siguientes: unidades hidrogeológicas, catálogo de sondeos, litología origen y permeabilidad y los afloramientos permeables.

La hidrología natural puede verse en la Figura 2, conjuntamente con las cuencas asociadas con la gestión de las aguas por parte de EMASA.

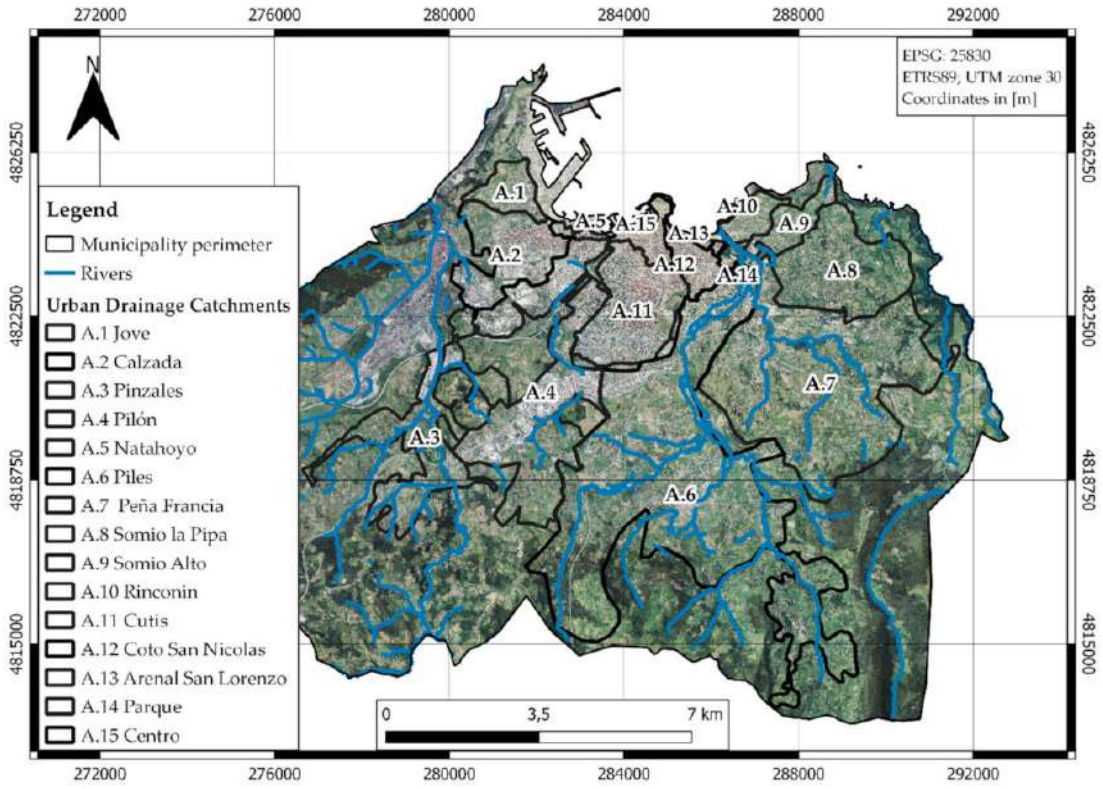


Figura 7. Red hidrológica natural y cuencas artificiales de la ciudad de Gijón. Fuente: Suárez-Inclán et al. (2022), adaptado de información de EMASA.

Además, existen los arroyos de La Braña, Llantones, Lloreda, Meredal, Peña Francia, San Miguel, Tremañes y Veranes, mostrados en la Figura 3. Todos los cauces naturales dependen de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, estando el Concejo de Gijón dividido entre los sistemas de explotación Nalón y Villaviciosa, tal y como viene definido en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (RD 1/2016).

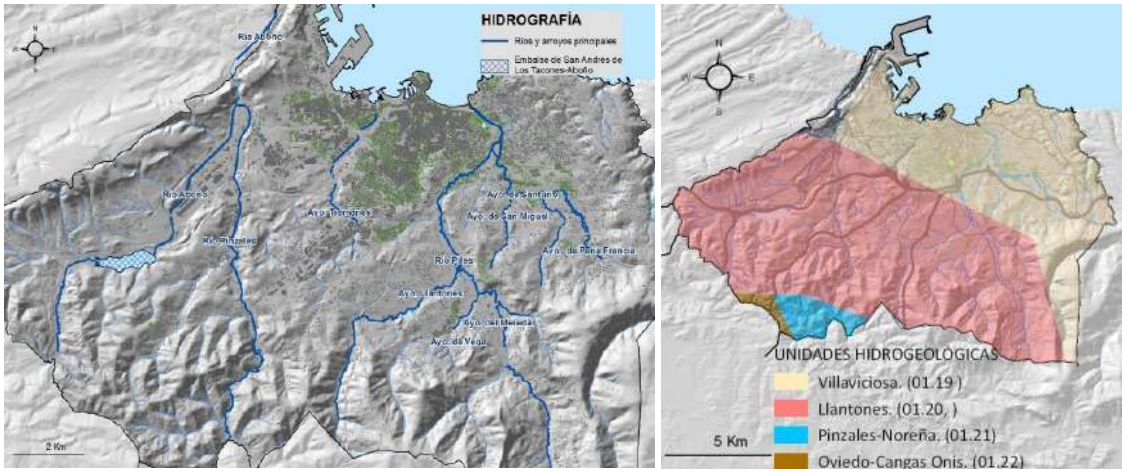


Figura 8. (Imagen izquierda) Arroyos y ríos que discurren dentro de los límites del Concejo de Gijón, así como localización del Embalse de San Andrés de Los Tacones – Aboño; (Imagen derecha) Unidades hidrogeológicas del Concejo de Gijón. Fuente: Ayuntamiento de Gijón (2018).

Los últimos tramos del río Piles están influenciado por la marea del Mar Cantábrico, conformando ambientes estuarios degradados por la regulación hidrológica y la ocupación de las vegas el río por el proceso de urbanización de la ciudad (Blanco 2015).

3.2.2 Cuencas hidrológicas asociadas a la gestión de pluviales en Gijón

Las cuencas hidrológicas artificiales del Concejo de Gijón quedan divididas en 15 zonas diferenciadas según las áreas de planificación y gestión hidráulica de la EMA, las cuales vienen recogidas en la Figura 2.

La red de saneamiento del concejo de Gijón está divida en dos cuencas (Este y Oeste), cada una de estas dos cuencas tiene un sistema integral de saneamiento completo e independiente, que finaliza en una estación de depuración de aguas residuales (E.D.A.R.) y un emisario submarino con un punto de vertido final.

Para una mejor clasificación de las diferentes regiones urbanas y rurales que conforman las partes del saneamiento integral de Gijón, se han definidos áreas que engloban principalmente la red de colectores y zonas de terreno con vertiente natural hacia la red de colectores. En entorno urbano el agua de escorrentía es recogida dentro del sistema

de saneamiento, en cambio en entorno rural el agua de escorrentía no debe de entrar a la red de saneamiento.

La clasificación de las regiones se ha establecido en tres niveles diferentes, denominados cuenca, subcuenca y microcuenca.

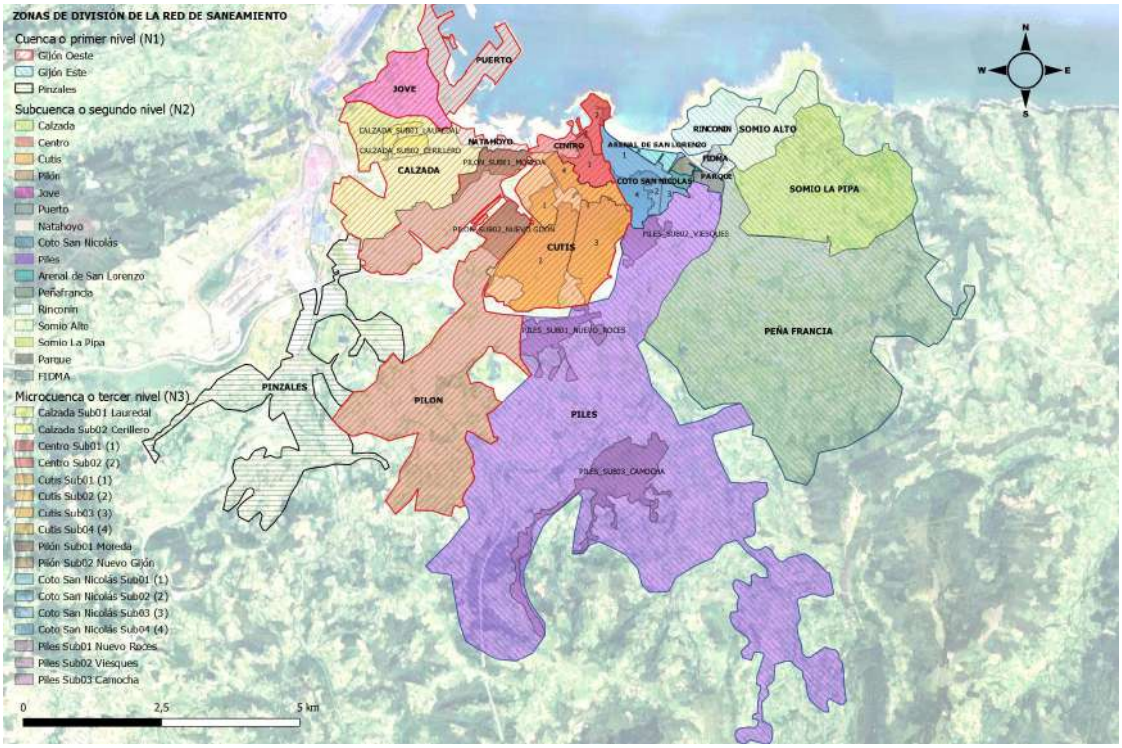


Figura 9. Cuencas, subcuencas y microcuencas para la gestión de pluviales en la ciudad de Gijón. Fuente: adaptado de los datos de la Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A.

3.2.3 Zonas inundables

La ciudad de Gijón tiene varios ríos y arroyos de cierta importancia discurriendo dentro de sus límites municipales, además de ser una ciudad costera de las mareas costeras. Por tanto, es importante que se haga un análisis previo de la cartografía de zonas inundables, tanto de origen fluvial, como de origen marino. De esta forma, se pueden delimitar aquellas áreas bajo distintos niveles de riego asociados a periodos de retorno que pudieran afectar el funcionamiento del SUDS.

Se recomienda el uso del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2022), el cual da acceso a un visor cartográfico donde pueden obtenerse mapas detallados de las zonas inundables para diferentes áreas de la ciudad de Gijón. Este instrumento de apoyo proporciona una guía metodológica para la determinación de zonas inundables, la cual sirve de apoyo en el uso de este sistema de información territorial.

Se deberá de distinguir entre las áreas afectadas por el Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT) y el Dominio Público Hidráulico (DPH) para la identificación de las condiciones de vertido en cada una de ellas.

También se deberán de identificar las áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI).

3.2.3.1 Zonas inundables de origen fluvial

En el caso de las zonas inundables de origen fluvial, se recomienda la creación de planos para la zona de estudio identificando las zonas de flujo preferente, los mapas de peligrosidad a escala 1:2.500 para la extensión de zonas afectadas bajo niveles de peligrosidad alta (T_r = 10 años) y media (T_r = 100 años), así como los calados cada una de ellas. Se recomienda incluir un mapa de riesgo de actividades económicas afectadas y puntos de especial importancia para los mismos niveles de probabilidad (alta y media) a escala 1:2.500.

Existe la posibilidad de descargar los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación de la página sobre "Mapas de peligrosidad y riesgo de zonas asociadas a avenidas de origen fluvial en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental" (CHC 2022), las cuales cubren los cauces naturales existentes en el concejo de Gijón. Los cauces recogidos en esta web son los siguientes: río Pinzales, arroyo La Pedrera, arroyo La Pedrera o Tremañes, río Piles y río Piles \ arroyo San Miguel.

Por último, se recomienda la elaboración de mapas con los caudales máximos en régimen natural para los periodos de retorno de 10 y 25 años.

3.2.3.2 Zonas inundables de origen marino

En el caso de las zonas inundables de origen marino, se deberá de analizar aquellas asociadas con un periodo de retorno de 100 años, denominadas como zonas inundables con probabilidad media u ocasional. También deberán de incluirse los mapas de riesgo asociados a dicho periodo de retorno.

3.2.4 Tipología de usos del suelo

Los principales tipos de usos del suelo recogidos en el Plan General de Ordenación del Concejo de Gijón (Ayuntamiento de Gijón 2018). La identificación de los tipos de suelo es de gran relevancia en la selección de la o las técnicas SUDS a implementar y su posterior diseño y dimensionamiento, ya que cada tipo de suelo suele llevar asociada la

presencia de determinados contaminantes que serán arrastrados por la escorrentía superficial.

La Figura 10 muestra las principales áreas de la ciudad de Gijón asociadas con las diversas tipologías de usos de suelo.

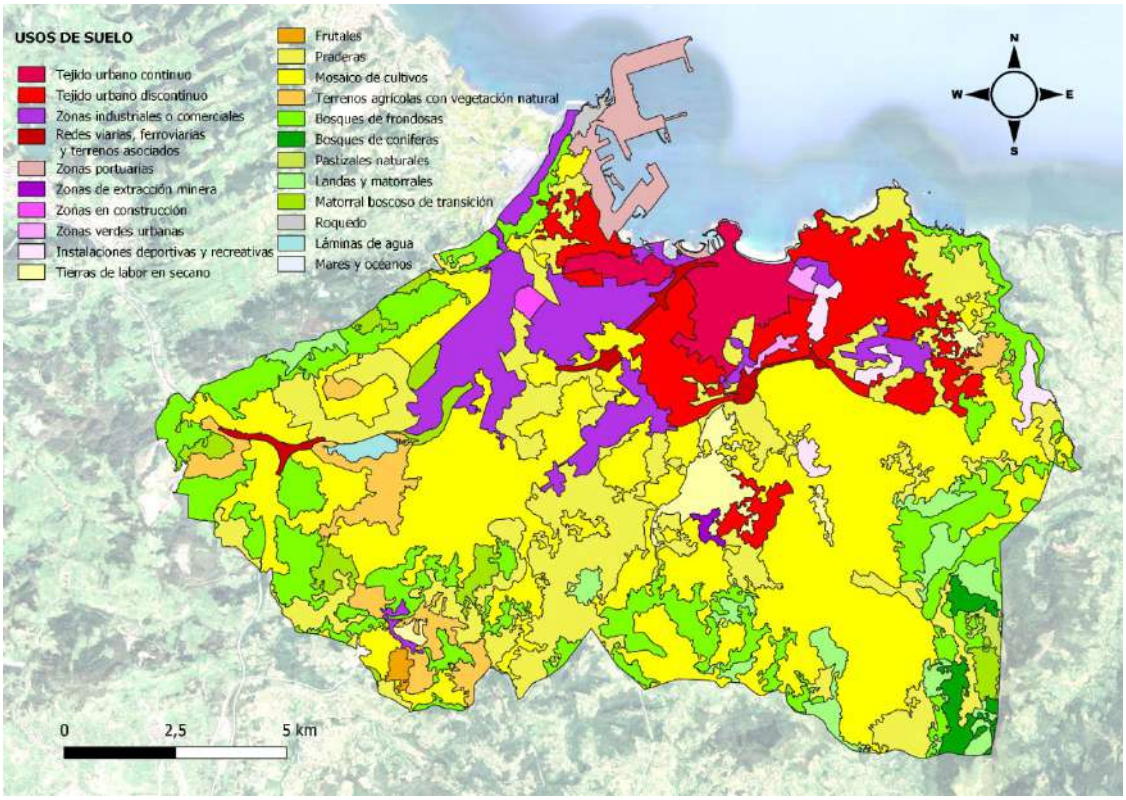


Figura 10. Usos del suelo en el Concejo de Gijón. Fuente: Ayuntamiento de Gijón.

En cualquier caso, se recomienda que el proyectista de un SUDS defina con el mayor nivel de detalle posible las tipologías de usos del suelo a escala de proyecto, ya que los datos previamente mostrados en la Figura 10 son generales y sirven de introducción a la zona de estudio, no debiendo de ser utilizados a una escala que no sea la de planeamiento.

3.2.5 Caracterización de los patrones históricos de precipitaciones diarias en Gijón (1938-2022)

Los datos de precipitaciones diarias utilizadas en el análisis de las precipitaciones de la ciudad de Gijón han sido obtenidos de la sección OpenData de la AEMET (AEMET 2022). Desde ella se descargaron los datos de precipitaciones desde el 1 de octubre de 1938 hasta el 31 de agosto de 2022, usando las siguientes estaciones meteorológicas (Tabla 9).

Tabla 9. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio y periodos de tiempo de funcionamiento de cada una de ellas.

Nombre	Código	Longitud	Latitud	Altitud (m)	Periodo de funcionamiento
Gijón La Merced	1208A	5° 39' 43'' W	43° 32' 30'' N	22	01-10-1938 a 31-5-1976
Gijón	1208	5° 38' 15'' W	43° 32' 20'' N	3	01-06-1976 a 05-04-2001
Gijón Musel	1208H	5° 41' 55'' W	43° 33' 39'' N	5	06-04-2001 a 31-08-2022
Gijón Campus*	1207U	5° 37' 16'' W	43° 31' 23'' N	26	11-10-2013 a 31-08-2022

** La estación Gijón Campus no fue utilizada dentro del análisis de la serie histórica, siendo empleada en la comparativa posterior entre los datos de los últimos años desde el 11-10-2013.*

Los archivos descargados en formato JSON, han sido procesados utilizando Excel® para la extracción de los datos de precipitaciones diarias, programando VBA para su automatización y presentación, con el objeto de poder llevar a cabo el análisis estadístico y la caracterización de la serie histórica de precipitaciones.

Los datos descargados de precipitaciones que aparecen con un valor IP (acrónimo de precipitación inapreciable o inferior a 0,1 mm) reciben el valor de 0 mm en el análisis.

Dada la variabilidad espaciotemporal de las precipitaciones, se recomienda, además, un análisis de la última década, comparando los datos meteorológicos de las dos estaciones actualmente en funcionamiento (1208H y 1207U), captando la variabilidad de sus datos y el potencial impacto de cada una de ellas como estación representativa de cada una de las dos grandes cuencas hidrológicas de Gijón descritas en la Figura 9.

La caracterización general de la serie histórica de precipitaciones de la ciudad de Gijón se lleva a cabo mediante los siguientes análisis estadísticos de los valores extremos de las precipitaciones máximas diarias anuales.

3.2.5.1 Análisis de frecuencias volumétricas

Se comienza por el análisis de los valores medios mensuales de las precipitaciones diarias máximas anuales, los cuales se muestran en la Tabla 10. Además, se calcula el número medio de días de lluvia por cada mes, habiéndose cuantificado un total de 9.845 días de lluvia en la serie histórica.

Tabla 10. Media de los valores de precipitaciones máximas diarias anuales y media del número de días con lluvia por cada mes.

Mes	Precipitación (mm)	N.º de días de lluvia
1	24,1	12
2	21,2	11
3	20,0	10
4	21,0	11
5	21,4	10
6	18,0	7
7	15,4	5
8	20,1	7
9	27,2	8
10	27,9	10
11	29,3	12
12	26,1	13

Los datos de la Tabla 10 se muestran en la siguiente gráfica (Figura 6), donde se puede apreciar la estabilidad del valor de la precipitación media de las máximas diarias anuales asociada con cada mes del año. Este dato es relevante, ya que aporta una idea clara sobre el régimen de precipitaciones anuales esperable durante el año y de los volúmenes totales de lluvia a los que se vería sometido el SUDS. Asimismo, se representan el número medio de días lluviosos por mes, siendo este valor bastante estable, exceptuando los meses de verano entre junio y septiembre, ambos inclusive, donde los días con eventos de precipitación se sitúan por debajo de los 9. El resto del año hay un total de 10 a 13 días lluviosos al mes.

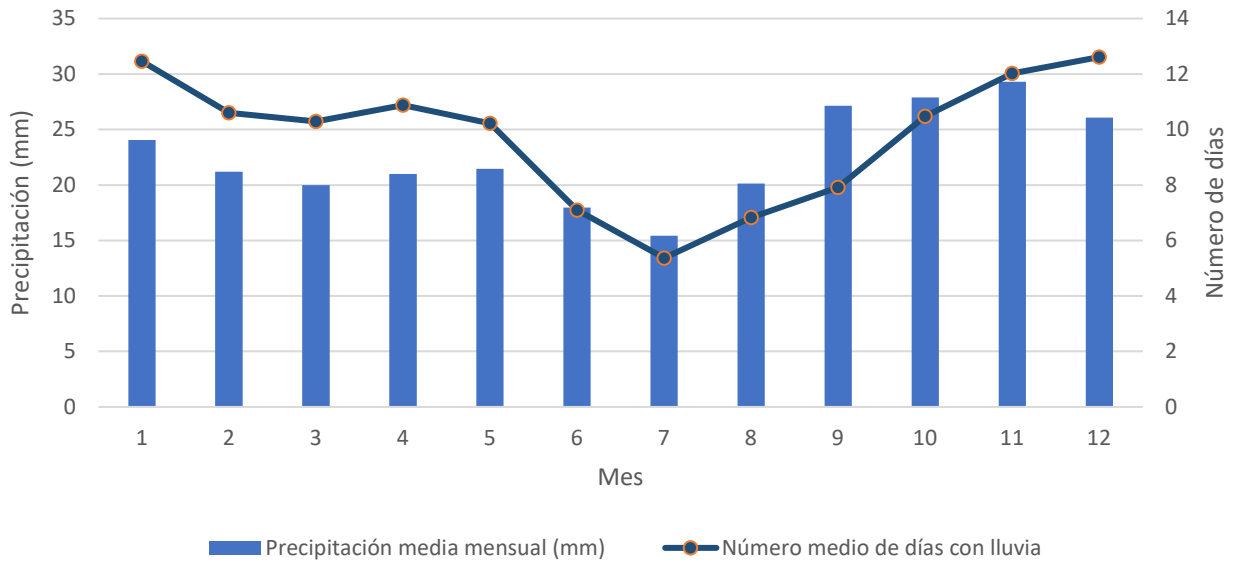


Figura 11. Representación gráfica de las precipitaciones máximas diarias anuales y de la media del nº de días con lluvia por cada mes.

A continuación, se obtienen los percentiles de la serie histórica de precipitaciones diarias, tal y como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Percentiles de las precipitaciones diarias mostrando aquellos percentiles de cálculo habituales (80, 85 y 90), así como los valores extremos asociados a los percentiles de 95, 99 y 100.

Altura de precipitación (mm)	Días	Probabilidad de excedencia	Probabilidad de no excedencia
0	13962	100,00	0,00
1	9845	70,51	29,49
5	4863	34,83	65,17
7	3766	26,97	73,03
9	2900	20,77	79,23
10	**2553**	**18,29**	**81,71**
12	**2013**	**14,42**	**85,58**
14	1624	11,63	88,37
15	1458	10,44	89,56
16	**1315**	**9,42**	**90,58**
17	1188	8,51	91,49
18	1065	7,63	92,37
19	962	6,89	93,11
20	853	6,11	93,89
22	**684**	**4,90**	**95,10**
24	549	3,93	96,07
25	492	3,52	96,48
30	321	2,30	97,70
40	**122**	**0,87**	**99,13**
50	62	0,44	99,56
60	32	0,23	99,77
70	14	0,10	99,90
100	3	0,02	99,98
135	1	0,01	99,99
149,6	**0**	**0,00**	**100,00**

El punto de inflexión de la curva de la Figura 7 se identifica en torno al percentil 91 (V_{91}), correspondiente con un valor de altura de precipitación de 16,1 mm. Este valor representa la altura de lluvia diaria recomendada para el diseño de un SUDS teniendo en cuenta el volumen de tratamiento de la calidad de aguas de la escorrentía superficial en el Concejo de Gijón. Es decir, el SUDS debería de ser capaz de tratar, como mínimo, la contaminación presente en el volumen de escorrentía superficial generado por un evento de lluvia de 16,1 mm de altura, dentro del volumen de diseño de la estructura del sistema.

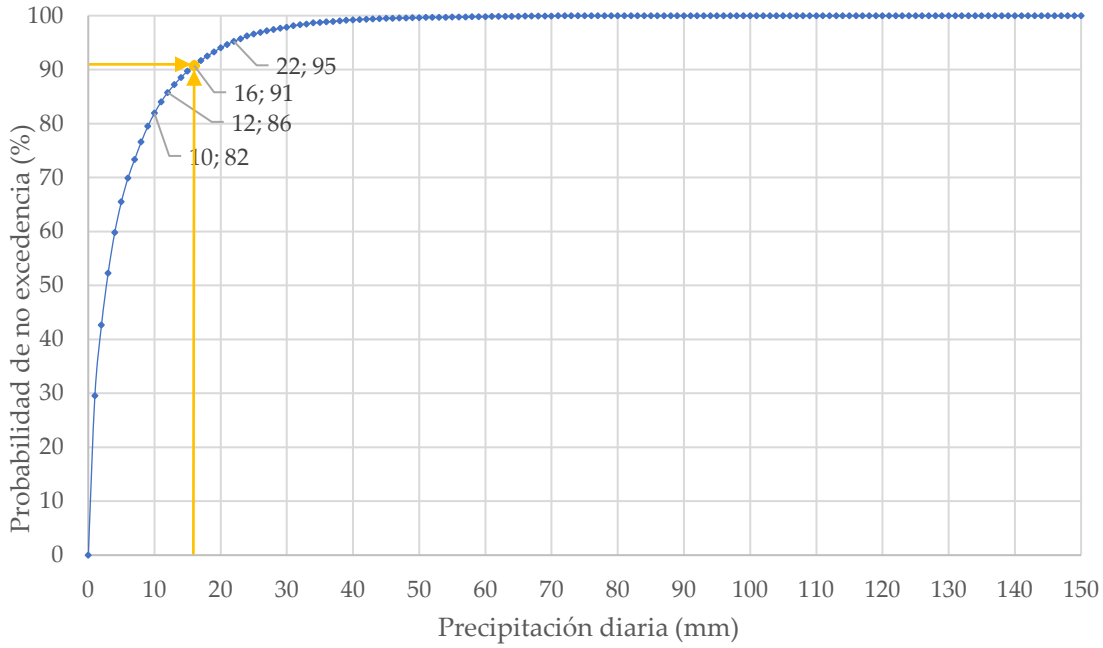


Figura 12. Curva de probabilidades de no excedencia de eventos de precipitación diaria en función de la altura de lluvia en mm.

Los manuales y guías internacionales establecen que los percentiles asociados al volumen óptimo o más eficiente de tratamiento de la calidad de la escorrentía a través de un SUDS se encuentran en el rango de 80 a 90. En el caso de Gijón, este valor se alcanza por encima del valor máximo recomendado por dichos documentos técnicos. No obstante, la diferencia entre el V_{90} y el V_{91} es de 1 mm (Tabla 11). Si se analiza dicha diferencia entre el V_{80} y el V_{90} es de unos 5-6 mm de altura de lluvia como puede verse en la Tabla 18. En el caso de un V_{95}, el valor aproximado de altura de lluvia alcanzaría los 22 mm; mientras que el V_{99}, se sitúa en torno a los 40 mm. Por último, la lluvia máxima diaria registrada hasta la fecha en la serie histórica de Gijón es de 149,6 mm, siendo ésta casi 10 veces superior a la lluvia de diseño propuesta. De ahí la importancia de trabajar con valores óptimos dentro de la curva, asumiendo que las probabilidades de excedencia de un evento de lluvia durante el año sean las menores posibles dentro de las posibilidades reales de aplicación del sistema.

El valor óptimo de la curva es, por tanto, el correspondiente al V_{91} (16 mm); y es el recomendado en esta guía, mostrando un carácter más restrictivo en comparación a los utilizados en otros manuales y guías nacionales e internacionales.

3.2.5.2 *Estadísticos descriptivos de los valores extremos*

Se obtienen los parámetros estadísticos de la media, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de asimetría, la curtosis y el coeficiente de variación para los datos históricos de precipitaciones máximas diarias anuales de la serie 1938–2022 (Tabla 12). El número de muestras de la serie es de (n = 85).

Tabla 12. Parámetros de los estadísticos descriptivos de la serie de precipitaciones máximas diarias anuales de la serie 1938 – 2022.

Parámetro	Valor
Media ($\bar{x}$)	52,4 mm
Mediana (M_e)	47,5 mm
Varianza (S^2)	411,51 mm²
Desviación estándar (S)	20,29 mm
Coef. de asimetría (C_s)	1,93
Curtosis ($Kurt$)	6,37
Coef. de variación (CV)	0,39

Del análisis de los valores presentados en la Tabla 12 se desprende que existe una cierta desviación hacia la derecha de los valores de las precipitaciones máximas diarias anuales de la serie, existiendo un número pequeño de valores altos. Todo ello viene corroborado por la media, que presenta un valor más alto que la mediana, así como que el coeficiente de variación es positivo.

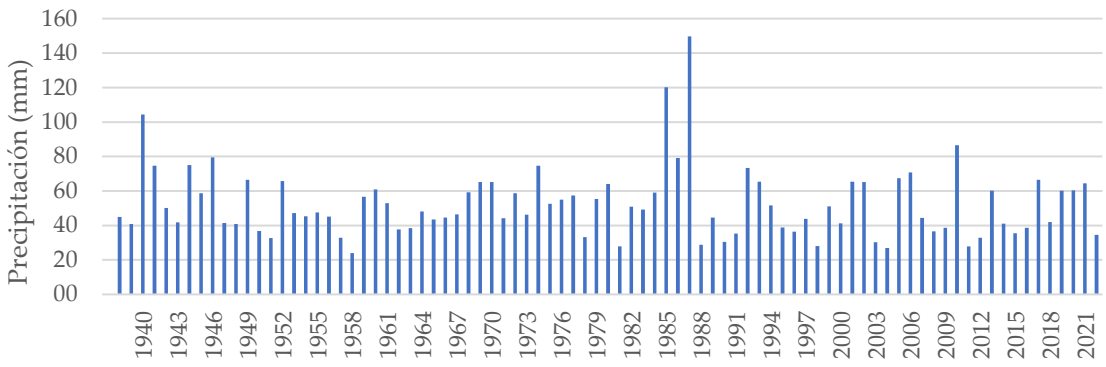


Figura 13. Serie histórica de las precipitaciones máximas diarias anuales en el periodo 1938–2022 en la ciudad de Gijón.

3.2.5.3 *Funciones de distribución de valores extremos*

Las funciones de distribución de los valores extremos permiten identificar aquellos rangos de precipitaciones de la serie que presenten una probabilidad de recurrencia mayor. Con el objetivo de identificar las frecuencias de cada rango, se elaboran la Figura 9 y la Figura 10, mostrando la frecuencia relativa y acumulada de cada rango de precipitaciones de la serie, respectivamente.

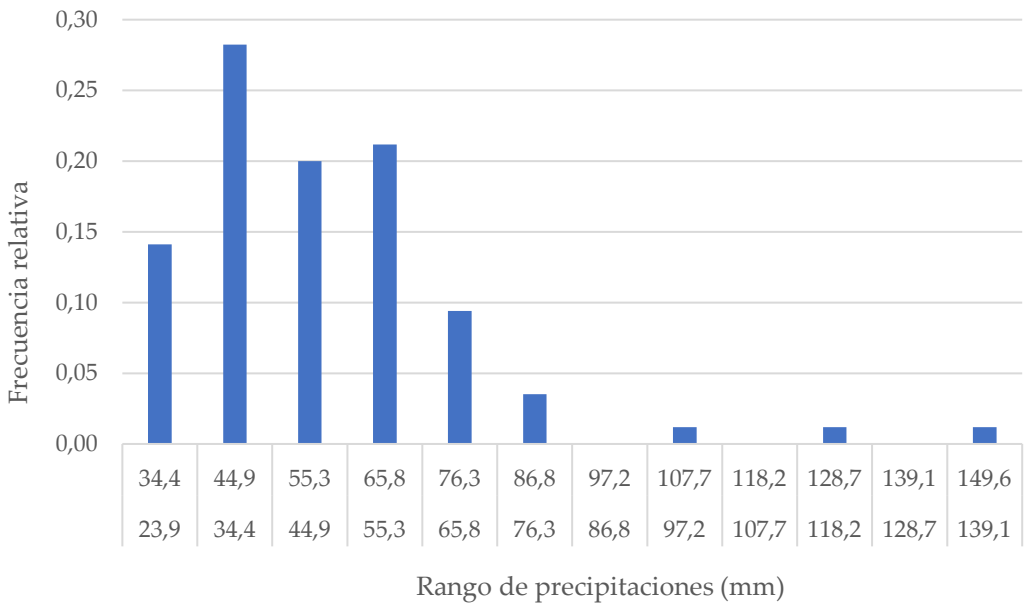


Figura 14. Histograma de la frecuencia relativa de las precipitaciones máximas diarias anuales en el periodo 1938–2022.

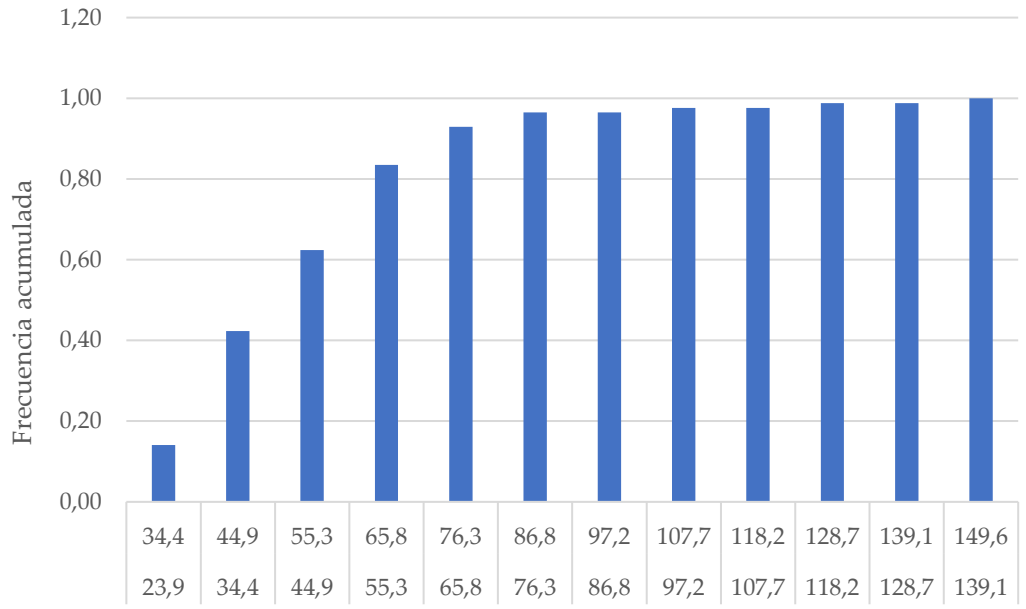


Figura 15. Histograma de la frecuencia acumulada de las precipitaciones máximas diarias anuales en el periodo 1938–2022.

Más del 80% de las precipitaciones máximas diarias anuales se encuentran por debajo de los 65,8 mm, alcanzando un 93% para las lluvias con un valor inferior a 76,3 mm, como puede verse en la Figura 10. Además, la Figura 9 muestra que los valores de la serie por encima de 86,8 mm tienen una frecuencia de ocurrencia muy baja, y que apenas se dan estos casos.

El siguiente paso consiste en representar la curva de frecuencia de la precipitación máxima diaria anual en función del periodo de retorno (Figura 11). En ella se puede observar como la mayoría de las precipitaciones quedan englobadas en un rango de periodo de retorno que no supera los 10 años, quedando cerca de los 80 mm de altura de lluvia. Si se incrementa este valor hasta los 25 años, solamente 3 valores de la serie de 85 años lo superarían.

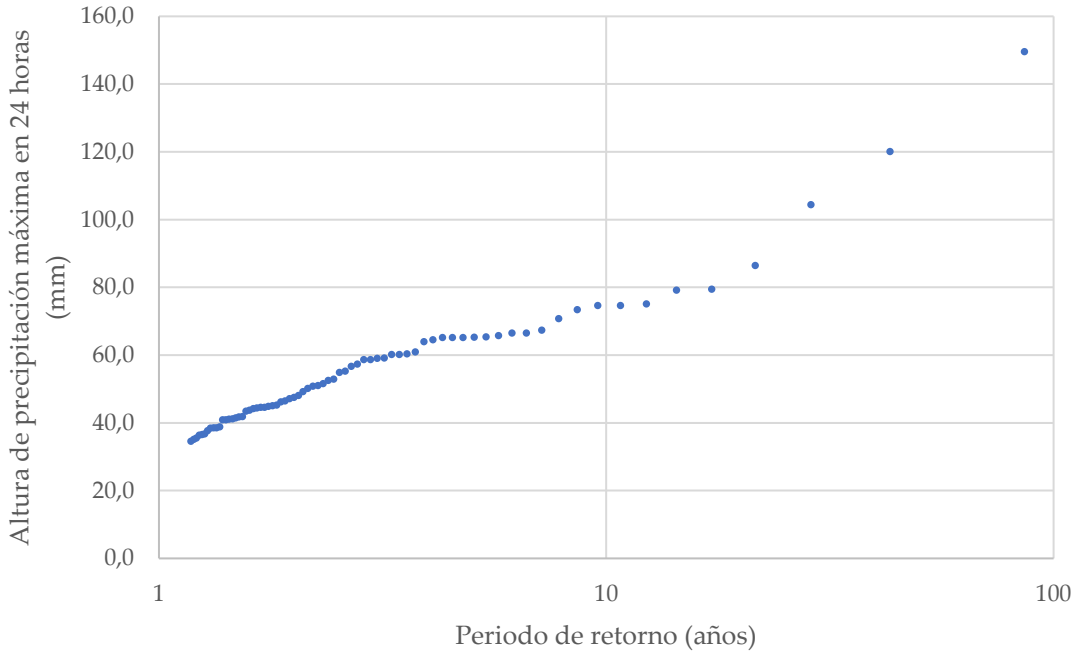


Figura 16. Curva de frecuencia de la precipitación máxima diaria anual en función del periodo de retorno en escala logarítmica.

Una vez obtenida la función de distribución de la Figura 11, se procede a analizar las distintas funciones de distribución recomendadas para el estudio de datos extremos de precipitaciones, comenzando por la función de distribución de Gumbel. La expresión matemática que proporciona los cuantiles de las precipitaciones viene dada por la Ec. 1.

$$X = X_0 - \frac{\ln\left(-\ln 1 - \frac{1}{T_r}\right)}{a} \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- X = Valor de la precipitación estimado mediante la función de distribución Gumbel (mm).
- X_0 y a = parámetros de la función de distribución de Gumbel.
- T_r = periodo de retorno (años).

Los valores de los parámetros de la función de distribución de Gumbel se presentan a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de los parámetros de la función de distribución de Gumbel.

Parámetro	Valor
X_0	43,3055
a	0,0632

Una vez calculados los parámetros de la función, ésta queda definida y puede representarse en la Figura 12.

Posteriormente, se analiza la función de valores extremos generalizados (GEV), cuya aplicación es recomendada en series de precipitaciones diarias máximas anuales. La función aporta más flexibilidad en las estimaciones que la anterior de Gumbel, ya que utiliza 3 parámetros. En el caso de que las muestras son sesgadas, la función GEV es de mayor utilidad que la función de distribución de Gumbel.

La expresión matemática para la obtención del cuantil de precipitación viene mostrada a continuación en la Ec. 2.

$$X_T = u + \frac{\alpha}{k}\left\{1 - \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T_r}\right)\right]\right\} \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- X = Valor de la precipitación estimado mediante la función de distribución GEV (mm).
- α, u y k = parámetros de la función de distribución de Gumbel.
- T_r = periodo de retorno (años).

Los valores de los parámetros de la función de distribución de GEV se presentan a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de los parámetros para la obtención de los cuantiles mediante la función de distribución GEV.

Parámetro	Valor
k	-0,0801
α	13,9506
u	43,7327

Finalmente, se estudia la función SQRT-ET max, cuya aplicación es recomendada en el estudio de las precipitaciones diarias máximas anuales en la España Peninsular.

Los valores de los parámetros de la función de distribución SQRT-ET max se presentan a continuación en la Tabla 15, tanto para el método de los momentos, como para el método de los L-momentos.

Tabla 15. Valores de los parámetros de la función de distribución SQRT-ET max para los métodos de los momentos y los L-momentos.

Parámetro	Momentos	L-momentos
k	180,0459	175,6992
α	1,2482	1,2396

Una vez calculados los parámetros de las funciones de distribución, éstas quedan definidas y pueden representarse de la siguiente manera en la Figura 12.

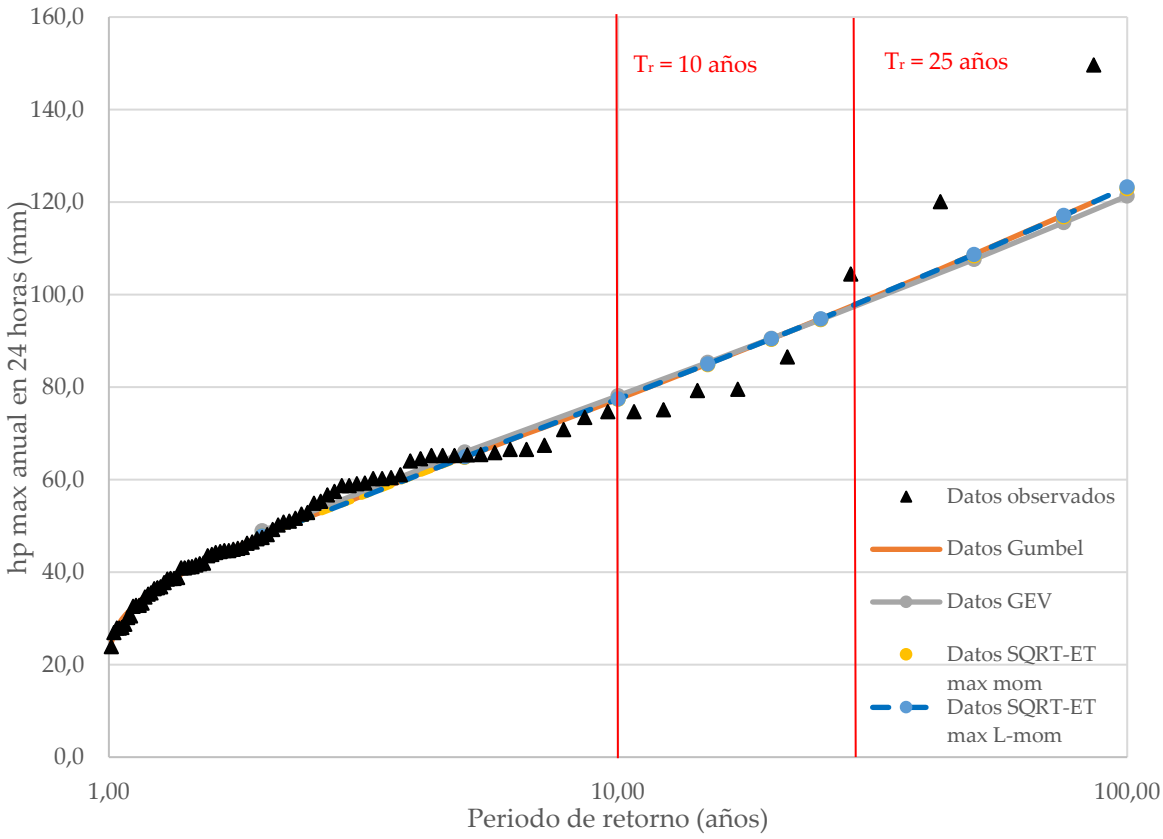


Figura 17. Función de distribución en escala logarítmica de la frecuencia de la precipitación máxima diaria anual en función del periodo de retorno comparada con los valores de las distribuciones de Gumbel, GEV, SQRT-ET max por el método de los momentos, y SQRT-ET max por el método de los L-momentos.

Se analiza la bondad del ajuste de las funciones de distribución Gumbel, GEV, SQRT-ET max mediante el método de los momentos y SQRT-ET max con el método de los L-momentos, con respecto a los datos observados mediante los siguientes análisis estadísticos mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Análisis estadístico llevado a cabo sobre la distribución Gumbel.

Análisis estadístico	Gumbel	GEV	SQRT-ET max mom	SQRT-ET max L-mom
R^2	0,9392	0,9579	0,9622	0,9622
NSE	0,9381	0,9528	0,9557	0,9563
ECM	25,1841	19,1917	18,0038	17,7584
Chi	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$K-S$	Cumple para un nivel de confianza del 95%	Cumple para un nivel de confianza del 95%	Cumple para un nivel de confianza del 95%	Cumple para un nivel de confianza del 95%

Los valores de R^2 y NSE son elevados y muestran la robustez del ajuste en todas sus funciones de distribución, así como los valores de los análisis estadísticos llevado a cabo con el ECM, la Chi y el K-S (Tabla 16).

En todos los casos, los valores de las funciones de distribución se ajustan bien a los valores de precipitaciones observados hasta un periodo de retorno de 25 años (Figura 12). A partir de ahí, los valores observados se alejan de los estimados mediante las funciones de distribución, siendo, además, mayores que los estimados mediante las funciones de distribución, como puede apreciarse en la Figura 12, y quedando del lado de la inseguridad en caso de diseño. Por tanto, se recomienda su uso para periodos de retorno iguales o inferiores a los 25 años ($T_r < 25\ años$). Se recomienda diseñar los SUDS para periodos de retorno inferiores a estos, al igual que se hace en el dimensionamiento de la mayoría de las infraestructuras hidráulicas urbanas, por lo que se considera seguro utilizar las funciones de distribución anteriormente estudiadas dentro de ese rango hasta los 25 años.

La distribución SQRT-ET max L-mom es la que mejor se ajusta a los datos de la serie histórica de Gijón y, por tanto, es la seleccionada para determinar los valores de diseño para cada periodo de retorno, según se muestra en la

Tabla 17, en la que también se compara con el resto de las funciones de distribución y con los datos obtenidos de la aplicación del monográfico de máximas lluvias diarias en la España Peninsular.

Tabla 17. Valores de precipitación de diseño para la gestión de la cantidad de escorrentía superficial en cuanto a los caudales pico según las distintas funciones de distribución aplicadas en este estudio.

Periodo de retorno (años)	Serie histórica (mm)	Probabilidad de no excedencia (%)	Gumbel (mm)	GEV (mm)	SQRT-ET max mom (mm)	SQRT-ET max L-mom (mm)	MFOM 1999
1	23,9	1,16	19,7	----	----	----	----
2	47,5	50,00	49,1	48,92	47,82	47,81	50,66
5	65,3	80,23	67,2	65,97	64,82	64,88	66,94
10	**74,7**	**89,96**	**78,9**	**78,14**	**77,34**	**77,45**	**79,09**
15	79,3	93,33	85,6	85,33	84,84	84,99	----
20	84,1	95,00	90,30	90,52	90,28	90,45	----
25	**95,2**	**96,00**	**93,92**	**94,60**	**94,58**	**94,77**	**95,26**
86	149,6	100,00	113,7	----	----	----	----
100	----	----	116,1	121,34	122,94	123,26	122,1

3.2.5.4 Obtención de las curvas I-D-F de la serie histórica

Tras el análisis de las características generales de la pluviometría de Gijón, se determinan las curvas I-D-F para la serie histórica (1938-2022) a partir de los datos obtenidos de la distribución SQRT-ET max por el método de los L-momentos, por ser ésta la que mejor se ajustaba a la serie de precipitaciones registradas en el periodo de estudio. Los valores de la intensidad para cada duración del evento de precipitación y el periodo de retorno se presentan en la Tabla 25. Se resaltan especialmente los valores asociados a los tiempos de concentración de las dos grandes cuencas existentes en Gijón: Este (2,5 horas) y Oeste (3,5 horas). De la misma manera, se destacan los periodos de retorno de 10 y 25 años, por ser los valores de diseño que se proponen en esta guía (3.3.2).

Los valores de la Tabla 25 se presentan en la Figura 13 para una visión más nítida de las curvas I-D-F determinadas para el caso de la ciudad de Gijón, destacando de nuevo los periodos de retorno de 10 y 25 años como los limitantes para el estudio de los SUDS.

Tabla 18. Datos de los valores de intensidad (mm/h) de las curvas I-D-F de la serie histórica de Gijón (1938-2022) para intervalos diezminutales, resaltando los valores de la intensidad para los tiempos de concentración de las cuencas Este (2,5 horas) y Oeste (3,5 horas) de Gijón en T = 10 y T = 25.

t (min.)	2	5	10	25	50	100	500
10	54,73	74,27	88,66	108,48	124,36	141,10	183,51
20	34,48	46,79	55,85	68,34	78,34	88,89	115,60
30	26,31	35,71	42,62	52,15	59,79	67,84	88,22
40	21,72	29,47	35,19	43,05	49,35	56,00	72,83
50	18,72	25,40	30,32	37,10	42,53	48,26	62,76
60	16,57	22,49	26,85	32,85	37,66	42,73	55,58
70	14,96	20,30	24,23	29,65	33,98	38,56	50,15
80	13,68	18,57	22,17	27,12	31,09	35,28	45,88
90	12,65	17,17	20,49	25,07	28,74	32,61	42,41
100	11,79	16,00	19,10	23,37	26,79	30,40	39,54
110	11,06	15,02	17,93	21,93	25,14	28,53	37,10
120	10,44	14,17	16,92	20,70	23,73	26,92	35,01
130	9,90	13,43	16,04	19,62	22,49	25,52	33,19
140	9,42	12,79	15,26	18,68	21,41	24,29	31,59
150	**9,00**	**12,21**	**14,58**	**17,84**	**20,45**	**23,20**	**30,17**
160	8,62	11,70	13,96	17,09	19,59	22,22	28,90
170	8,28	11,23	13,41	16,41	18,81	21,34	27,76
180	7,97	10,81	12,91	15,79	18,11	20,54	26,72
190	7,69	10,43	12,45	15,24	17,47	19,82	25,77
200	7,43	10,08	12,03	14,72	16,88	19,15	24,91
210	**7,19**	**9,76**	**11,65**	**14,25**	**16,34**	**18,54**	**24,11**

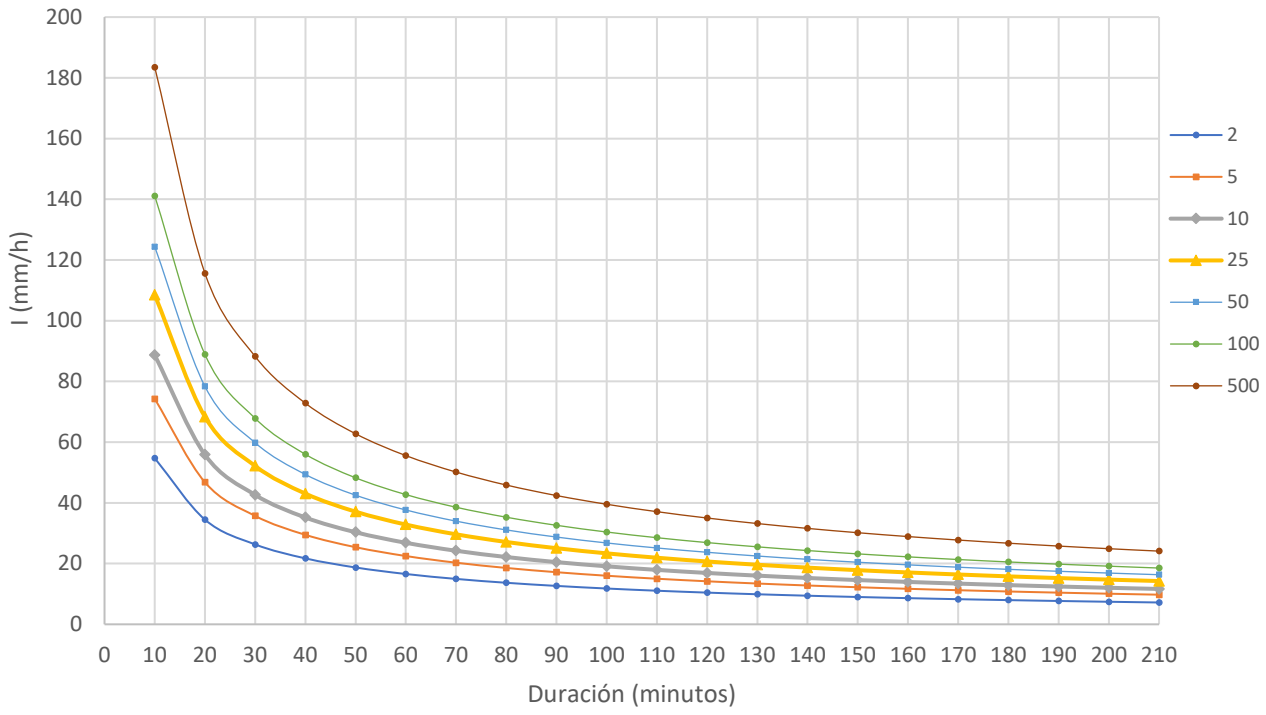
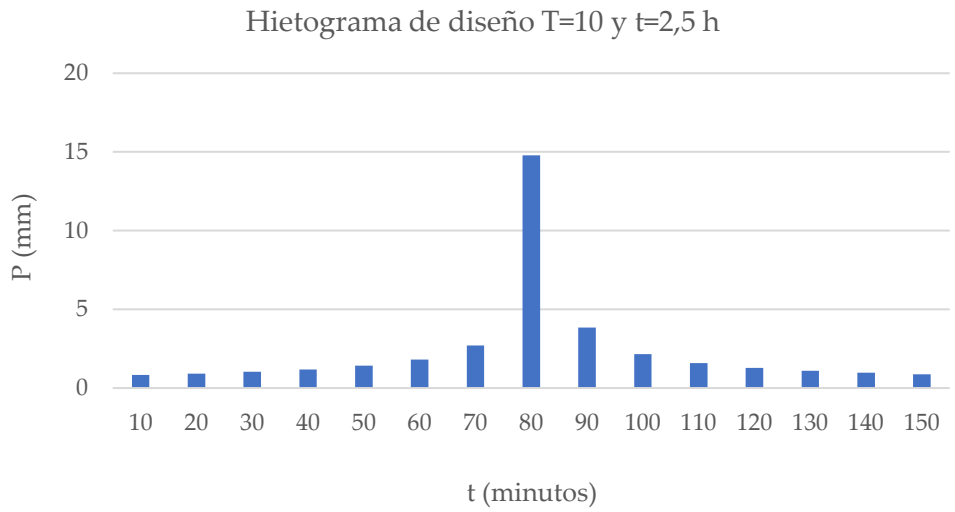
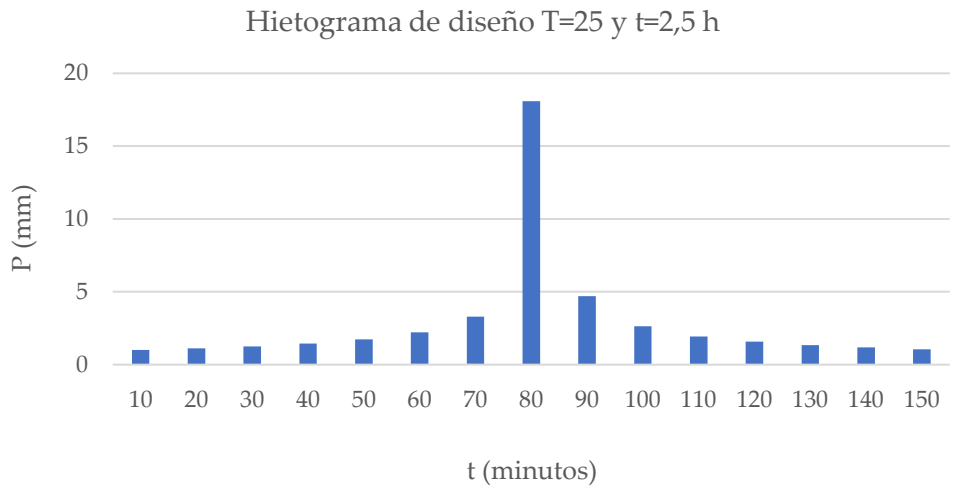


Figura 18. Curvas I-D-F para la ciudad de Gijón obtenidas a partir de las precipitaciones máximas diarias de la serie histórica 1938-2022, resaltando las curvas del T = 10 y T = 25.

3.2.5.5 Determinación de los hietogramas de diseño

Por último, se calculan los hietogramas de la lluvia de diseño para la modelización del comportamiento de SUDS a partir de los datos de las curvas I-D-F para los periodos de retorno de 10 y 25 años, y las duraciones de los eventos de lluvia correspondientes a los tiempos de concentración de cada una de las dos grandes cuencas de la ciudad (Este = 2,5 horas; Oeste = 3,5 horas). Los 4 hietogramas resultantes se presentan en la Figura 14. Los hietogramas se obtuvieron empleando el método de los bloques alternos.





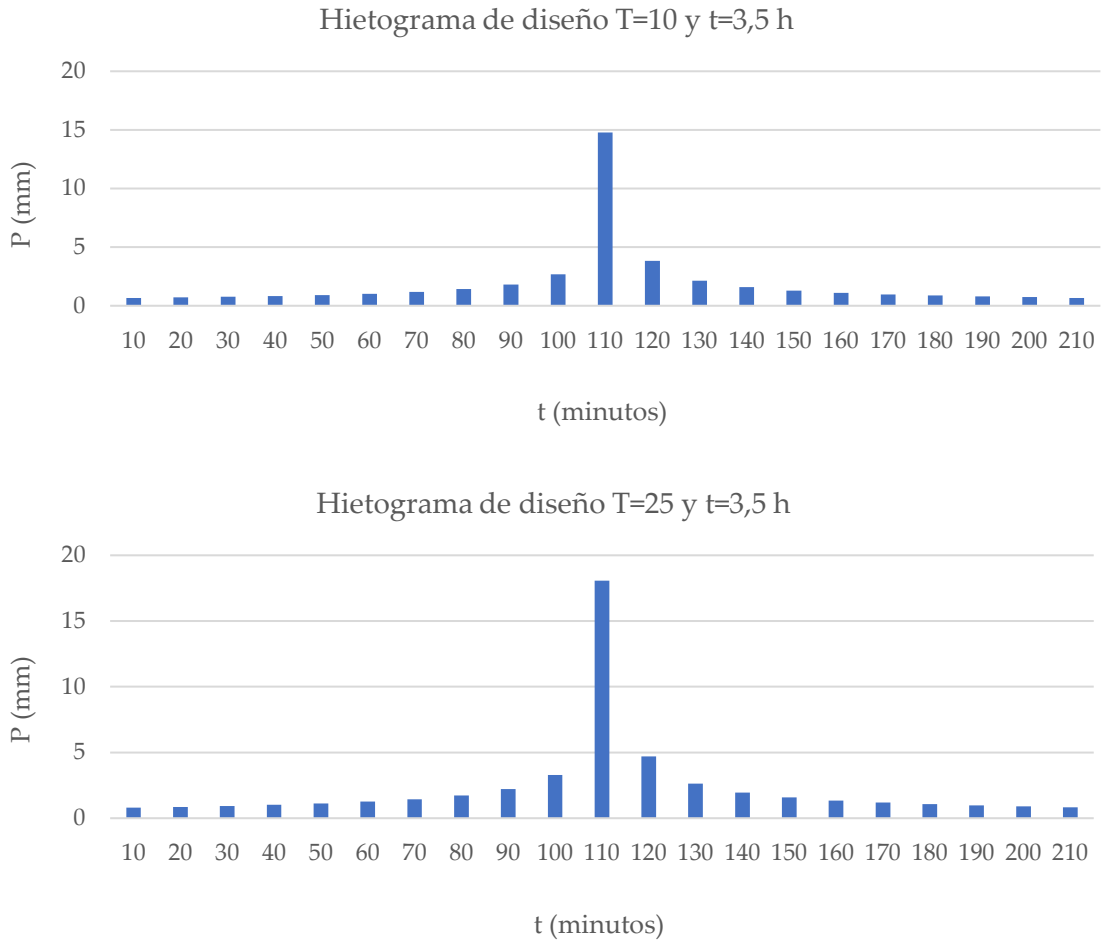


Figura 19. Hietogramas de las lluvias de diseño en función de su cuenca de implementación obtenidas por el método de los bloques alternos.

3.2.6 Caracterización de los patrones de precipitaciones diarias por Cuencas en Gijón (2013-2022)

La caracterización de la serie histórica proporciona un contexto a nivel de todo el municipio a largo plazo, pero requiere del uso de tres estaciones meteorológicas distintas en varios periodos de tiempo distintos (Tabla 9) y no permite identificar posibles alteraciones de los patrones de precipitación dentro del Concejo. Es por ello que se plantea la caracterización de la serie de precipitaciones 2013 – 2022 en las dos estaciones meteorológicas que se encuentran actualmente en funcionamiento (Campus y Musel), a través de los análisis estadísticos de los valores extremos de las precipitaciones máximas diarias anuales.

Cada una de las estaciones estudiadas es representativa de una de las dos grandes cuencas de drenaje del Concejo, siendo la estación del Campus la asociada a la Cuenca Este y la estación de El Musel la correspondiente con la Cuenca Oeste.

3.2.6.1 Análisis de frecuencias volumétricas

El primer análisis se centra en las frecuencias volumétricas de las precipitaciones registradas en ambas estaciones. Se obtienen calcula el número medio de días de lluvia por cada mes, habiéndose cuantificado un total de 989 días en el caso de la estación del Campus y 1.060 días en el caso de la estación de El Musel, como puede verse en la Tabla 19. Además, se aportan los datos de los valores medios mensuales de las precipitaciones diarias máximas anuales.

Tabla 19. Media de los valores de precipitaciones máximas diarias anuales y media del número de días con lluvia por cada mes en la serie 2013-2022.

Mes	Gijón Campus		Gijón Musel	
	Precipitación (mm)	N.º de días de lluvia	Precipitación (mm)	N.º de días de lluvia
1	23,09	13	27,62	14
2	25,73	11	21,28	11
3	18,67	10	23,24	11
4	18,27	10	17,14	11
5	26,29	8	16,43	9
6	27,69	8	21,16	8
7	24,60	5	12,74	6
8	24,67	6	21,60	6
9	32,93	8	22,44	8
10	26,53	8	27,32	9
11	21,73	13	30,54	14
12	26,16	11	33,09	11

La Tabla 19 permite apreciar algunas diferencias en el comportamiento de las precipitaciones máximas diarias anuales medias mensuales de la serie 2013 – 2022 considerando ambas estaciones meteorológicas, lo que invita a estudiar en mayor detalle el resto de los indicadores estadísticos de la serie para cada estación por su posible influencia sobre los valores de diseño y comportamiento hidrológico de los SUDS en función del área de implementación.

La Figura 20 aporta una imagen nítida sobre el régimen de precipitaciones anuales esperable durante el año en cada área de influencia de las estaciones objeto de estudio en este punto, y de los volúmenes totales de lluvia a los que se vería sometido el SUDS durante el año. De la misma manera, se representan el número de días lluviosos promedio por mes. El mínimo de días con eventos de precipitaciones se sitúa en torno a los 8 en ambas estaciones; si bien, la estación de El Musel registra una media significativamente inferior en los meses de julio y agosto, bajando hasta los 6 días lluviosos. En contraste, los meses de otoño e invierno presentan un número de días

lluviosos en el rango de 11 a 14 días en ambas estaciones, exceptuando el valor de 8 registrado de media en la estación del Campus.

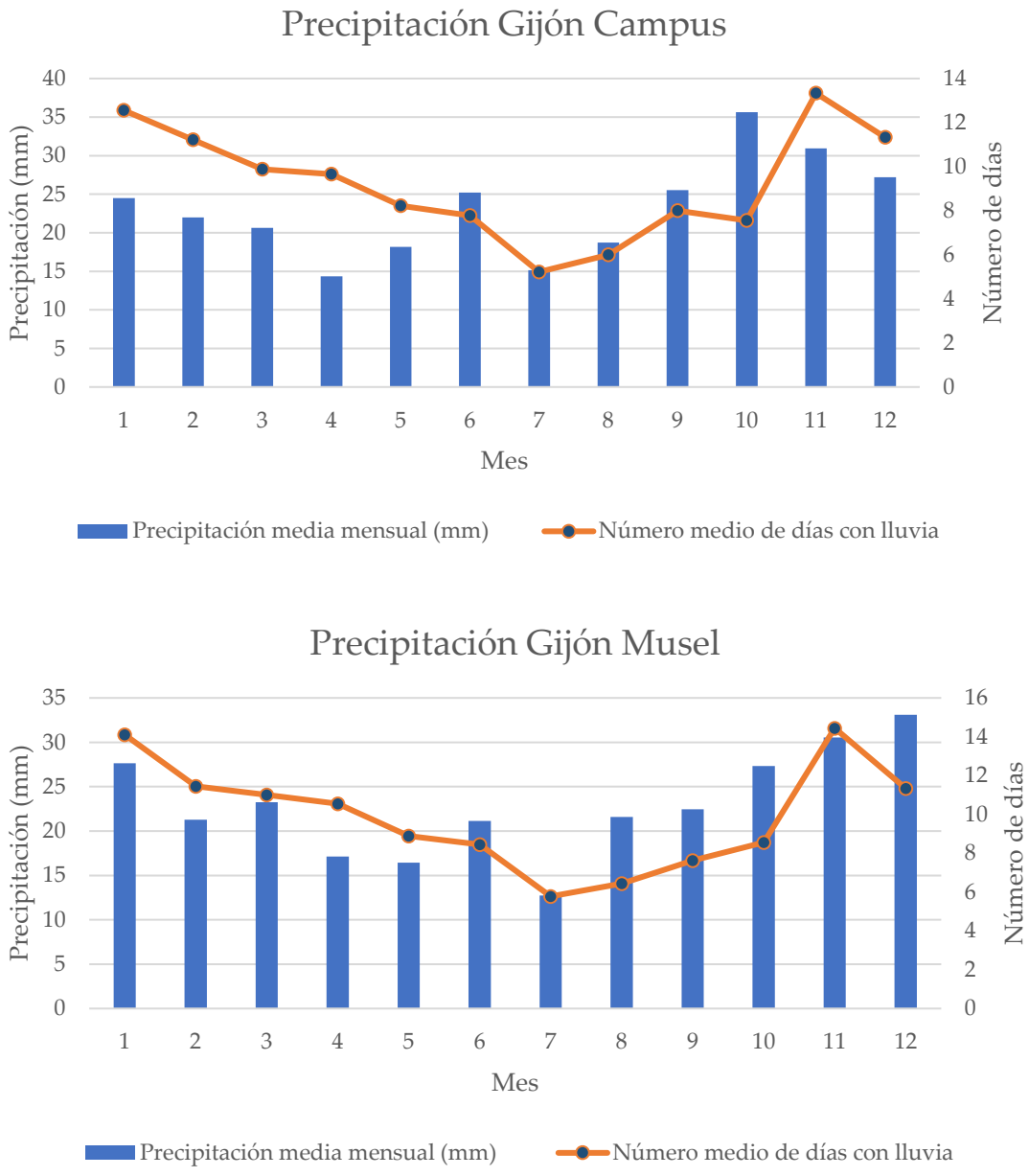


Figura 20. Representación gráfica de las precipitaciones máximas diarias anuales y de la media del n.º de días con lluvia por cada mes.

A continuación, se obtienen los percentiles de la serie 2013-2022 de precipitaciones diarias en la estación Gijón Campus, tal y como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Percentiles de las precipitaciones diarias en la estación Gijón Campus para la serie 2013-2022, mostrando aquellos percentiles de cálculo habituales (80, 85 y 90), así como los valores extremos asociados a los percentiles de 95, 99 y 100.

Altura de precipitación (mm)	Días	Probabilidad de excedencia	Probabilidad de no excedencia
0	1392	100,00	0,00
1	989	71,05	28,95
5	529	38,00	62,00
7	420	30,17	69,83
9	341	24,50	75,50
10	307	22,05	77,95
12	243	17,46	82,54
14	195	14,01	85,99
15	176	12,64	87,36
16	160	11,49	88,51
17	147	10,56	89,44
18	135	9,70	90,30
19	121	8,69	91,31
20	112	8,05	91,95
22	85	6,11	93,89
24	68	4,89	95,11
63	4,53	95,47	63
30	36	2,59	97,41
40	13	0,93	99,07
50	5	0,36	99,64
60	2	0,14	99,86
70	1	0,07	99,93
100	1	0,07	99,93
105	0	0,00	100,00

El punto de inflexión de la curva de la Figura 21 se identifica en torno al percentil 90, correspondiente con un valor de altura de precipitación de 18 mm. Este valor representa la altura de lluvia diaria recomendada para el diseño de un SUDS teniendo en cuenta el volumen de tratamiento de la calidad de aguas de la escorrentía superficial en la zona Este del Concejo de Gijón. Es decir, el SUDS debería de ser capaz de tratar, como mínimo, la contaminación presente en el volumen de escorrentía superficial generado por un evento de lluvia de 18 mm de altura, dentro del volumen de diseño de la estructura del sistema.

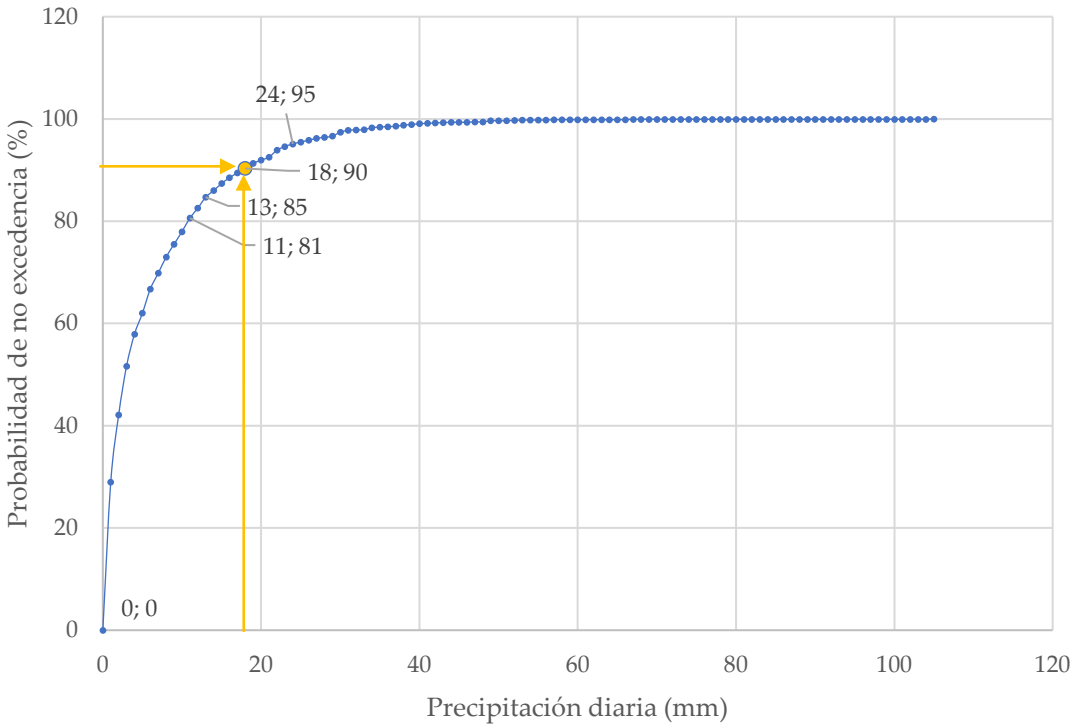


Figura 21. Curva de probabilidades de no excedencia de eventos de precipitación diaria en función de la altura de lluvia en mm para la serie de precipitaciones 2013-2022 en la estación Gijón Campus.

A continuación, se muestran los resultados de los mismos análisis para la estación meteorológica instalada en El Musel (Tabla 21).

Tabla 21. Percentiles de las precipitaciones diarias en la estación Gijón Musel para la serie 2013-2022, mostrando aquellos percentiles de cálculo habituales (80, 85 y 90), así como los valores extremos asociados a los percentiles de 95, 99 y 100.

Altura de precipitación (mm)	Días	Probabilidad de excedencia	Probabilidad de no excedencia
0	1550	100,00	0,00
1	1066	68,77	31,23
5	533	34,39	65,61
7	414	26,71	73,29
9	333	21,48	78,52
10	303	19,55	80,45
12	247	15,94	84,06
14	200	12,90	87,10
15	177	11,42	88,58
16	164	10,58	89,42
17	150	9,68	90,32
18	135	8,71	91,29
19	121	7,81	92,19
20	103	6,65	93,35
23	79	5,10	94,90
24	72	4,65	95,35
25	64	4,13	95,87
30	42	2,71	97,29
40	12	0,77	99,23
50	5	0,32	99,68
60	4	0,26	99,74
67	0	0,00	100,00

El punto de inflexión de la curva de la Figura 22 se identifica en torno al percentil 89, correspondiente con un valor de altura de precipitación de 16 mm. Este valor representa la altura de lluvia diaria recomendada para el diseño de un SUDS teniendo en cuenta el volumen de tratamiento de la calidad de aguas de la escorrentía superficial en la zona Oeste del Concejo de Gijón. Es decir, el SUDS debería de ser capaz de tratar, como mínimo, la contaminación presente en el volumen de escorrentía superficial generado por un evento de lluvia de 16 mm de altura, dentro del volumen de diseño de la estructura del sistema.

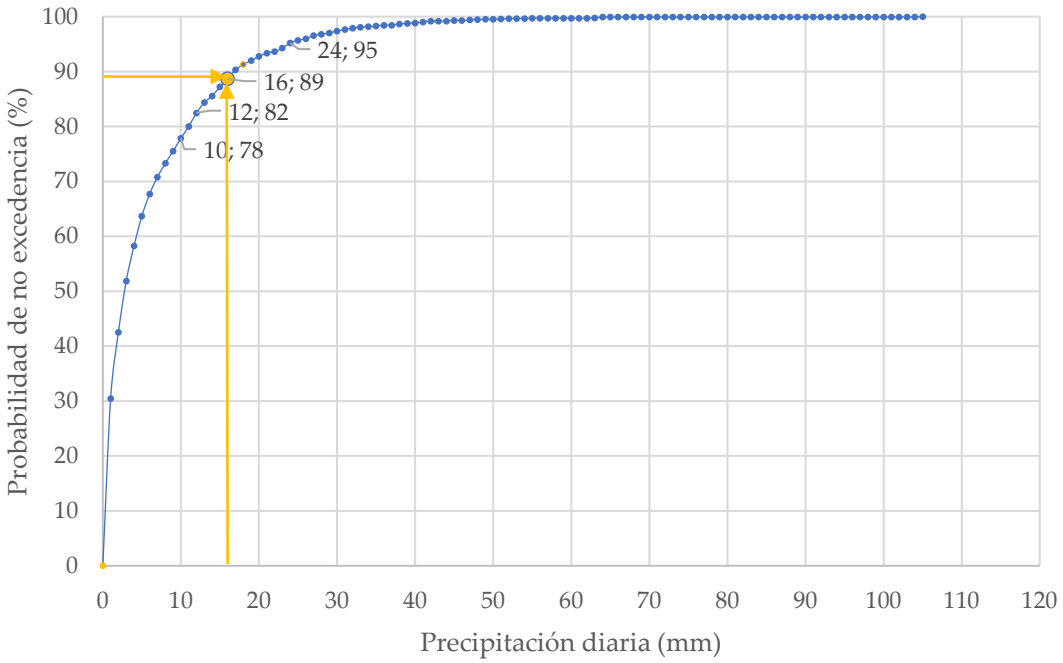


Figura 22. Curva de probabilidades de no excedencia de eventos de precipitación diaria en función de la altura de lluvia en mm para la serie de precipitaciones 2013-2022 en la estación Gijón Musel.

El valor óptimo de la curva es, por tanto, el correspondiente al V_{90} (18 mm) en el caso de la cuenca Este de la ciudad y V_{89} (16 mm) en el caso de la cuenca Oeste; y, por tanto, estos valores serían los recomendados en esta guía para cada una de las dos grandes zonas del concejo.

Estos resultados vienen a confirmar los ya obtenidos en el análisis de la serie histórica 1938 – 2022, cuyo punto óptimo fue encontrado en el V_{91} para un valor de 16 mm (8.2.2).

Finalmente, se lleva a cabo un análisis previo a la caracterización de los datos diezminutales de los últimos 4 años. Se toman los datos de la serie de años completos 2014 – 2021 con el objetivo de determinar cuál de los últimos años con registro de datos diezminutales completos (2019, 2020 y 2021) puede ser utilizado como año medio, obteniéndose que en la estación Gijón Campus, el año sería el 2019 (Tabla 22); mientras que en la estación Gijón Musel, el año medio sería el 2021 (Tabla 23). Por tanto, se recomienda utilizar esos años para modelizar el comportamiento de un SUDS durante 1 año completo de eventos de precipitaciones en cada una de las zonas de estudio (cuencas Este y Oeste asociadas cada una de ellas a la zona de influencia de cada estación meteorológica).

Tabla 22. Determinación del año medio con los datos de la serie de precipitaciones 2014 – 2021 para la estación Gijón Campus.

Año	Precipitación (mm)	Días de lluvia	Datos 10-minutales	Precipitación (mm)		Días de lluvia	
				> 90%	< 110%	> 90%	< 110%
2014	1042,6	115	NO	SI	SI	SI	SI
2015	925,2	113	NO	NO	SI	SI	SI
2016	1129,4	119	NO	SI	SI	SI	SI
2017	960,0	113	NO	SI	SI	SI	SI
2018	1171,4	138	SÍ	SI	NO	SI	NO
2019	1105,4	101	SÍ	SI	SI	NO*	SI
2020	873,2	90	SÍ	NO	SI	NO	SI
2021	1222,2	116	SÍ	SI	NO	SI	SI
MEDIA	1053,7	113					
110%	1159,0	124					
90%	948,3	102					

* El valor del 93% no cumple por 1 día, por lo que se da por válido para poder tener un año medio con precipitaciones diezminutales.

Tabla 23. Determinación del año medio con los datos de la serie de precipitaciones 2014 – 2021 para la estación Gijón Musel.

Año	Precipitación (mm)	Días de lluvia	Datos 10-minutales	Precipitación (mm)		Días de lluvia	
				> 90%	< 110%	> 90%	< 110%
2014	1065,9	115	NO	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
2015	873,6	118	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
2016	1080,4	117	NO	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
2017	906,9	120	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
2018	1087,7	126	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
2019	1293,1	133	SÍ	SÍ	NO	SÍ	SÍ
2020	1168,3	122	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
2021	1097,1	120	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
MEDIA	1071,6	121					
110%	1178,8	134					
90%	964,5	109					

Se recomienda la utilización de los años 2019 y 2021 para la comprobación del funcionamiento de un SUDS mediante la modelización de su comportamiento a medio plazo en lo que sería considerado como un año medio de la serie de los últimos 10 años.

3.2.7 Caracterización de los patrones de precipitaciones diezminutales por Cuencas en Gijón (2019-2022)

Se dispone de datos diezminutales de precipitaciones en las estaciones Gijón Campus y Gijón Musel (Tabla 24), aportados por EMASA al equipo investigador, desde el 1 de enero de 2019 hasta el 30 de septiembre de 2022.

Tabla 24. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio y periodos de tiempo de funcionamiento de cada una de ellas.

Nombre	Código	Longitud	Latitud	Altitud (m)	Periodo de funcionamiento
Gijón Campus	1207U	5° 37' 16'' W	43° 31' 23'' N	26	11-10-2013 a actualidad
Gijón Musel	1208H	5° 41' 55'' W	43° 33' 39'' N	5	06-04-2001 a actualidad

El análisis de estos datos permitirá obtener datos más precisos para la modelización de eventos de lluvia en la evaluación del comportamiento hidrológico de SUDS en la ciudad de Gijón.

3.2.7.1 Identificación de los eventos independientes de lluvia

El primer paso es la identificación de los eventos de lluvia independientes dentro de la serie. Existen recomendaciones en manuales y guías técnicas internacionales para utilizar distintos valores como 6 u 8 horas, pudiendo elevarse hasta las 24 horas en los casos de disponer de datos diarios de precipitaciones. Sin embargo, esos valores responden a hipótesis que no han sido comprobadas para el caso de Gijón. Por lo tanto, se propone utilizar el método de Eagleson (1978) para caracterizar secuencias de eventos de tormentas independientes, previamente utilizado para el mismo fin por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes para la guía SUDS de Bogotá en Colombia (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental 2021).

La metodología de Eagleson consiste en el planteamiento de una aproximación basada en la hipótesis de que la ocurrencia de los eventos de tormenta sigue un proceso de Poisson. Dicho proceso estocástico continuo en el tiempo se asocia con la llegada de sucesos "singulares" y aleatorios como es el caso de la ocurrencia de los eventos de precipitación. La aplicación de este proceso supone que el tiempo entre eventos de lluvia consecutivos sigue una función de distribución del tipo exponencial, siendo cada uno de los eventos independientes entre sí. También supone considerar cada evento como un pulso rectangular de duración t_r e intensidad media i_r. Por otra parte, el tiempo entre el comienzo de dos eventos de lluvia consecutivos se define como t_a; mientras que el

tiempo entre el final del evento de lluvia i y el comienzo del siguiente evento de lluvia (i+1) se define como t_b (Figura 23). Todas estas variables son de naturaleza aleatoria.

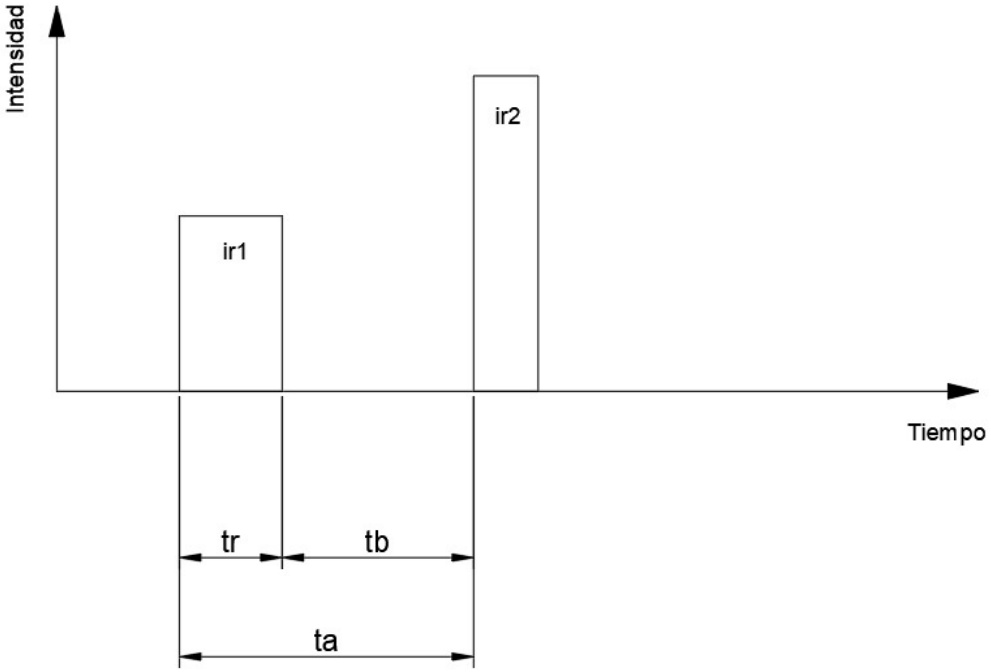


Figura 23. Esquema de dos eventos de precipitación consecutivos e independientes utilizando las variables del proceso de Poisson.

El proceso de Poisson en el caso de las precipitaciones de Gijón se aplica sobre la serie de precipitaciones diezminutales, ya que es la que permite la identificación de la distancia entre eventos de lluvia consecutivos por debajo de las 24 horas. El proceso es iterativo, comenzando por aportar un valor a t_b con el objetivo de desarrollar la serie de eventos de precipitaciones independientes, pudiendo elaborar la distribución muestral de la variable t_a. En este punto, se plantean dos hipótesis ligadas al valor de humectación a considerar. Las guías internacionales sugieren la utilización de 2 mm como valor de humectación, lo que implica que solamente se considerarían aquellos eventos de lluvia con valores del volumen de precipitación superiores a los 2 mm. Sin embargo, se han realizado los cálculos de caracterización de las precipitaciones de la serie histórica y de la serie 2013-2022 de la ciudad de Gijón para valores de eventos de lluvia superiores a 1 mm. Por tanto, se usan ambos valores y se calculan las distancias entre eventos de lluvia consecutivos e independientes de ambas maneras. Los resultados se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Valores de t_b y CV de la distribución muestral de t_a para cada estación meteorológica, suponiendo un valor de humectación de 2 mm.

Estación	Valor de CV de la distribución de la muestra t_a para el valor de t_b (min)								t_b (min)
	$t_b = 60$	$t_b = 120$	$t_b = 180$	$t_b = 240$	$t_b = 300$	$t_b = 360$	$t_b = 420$	$t_b = 480$	
Gijón Campus	1,64	1,38	1,26	1,19	1,14	1,07	1,03	0,99	460
Gijón Musel	1,53	1,32	1,19	1,10	1,03	1,01	0,98	0,96	360

Según las estimaciones realizadas con la aproximación del proceso de Poisson para la serie de precipitaciones diezminutales 2019-2022, la distancia temporal entre eventos de lluvia independientes sería de 460 minutos (7 horas y 40 minutos) en el caso de las precipitaciones registradas en la estación Gijón Campus y de 360 minutos (6 horas) en el caso de las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de El Musel. Estos resultados se ven alterados al aplicar una altura de precipitación para la humectación de 1 mm, como puede verse en la Tabla 26, reduciéndose este valor hasta los 400 minutos (6 horas y 40 minutos) en el caso de Gijón Campus, y 370 minutos (6 horas y 10 minutos) en el caso de Gijón Musel.

Tabla 26. Valores de t_b y CV de la distribución muestral de t_a para cada estación meteorológica, suponiendo un valor de humectación de 1 mm.

Estación	Valor de CV de la distribución de la muestra t_a para el valor de t_b (min)							t_b (min)
	$t_b = 60$	$t_b = 120$	$t_b = 180$	$t_b = 240$	$t_b = 300$	$t_b = 360$	$t_b = 420$	
Gijón Campus	1,67	1,36	1,26	1,14	1,10	1,05	0,99	400
Gijón Musel	1,62	1,36	1,26	1,14	1,05	1,01	1,99	370

Una vez analizados estos valores, se recomienda usar un tiempo de separación entre eventos de precipitación independientes consecutivos de 6 horas y 25 minutos. Para la estimación del número de eventos independientes se tomará como valor de la humectación 1 mm, de forma que coincida con los valores mínimos considerados en los análisis previos para el cálculo del número de eventos de lluvia anuales.

Una vez seleccionados el tiempo de separación entre eventos de lluvia y el valor de la humectación, se estima el número de eventos de lluvia en cada año de la serie 2019-2022, obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 27).

Tabla 27. Número de eventos de precipitación independientes estimados para cada estación meteorológica para un valor de humectación de 1 mm y un tiempo de separación entre eventos de lluvia de 7 horas.

Año	N.º de eventos de lluvia	
	Gijón Campus	Gijón Musel
2019	100	95
2020	94	101
2021	92	88
2022*	56	59
TOTAL	342	343

* La serie de datos de precipitación anual está incompleta y llega hasta el 30 de septiembre de 2022.

La probabilidad de no excedencia del 80% en la estación de Gijón Campus para el periodo de estudio 2019 – 2022, se corresponde con un evento de lluvia de duración 18,7 horas; mientras que, una probabilidad de no excedencia del 90% alcanzaría las 33,2 horas. En el caso de la estación Gijón Musel, estos valores se corresponden con 20 horas para la probabilidad de no excedencia del 80%, y 34,7 horas para la probabilidad de no excedencia del 90%.

Si se extiende este análisis a los volúmenes de precipitación de cada evento independiente, se obtiene que la probabilidad de no excedencia del 80% en la estación de Gijón Campus para el periodo de estudio 2019 – 2022, se corresponde con una altura de lluvia de 17 mm; mientras que la probabilidad de no excedencia del 90% sube hasta un valor de 31 mm. En el caso de la estación Gijón Musel, estos valores se corresponden con 15 mm para la probabilidad de no excedencia del 80%, y 28 mm para la probabilidad de no excedencia del 90%.

3.2.7.2 Estadísticos descriptivos

A continuación, se presentan los principales estadísticos descriptivos de ambas estaciones meteorológicas para el periodo de tiempo considerado (Tabla 28).

Tabla 28. Parámetros de los estadísticos descriptivos de la serie de precipitaciones de los 342 y 343 eventos independientes estimados para la serie 2019 – 2022 en las estaciones Gijón Campus y Gijón Musel, respectivamente.

Parámetro	Gijón Campus	Gijón Musel
Media ($\bar{x}$)	12,7 mm	11,9 mm
Mediana (M_e)	5,4 mm	5,1 mm
Varianza (S^2)	360,72 mm²	396,53 mm²
Desviación estándar (S)	18,99 mm	19,91 mm
Coef. de asimetría (C_s)	3,47	4,36
Curtosis ($Kurt$)	16,23	25,49
Coef. de variación (CV)	1,50	1,68

3.3 Criterios mínimos de diseño

Este manual recomienda una serie de criterios mínimos de diseño, que llevan asociados unos objetivos a alcanzar mediante el diseño de SUDS en la ciudad de Gijón. El proceso distinguirá entre dos etapas (Figura 24): una primera asociada con el cálculo de los valores de dimensionamiento de los componentes del SUDS y sus elementos auxiliares de rebose y conexión con el sistema de drenaje convencional; y una segunda fase, ligada a los distintos escenarios de comprobación del comportamiento hidrológico de la técnica SUDS mediante la modelización de su respuesta frente a distintas situaciones de estrés del sistema.



Figura 24. Diagrama de flujo conceptual de los criterios mínimos de diseño.

Valores de dimensionamiento de los componentes y elementos auxiliares del SUDS.

1. Estimación del valor de la altura de lluvia para el valor óptimo de la distribución de precipitaciones diarias máximas anuales de la serie histórica (1938 – 2022). El valor propuesto se alcanza para el percentil 91 (V_{91}) con un valor de 16 mm de altura de lluvia. Este valor se utiliza para el dimensionamiento de las capas del SUDS y para estimar la superficie que ocuparía y se asocia con el volumen de tratamiento de la calidad de aguas de la escorrentía superficial.
2. Determinación de la función de distribución que mejor se ajusta a la serie histórica de precipitaciones diarias máximas anuales (1938 – 2022). En el caso de la ciudad de Gijón, la función recomendada es la SQRT-ET max con el método de L-momentos por su buen ajuste a los valores reales registrados en las estaciones meteorológicas de la ciudad.
3. Obtención de las curvas I-D-F mediante la función de distribución SQRT-ET max con el método de L-momentos y cálculo de los valores de precipitaciones para los periodos de retorno de 10 años (recomendado), correspondiente con un valor de 77,45 mm; y 25 años (deseable), equivalente a un valor de 94,77

mm. El tiempo de duración de la lluvia debe tomarse como el tiempo de concentración de la cuenca drenada por el SUDS en cada proyecto. En este manual se toma como ejemplo el cálculo de esos valores para los tiempos de concentración de las dos grandes cuencas de drenaje de Gijón (Cuencas Este y Oeste), los cuales son muy superiores a los que se obtendrían en los casos de microcuencas de drenaje relacionadas con actuaciones a pequeña escala mediante SUDS. Con estos valores, se pueden calcular los caudales máximos esperables en la estructura hidráulica del SUDS y utilizados para el dimensionamiento de los elementos de rebose y conexión con la red de drenaje convencional.

Escenarios de modelización del comportamiento del SUDS.

1. Obtención de los hietogramas de diseño para periodos de retorno 10 años (recomendado) y 25 años (deseable), y tiempo de duración del evento de lluvia el de concentración de la cuenca drenada mediante SUDS, utilizando un método de construcción de hietogramas, usando al menos el método de los bloques alternos.
2. Modelización del comportamiento hidrológico de cada SUDS implementado en el proyecto durante un año completo (medio plazo o comportamiento en condiciones estándar dentro de la ciudad de Gijón), eligiendo éste como un año medio de la serie de precipitaciones. En el caso de la ciudad de Gijón, se recomienda utilizar la serie diezminutal del año 2019 para la zona afectada por los registros de la estación de Gijón Campus, eligiendo los registros del año 2021 para la zona afectada por la estación de Gijón Musel.
3. Modelización del funcionamiento de cada técnica SUDS en la eficiencia del tratamiento de los contaminantes presentes en la zona de estudio, tanto para un evento de lluvia de diseño determinado en el paso 1, como para el caso anual expuesto en la fase 2.
4. Modelización del comportamiento hidrológico del SUDS bajo las tres condiciones anteriores, repitiéndolas a lo largo de su vida útil, simulando las labores de mantenimiento del sistema.

Además de considerar las anteriores condiciones y escenarios de modelización ligados a la calidad y cantidad de aguas, se deberán de considerar los otros dos pilares de diseño de los SUDS relacionados con la amenidad (servicio a la ciudadanía / amenidad) y la biodiversidad descritos en el apartado 2.1.

3.3.1 Calidad: volumen de tratamiento de la calidad de aguas de la escorrentía

Los SUDS se dimensionan inicialmente para que sean capaces de tratar un volumen determinado de escorrentía superficial asociado a un percentil de las precipitaciones anuales y al fenómeno de "primer lavado", donde se concentra la mayor parte de la contaminación arrastrada durante un evento de lluvia. A través de este valor, se dimensionan las capas de cada técnica SUDS por las cuales se filtrará dicha escorrentía; así como el área, vista en planta, que ocupará el sistema. En el caso de la ciudad de Gijón, se recomienda el uso de la V_{91} correspondiente con un valor de 16 mm, tal y como se calculó en la Tabla 11. Dicho percentil va asociado con una lluvia de duración 24 horas, ya que los datos históricos disponibles se encuentran registrados en ese intervalo de tiempo.

Además, se recomienda que el vaciado de las tipologías SUDS que permitan la retención de escorrentía superficial pueda llevarse a cabo en un máximo de 48 horas, por razones de seguridad y de recuperación de la capacidad de tratamiento ante eventos que puedan darse de forma consecutiva, teniendo que diseñarse las distintas capas filtrantes para cumplir con dicho criterio mínimo de diseño. Este manual aporta, como novedad con respecto a otras guías o manuales nacionales e internacionales, un cálculo de la distancia temporal entre eventos de lluvia consecutivos utilizando los datos registrados en las estaciones meteorológicas de Gijón Musel y Gijón Campus, cada una de ellas representativa para una de las dos grandes cuencas de drenaje de la ciudad de Gijón.

Una vez definidas las características de la pluviometría de la zona de estudio que permiten definir el volumen de tratamiento para la calidad de aguas, se debe de continuar por la caracterización de los contaminantes presentes en la zona de estudio. Si no es posible llevar a cabo un estudio de detalle con una evaluación de riesgo asociada con dichos contaminantes; se recomienda, al menos, utilizar la aproximación denominada "método simple" del manual británico (Woods Ballards et al. 2015) y propuesto por Ellis et al. (2012). Esta metodología está basada en el tipo de usos del suelo y los contaminantes asociados a ellos. Este método ha sido recomendado y utilizado también en las guías básicas de diseño SUDS de Castellón (Perales Momparler et al. 2019) y Valencia (De la Fuente García et al. 2021). A partir de este método, se puede estudiar el tipo o tipos de SUDS necesarios para tratar dicha contaminación. Por lo tanto, es relevante tener un orden de magnitud sobre el potencial de tratamiento y de eficiencia aportado por cada tipo de SUDS y las posibles combinaciones existentes entre ellos en

cuanto al desarrollo de trenes de tratamiento para lograr una mayor eficacia en la reducción de contaminantes.

El método simple del CIRIA define tres tipos de categorías de contaminantes a estudiar: sólidos en suspensión totales, metales pesados e hidrocarburos. Cada tipología SUDS recibe un índice de mitigación para cada uno de ellos, asignándoles valores comprendidos entre 0 y 1 que se pueden asociar al porcentaje de eficacia de reducción de contaminantes de cada tipología SUDS y sus distintas variantes de diseño. Además, se definen los niveles de riesgo de contaminación en función del uso del suelo, asignándoles de la misma manera un valor entre 0 y 1 para cada uno de los tres contaminantes previamente descritos. Por tanto, para considerar que un SUDS, o tren de tratamiento formado por varios SUDS en línea, proporcionan un nivel de tratamiento adecuado, el valor de mitigación aportado por éstos debe de ser mayor que el índice de riesgo de los contaminantes presentes en la zona de estudio (Ec. 3). Este criterio deberá de aplicarse a cada uno de los tres tipos de contaminantes considerados en el método.

$$IMT_i \geq IRC_i \qquad \text{Ec. 3}$$

Donde:

- IMT_i = índice de mitigación total aportado por la tipología SUDS seleccionada para el contaminante i.
- IRC_i = índice de riesgo de contaminación para el contaminante i.

En el escenario de que el IMT_i no sea suficiente para cumplir con la condición expresada en la Ec. 3, deberá de introducirse un segundo SUDS que permita alcanzar el nivel de tratamiento necesario. En ese caso, la ecuación de cálculo del IMT_i quedaría de la siguiente manera (Ec. 4).

$$IMT_i = IM_{SUDS1} + 0{,}5 \times IM_{SUDS2} \qquad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- IM_{SUDS1} = índice de mitigación aportado por la primera tipología SUDS en el tren de tratamiento (denominado SUDS primario) para el contaminante i.
- IM_{SUDS2} = índice de mitigación aportado por la segunda tipología SUDS en el tren de tratamiento (denominado SUDS secundario) para el contaminante i.

Además, pueden añadirse más SUDS en el tren de tratamiento, aplicando el mismo criterio a partir del SUDS secundario. Los valores propuestos para calcular el índice de mitigación se presentan a continuación en la Tabla 29 para cada tipo de contaminante.

Dichos valores tomaron como base aquellos del manual británico, siendo modificados en base a la literatura científica asociada con el potencial de tratamiento de cada tipología SUDS para los contaminantes propuestos por este método, lo que otorga valores diferenciales con respecto a los propuestos en el CIRIA y los utilizados en Castellón y Valencia. Cabe tener en cuenta que las tipologías SUDS definidas en este manual no coinciden con aquellas propuestas en los anteriores documentos técnicos, por lo que se recomienda seguir la actual propuesta para la ciudad de Gijón.

Tabla 29. Valores propuestos del índice de mitigación para los contaminantes propuestos según la tipología SUDS y sus variantes de diseño. Fuente: adaptado de Woods Ballard et al. (2015) y Fardel et al. (2019)

Tipo de componente SUDS	Variante de la tipología SUDS	Sólidos en suspensión totales	Metales pesados	Hidrocarburos
Áreas de biorretención	Estándar	0,8	0,8	0,8
	Alcorques inundables	0,6	0,5	0,5
	Parterres inundables	0,6	0,6	0,6
	Jardineras elevadas	0,6	0,5	0,6
	Cunetas de biorretención	0,6	0,5	0,5
	Sistemas de biorretención anaeróbicos	0,7	0,7	0,7
Cunetas vegetadas	Secas	0,5	0,6	0,6
	Húmedas	0,5	0,6	0,6
Cubiertas vegetadas	Extensivas	0,5	0,5	0,5
	Intensivas	0,5	0,5	0,5
	Azules	0,4	0,4	0,4
Firmes permeables	Pavimento continuo	0,8	0,6	0,8
	Pavimento discontinuo	0,8	0,6	0,7
Sistemas de infiltración	Balsa de infiltración	0,4	0,4	0,4
	Zanjas de infiltración	0,35	0,35	0,35
	Pozos de infiltración	0,4	0,4	0,4
Estanques	Secos	0,7	0,7	0,5
	Húmedos	0,75	0,75	0,65
Sistemas de filtración lineales	Drenes filtrantes	0,4	0,4	0,5
	Franjas filtrantes	0,4	0,4	0,4
Humedales	Naturales	0,8	0,8	0,8
	Artificiales	0,8	0,8	0,8
Tanques de almacenamiento	Estos sistemas dependen de la efectividad en el tratamiento de las técnicas complementarias incluidas en su diseño. Se recomienda utilizar los valores de reducción de contaminante aportados por el distribuidor.			

Posteriormente, se definen los niveles de riesgo de contaminación en función de cada contaminante propuesto y del uso del suelo indicado. Se utiliza como base la tabla propuesta en el manual británico (Woods Ballard et al. 2015), modificándola en base a la experiencia desarrollada en la elaboración del presente manual (Suárez-Inclán et al. 2022). Como puede apreciarse en la Tabla 30

Tabla 30. Valores propuestos del índice de riesgo para los contaminantes propuestos según el tipo de uso del suelo. Fuente: adaptado de Woods Ballard et al. (2015) y de Suárez-Inclán et al. (2022).

Tipo de uso de suelo	Nivel de riesgo contaminante	Sólidos en suspensión totales	Metales pesados	Hidrocarburos
Carreteras de alta capacidad / intensidad de tráfico Polígonos industriales Áreas de actividades mineras abandonadas	Muy alto	0,8	0,9	0,9
Aparcamientos de alta movilidad de vehículos diarios Centros comerciales, almacenes y zonas de carga Viales y carreteras de intensidad media de tráfico	Alto	0,7	0,6	0,7
Caminos de acceso y viales de baja intensidad de tráfico Aparcamientos en áreas residenciales Aparcamientos de baja movilidad de vehículos (< 300 veh/día) Áreas impermeables destinadas a actividades recreativas	Medio	0,5	0,4	0,4
Cubiertas de edificaciones residenciales, industriales y/o comerciales bajo condiciones de ambientales de alta contaminación atmosférica	Bajo	0,3	0,2-0,8	0,05
Cubiertas de edificaciones residenciales en ambientes de baja contaminación atmosférica	Muy bajo	0,2	0,2	0,05

Sin embargo, la Tabla 30 no especifica nada sobre contaminantes de importancia como los nutrientes, las bacterias y los patógenos que pueden estar presentes en algunas áreas de la ciudad. Es por ello por lo que se recomienda el desarrollo de otra tabla especializada que los considere. Se recomienda que dicha tabla se elabore de acuerdo con datos locales asociados a distintos usos del suelo.

3.3.2 Cantidad: caudales pico de la escorrentía superficial

Las distintas tipologías SUDS deben de ser capaces de gestionar los caudales pico de la escorrentía superficial para los periodos de retorno estipulados en aquellos lugares donde se implementan. En el caso de Gijón, no existen periodos de retorno obligatorios o recomendados en las normas urbanísticas municipales o en la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC) asociados a vertidos directos a los cauces naturales o indirectos mediante infiltración al terreno.

No obstante, el Real Decreto 399/2013, de 7 de junio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (Real Decreto-ley 399/2013), en su artículo 58 sobre "Drenaje en las nuevas áreas a urbanizar y de las vías de comunicación", y más concretamente en su punto 1, hace mención a la obligatoriedad de implementar SUDS en "… nuevas urbanizaciones, polígonos industriales, desarrollos urbanísticos e infraestructuras lineales que puedan producir alteraciones en el drenaje de la cuenca o cuencas interceptadas …". En este mismo punto, la norma indica que la implementación de los SUDS debe garantizar que "… el eventual aumento de escorrentía respecto del valor correspondiente a la situación preexistente puede ser compensado o es irrelevante.". Esto quiere decir que los SUDS implementados, en combinación con el drenaje convencional en la zona de estudio, debieran de ser capaces de gestionar el incremento de la escorrentía superficial generado por la obra nueva con respecto al escenario hidrológico preexistente en la zona de estudio.

La norma no indica ningún periodo de retorno asociado a dicho escenario hidrológico preexistente en relación a hacer las comprobaciones de cálculo, por lo que se sugiere verificar que el caudal pico de escorrentía de la nueva obra en el punto de desagüe de la cuenca de estudio no sea mayor que el preexistente para los siguientes periodos de retorno: 5, 10 y 25 años. Esta asunción implica que los SUDS incluidos en obra nueva debieran de ser capaces de gestionar un caudal pico de escorrentía superficial equivalente a un periodo de retorno máximo de 25 años, siendo éste el asociado habitualmente a grandes colectores de saneamiento en zonas urbanas (Puertas et al. 2008). Adicionalmente, el Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro (Real Decreto-ley 1/2016), en su artículo 32 sobre "Condiciones para admitir el

deterioro temporal del estado de las masas de agua" en su punto 1 referente a "… las condiciones debidas a causas naturales o de fuerza mayor que sean excepcionales o no hayan podido preverse razonablemente en las que puede admitirse el deterioro temporal del estado de una o varias masas de agua …" define como graves inundaciones a las correspondientes a la avenida del periodo de retorno de 25 años. Por tanto, parece razonable hacer una comprobación para un escenario extremo como el que define la norma y comprobar que no se incrementa el caudal punta con la nueva obra, introduciendo en caso contrario un riesgo potencial de empeoramiento del escenario de graves inundaciones con componente de contaminación a las masas de agua superficiales en el área de estudio. Este punto adquiere gran calado al ser Gijón una ciudad costera con la necesidad de proteger sus masas de agua superficiales.

Finalmente, se estudiaron los periodos de retorno recomendados en otras ciudades de España en sus respectivas guías de diseño SUDS, tanto para los valores de periodos de retorno y duración del evento de lluvia, como para los volúmenes de tratamiento de la calidad de aguas, recogiéndolos en la Tabla 31.

Tabla 31. Periodos de retorno y tiempos de duración del evento de lluvia de diseño, así como volúmenes de tratamiento recomendados para el dimensionamiento de SUDS en las guías de diseño españolas.

Ciudad	Tr (años)	T (minutos)	Volumen de tratamiento (percentil)	Valor del volumen de tratamiento (mm)
Madrid	10	20	V_{80}	15
Castellón	15	60	V_{80}-V_{90}*(1)	14 - 24
Barcelona	10	t_c	V_{80}	15
Valencia	15 - 25	t_c	V_{60}-V_{95}*(2)	8 - 60

*(1) V_{80} como limitante de volumen a infiltrar en 48 horas y V_{90} como limitante para la lluvia tratar.
*(2) En función del tipo de edificación y del espacio urbano sobre el que se interviene.

En el caso de la ciudad de Gijón, dada su pluviometría y las condiciones variables en cuanto a usos del suelo y posible impacto, se recomienda el uso de periodos de retorno dentro del rango 10 – 25 años, en función del riesgo asociado a la zona de estudio, para un tiempo de duración del evento de lluvia ligado al tiempo de concentración de la cuenca drenada por cada SUDS. Este manual aporta como ejemplo de cálculo los hietogramas de diseño para los periodos de retorno de 10 (valor exigible) y 25 años (valor recomendado) y duración del evento de lluvia el del tiempo de concentración de las dos grandes cuencas de la ciudad (Este y Oeste). En el caso de obra de urbanización nueva, se propone que se mantengan las condiciones hidrológicas preexistentes en la zona de estudio asociadas con el caudal pico en el punto de desagüe de la cuenca de estudio

drenada por SUDS para los periodos de retorno anteriormente mencionados, y una duración del evento de lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca de estudio.

En el escenario de que la obra fuese de rehabilitación de una zona ya construida o de un área urbana consolidada, se recomienda que el periodo de retorno a utilizar para la obtención del caudal pico sea, como mínimo, el mismo que el utilizado en el dimensionamiento del saneamiento del área de estudio al cual se conectaría el rebose del SUDS, de forma que éste pueda trabajar en la línea con la infraestructura ya existente. Donde pudiese ser de aplicación, se recomienda mantener un periodo de retorno de 10 (valor exigible) y 25 años (valor recomendado) y duración del evento de lluvia el del tiempo de concentración el de la zona de estudio drenada por el SUDS.

Por último, se recomienda hacer un paso más dentro del dimensionamiento de los SUDS, consistente en la modelización del comportamiento de éstos frente a una lluvia de diseño obtenida a partir de las curvas I-D-F de la serie histórica y los hietogramas de diseño con periodos de retorno 10 y 25 años, y duración de lluvia la del tiempo de concentración de la cuenca drenada por el SUDS. Se aportan como ejemplo los calculados para los tiempos de concentración de las dos grandes cuencas de la ciudad (8.2.3).

Se recomienda utilizar el método racional para la obtención de los caudales pico en los SUDS, ya que es un método adecuado para cuencas de drenaje de pequeño tamaño ($A < 50\ km^2$) como aquellas involucradas en el diseño de SUDS. Por tanto, este manual recomienda el procedimiento indicado en la norma 5.2-IC de drenaje superficial (Ministerio de Fomento 2018), en base al método de Temez modificado, para la determinación de los caudales pico, el cual se resume a continuación.

04

Capítulo 4 – Recomendaciones de diseño, construcción y mantenimiento



4.1 Áreas de biorretención

4.1.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Las áreas de biorretención, también conocidas como celdas o sistemas de biorretención, son una de las técnicas SUDS más versátiles, dada las posibilidades de diseño que ofrecen y su alta adaptación a ambientes urbanos variables con distintos tipos y usos de suelo, su alta capacidad de tratamiento de los contaminantes presentes en la escorrentía superficial y su atractivo paisajístico. Las áreas de biorretención se definen comúnmente como depresiones superficiales ajardinadas, especialmente proyectadas para reducir los ratios y volúmenes de escorrentía superficial, tratando los contaminantes presentes en ella a través de mecanismos y procesos naturales que se dan en las plantas, entre los que se incluyen absorción, acción microbiana, adsorción, evapotranspiración, filtración, infiltración y sedimentación.

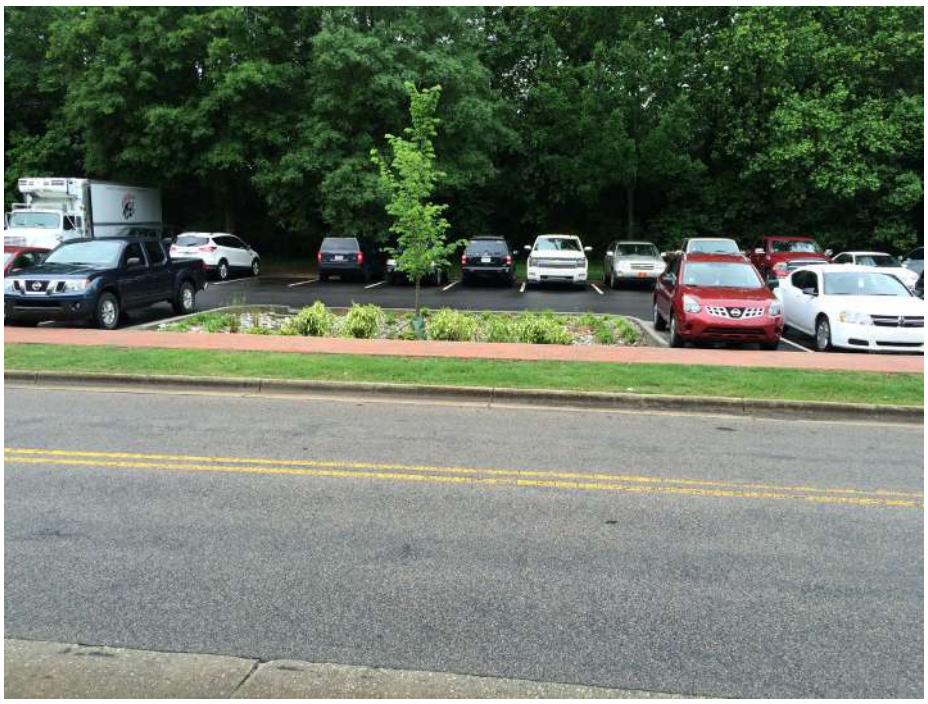


Figura 25. Área de biorretención del tipo jardín de lluvia o parterre inundable gestionando la escorrentía procedente de un aparcamiento en el Campus de la North Carolina State University. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Una de las principales aplicaciones de las áreas de biorretención son las zonas urbanas consolidadas, permitiendo renaturalizarlas, incrementando su biodiversidad y el hábitat de especies locales, reduciendo la temperatura de las superficies urbanas a través de la evapotranspiración y la disminución de las superficies duras. Estas técnicas son ideales para su implementación en el tratamiento de la escorrentía procedente de cubiertas de edificaciones dirigidas mediante bajantes hacia esta técnica SUDS, así como de la escorrentía superficial procedente de superficies impermeables adyacentes a cota de

suelo. Además, permiten un trabajo conjunto con otros SUDS a través de la utilización de tuberías de conexión que dirigen el flujo de escorrentía previamente captado mediante otro sistema hacia el área de biorretención, o de ésta hacia un segundo SUDS, conformando un tren de tratamiento (ver

Tabla 7 para más información sobre conexiones y trenes de tratamiento de SUDS).

En cuanto a su funcionamiento, las áreas de biorretención están diseñadas para retener una lámina de agua superficial temporalmente cuando se produce un evento de lluvia. Su objetivo fundamental es el de favorecer los procesos de filtración y tratamiento biológicos que se dan a través de las distintas especies vegetales y capas de filtración ejecutadas mediante suelos técnicos y/o materiales granulares especialmente diseñados para las necesidades de tratamiento de contaminantes de cada ubicación. Dicho tratamiento viene asociado con la lámina de agua que se calcula para la lluvia de diseño del tratamiento de la calidad de aguas, la cual está especificada para la ciudad de Gijón en 16 mm (ver Tabla 11y Figura 12), siendo definida como el volumen de agua encerrado entre la superficie de las especies vegetales empleadas (plantas) y el elemento de rebose del sistema, además del volumen disponible en las capas inferiores o filtrantes del área de biorretención. A este volumen se le denomina volumen de diseño o volumen de tratamiento de la calidad de aguas y se asocia con el percentil 91 de la serie histórica de precipitaciones de la ciudad de Gijón. La escorrentía, una vez filtrada a lo largo de las distintas capas del área de biorretención, pasa a una tubería-dren perforada y conectada aguas abajo con la red de drenaje convencional o, en caso de que las condiciones lo permitan, se infiltraría la escorrentía parcial o totalmente al terreno, llegando en el último caso de infiltración total a que dicho dren inferior no fuese necesario. Este último escenario descrito con anterioridad supondría una desconexión total del volumen de escorrentía tratada con respecto a la red de drenaje convencional, requiriendo una autorización de vertido por parte de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico. Cabe mencionar que parte del volumen tratado se eliminará del sistema mediante los procesos de evapotranspiración presentes en este SUDS.

Por tanto, el principal beneficio hidráulico que proporcionan las áreas de biorretención es el de la interceptación de la escorrentía, pudiendo destacar también el de atenuación de volumen en función de las condiciones de diseño (ej.: infiltración al suelo subyacente, drenaje diferido al sistema convencional, mantenimiento de lámina superficial de agua, etc.). Por otra parte, se pueden incluir elementos constructivos del tipo represa para reducir la velocidad del flujo de escorrentía superficial a lo largo de su eje longitudinal

de avance del flujo de escorrentía, facilitando el aumento del tiempo de estancia de la escorrentía dentro del área de biorretención.



Figura 26. Área de biorretención en el Campus de la North Carolina State University, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

4.1.2 Recomendaciones de diseño

Las áreas de biorretención presentan una serie de variantes de diseño, como se expondrá más adelante en el punto 4.1.3. Sin embargo, los elementos principales de un área de biorretención se mantienen relativamente constantes en sus diseños estándar. Así, en el caso de áreas naturales de las ciudades, se pueden encontrar diseños como el que se presenta en la Figura 27.

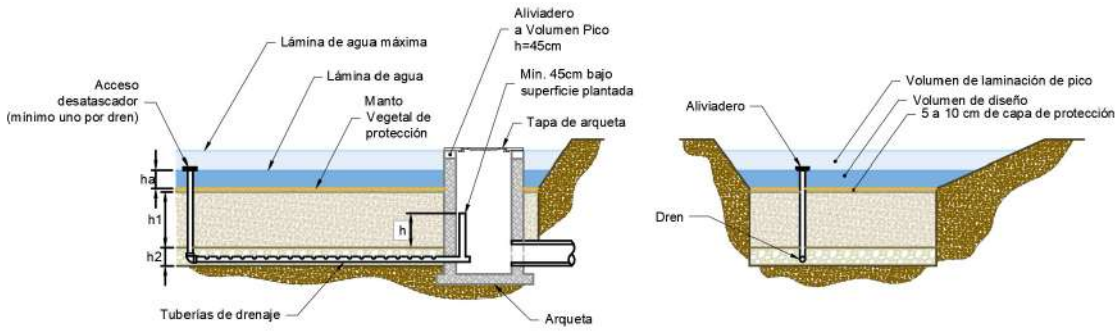


Figura 27. Ejemplo de una sección transversal de un área de biorretención estándar, mostrando sus distintos elementos longitudinalmente (imagen izquierda) y transversalmente (imagen derecha). Fuente de las imágenes: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

Como puede apreciarse en la Figura 27, la altura de lámina de agua superficial temporal, se propone en torno a los 30 - 45 cm, medida entre la superficie de la capa de vegetación y el elemento de rebose del sistema. Otro elemento que se puede introducir como variante del diseño general es la inclusión de un codo invertido con su correspondiente tubería vertical, lo cual permitiría un almacenamiento interno temporal del agua filtrada a través del sistema, incrementando su capacidad de atenuación.

En aquellos casos en que se diseñen áreas de biorretención en entornos urbanos con zonas impermeables y aceras, se propone la siguiente sección transversal tipo que pueda servir como punto de partida de diseños de áreas de biorretención (Figura 28).

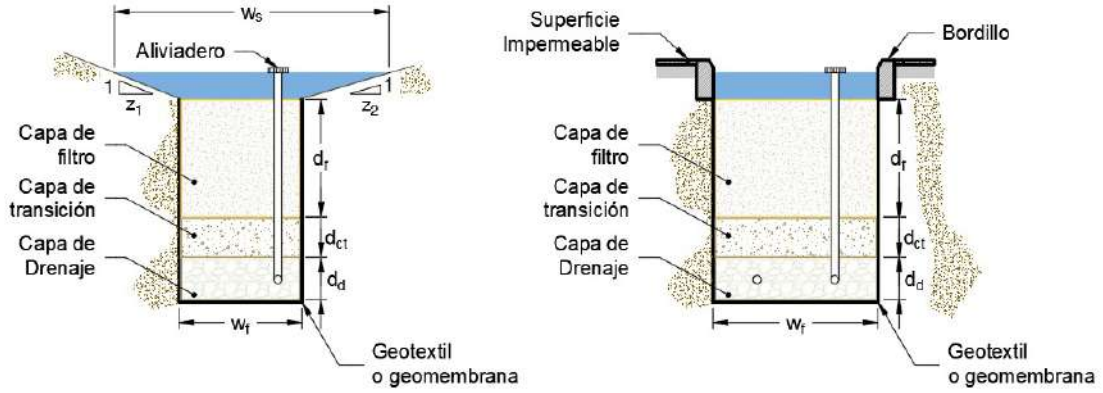


Figura 28. Sección tipo de un área de biorretención propuesta, mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

La sección anterior admite todo tipo de variaciones en su diseño, pudiendo convertirse en un parterre o jardín inundable si se le introducen elementos limitantes perimetrales del tipo bordillo, lo cual implicaría hacer los valores de z_1 y z_2 de la Figura 28 igual a 0. Por consiguiente, las capas estándar de un área de biorretención y sus funciones principales son las siguientes:

- Capa superficial vegetal. La capa de cobertura vegetal se compone de las especies de plantas elegidas para realizar las funciones de absorción y tratamiento fisicoquímico de los contaminantes presentes en la escorrentía superficial. Además de este criterio, se debe de tener en cuenta el paisajístico, primando la selección de especies locales propuestas por especialistas en la materia. Dichas especies vegetales deberán de ser capaces de hacer frente a condiciones de presencia y ausencia de agua prolongadas en el tiempo. En el caso de Gijón, dada las características pluviométricas de la ciudad expuestas en el punto 3.2, lo más

probable es encontrarse con situaciones de presencia de agua y humedad prolongadas a lo largo del tiempo.

- Capa de filtro o medio filtrante. Esta capa está basada principalmente en una mezcla entre materiales de naturaleza arenosa, con otros de materia orgánica, además de nutrientes de liberación lenta que permitan mantener la vegetación superficial de forma adecuada en el tiempo. Esta capa suele recibir el nombre de suelo técnico y es de gran importancia al ser habitualmente la de mayor espesor y aquella en la que se dan los fenómenos de filtración de los contaminantes. Por ello, es clave mantener un nivel mínimo de permeabilidad, de forma que el agua de escorrentía pueda evacuarse en un periodo de tiempo determinado. Los espesores de esta capa varían en función de la tipología de área de biorretención empleada, pudiendo ir desde los 75 a los 100 cm en los casos de áreas de biorretención de un tamaño significativo, presentando espesores menores que pueden bajar hasta un mínimo de 40 cm aquellos casos de áreas de biorretención de pequeño tamaño, como pudieran ser las jardineras elevadas o algunos parterres o jardines inundables de pequeño tamaño situados en aceras.
- Capa de transición. La principal función de la capa de transición es la de servir de capa se separación entre la capa de filtro y la capa de drenaje o sub-base del SUDS, de forma que se evite la migración de materiales (especialmente finos) desde la capa de filtro hacia la capa de drenaje. Esta capa de separación puede estar compuesta por áridos; o bien, ejecutarse mediante un geotextil con un adecuado diseño de apertura de poros y permeabilidad en comparación con los valores de la capa inmediatamente superior (medio filtrante). Esta capa también actúa como capa de filtro, pudiendo aportar capacidad de reducción de ciertos contaminantes mediante la generación de una capa de actividad microbiana en los casos en que se use un geotextil como elemento de filtro.
- Capa de drenaje. Se trata de la capa inferior del sistema, también conocida en ocasiones como capa de sub-base, y cuyo objetivo es el de captar el agua de escorrentía procedente de las capas superiores y dirigirla hacia los elementos de vertido convenientemente diseñados en el SUDS para tal efecto. Esta capa está compuesta por áridos con la suficiente porosidad (mayor que la de las capas superiores) o por celdas reticulares de drenaje que incrementen el volumen disponible para albergar el flujo de escorrentía filtrado por el sistema a través de las capas superiores. En el caso de que el área de biorretención se haya diseñado con el objetivo de infiltrar la escorrentía tratada al terreno, esta capa servirá como

filtro final, dirigiendo el flujo de escorrentía hacia el terreno, y siendo diseñada teniendo en cuenta la permeabilidad del suelo. En este último caso, sería el terreno el que actuaría como elemento limitante para la determinación del tiempo de vaciado del sistema en el caso de ser su permeabilidad inferior a la de la capa de drenaje.

Además de las capas anteriormente expuestas, se deben añadir los siguientes elementos constructivos complementarios al diseño con sus respectivas funciones asociadas también con la operación, mantenimiento y monitorización del sistema:

- Elemento de entrada de la escorrentía. Se trata de una o varias áreas especialmente diseñadas para facilitar la entrada del flujo de escorrentía superficial al sistema de biorretención diseñado. Habitualmente llevan ligadas una o varias zonas de pretratamiento de la escorrentía superficial convenientemente diseñadas para disminuir la velocidad del flujo hacia valores admisibles, los cuales han sido habitualmente determinados por debajo de los 0,5 m/s para los periodos de retorno de diseño (mínimo de T_r= 10, recomendado para la ciudad de Gijón como puede verse en 3.3.2), pudiendo aceptarse un límite superior de 1,5 m/s para aquellos eventos de lluvia de periodo de retorno de 100 años. Además de la función que tienen relativa a la reducción de la velocidad del flujo para evitar la erosión superficial de la capa vegetal, permiten desarrollar pequeñas áreas dentro del SUDS en las que realizar un primer tratamiento de eliminación de los contaminantes presentes en la escorrentía.
- Elemento o estructura de rebose. Elemento constructivo que permite el control de la altura de la lámina de escorrentía superficial presente en la capa superficial en escenarios de eventos de precipitación de gran intensidad por encima de la lluvia de diseño (16,1 mm). Esta estructura permite baipasear el flujo de escorrentía fuera del sistema, protegiendo sus funciones hidrológicas y biológicas de atenuación y tratamiento, respectivamente. Se sitúa a un máximo de 30 cm sobre la superficie vegetal del sistema, pudiendo disponerse a alturas inferiores (15 cm) en función de la variante de diseño. En general, se recomienda su implementación frente al elemento de entrada de la escorrentía para facilitar la entrada de la escorrentía excedente hacia el sistema de rebose en eventos de lluvia superiores a la lluvia de diseño para la ciudad de Gijón.

- Elementos de desagüe del sistema. Existen varios componentes que permiten evacuar el agua de escorrentía tratada hacia el exterior del sistema, ya sea hacia el terreno subyacente o hacia la red de drenaje convencional.
    - *Tubería-dren*. Tubería perforada de fondo embebida dentro de la capa de drenaje o sub-base, y diseñada para evacuar el agua tratada por el sistema, direccionándola hacia un elemento de conexión tipo arqueta, donde este flujo puede conectarse con el sistema de drenaje convencional. En algunos casos, suele llevar asociada la implementación de un *codo invertido*, que permitiría aumentar el tiempo de permanencia del flujo en la capa inferior del sistema y una parte de la capa de filtro (siempre manteniendo una distancia mínima con respecto a la superficie de al menos 30 - 45 cm). Se trata de un elemento constructivo de diseño que trabaja en conjunción con la tubería-dren de fondo para lograr una profundidad determinada de almacenamiento interior dentro de la capa de filtro del sistema cuando se diseñe el área de biorretención para aumentar el tiempo de estancia de la escorrentía dentro del sistema en condiciones en las que la permeabilidad del terreno subyacente al sistema sea superior a 10^{-6} m/s y el sistema se diseñe para infiltrar al terreno.
    - *Área de vertido*. Zona de tratamiento final en caso de vertido a cauce natural, la cual deberá de definirse en función del tratamiento proporcionado y de los valores máximos de vertido permitidos por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico.
    - *Conexión con otro SUDS*. Tubería de conexión entre el área de biorretención y un segundo SUDS que permitiría aumentar las posibilidades de tratamiento tal y como se describe en el punto 3.3.1 y en la Tabla 29.
- Elemento de limpieza periódica de la tubería-dren inferior. Tubería vertical diseñada para poder acceder a la tubería-dren, en caso de que esta última haya sido incluida en el diseño, con el objetivo de limpiar la tubería-dren de fondo para garantizar las condiciones de diseño para la evacuación del flujo de escorrentía tratado por el sistema, evitando posibles bloqueos de este.
- Área de talud y desmonte exterior. En los casos de diseño de áreas de biorretención donde se incluya un talud lateral, éste estará limitado a un valor máximo de 1:3 (V:H), comenzando en la superficie vegetal del sistema. En ocasiones, existen recomendaciones de manuales internacionales que aceptan

subir a una relación de 1:4, siempre que esto esté adecuadamente justificado en el diseño. En aquellos escenarios de diseño donde se implemente el área de biorretención en grandes superficies abiertas, este talud puede ser coronado por un área de desmonte exterior, la cual se recomienda diseñar con una anchura mínima de 3 m por razones asociadas con el uso de maquinaria de mantenimiento de grandes dimensiones. Esta área de desmonte exterior es un área perimetral a la superficie del área de biorretención que actúa, además, como amortiguamiento inicial de la escorrentía superficial en aquellos casos en que ésta ingrese al sistema por todo su perímetro exterior.

Dependiendo de los objetivos funcionales que se persigan en el diseño del área de biorretención, la sección transversal de ésta puede estar envuelta perimetralmente por un geotextil o geomembrana que permita o no la infiltración al terreno y que limite los movimientos horizontales o verticales de la escorrentía dentro del sistema, según corresponda.

Las recomendaciones generales y los criterios mínimos de diseño para el dimensionamiento de un área de biorretención se presentan a continuación:

- Separación con el nivel freático. La distancia mínima recomendada entre la capa inferior del área de biorretención con respecto al nivel freático deberá de ser de al menos 1 m, pudiendo reducirse a un rango entre 0,5 y 1 m en aquellos casos en que el proyecto aporte un estudio hidrogeológico de detalle que demuestre que no afecta al correcto funcionamiento del sistema, además de aportar datos / modelos en que se demuestre que el nivel freático regrese a una distancia mínima de 1 m transcurridas 48 horas después del final de un evento de lluvia.
- Nivel máximo de lámina de agua superficial. El nivel máximo de la lámina superficial de agua sobre la superficie de plantación se situaría dentro del rango 15 – 30 cm. En los casos en que toda la superficie del sistema vista en planta se dedique exclusivamente al área de biorretención (caso en que no haya taludes laterales como suele ocurrir en los parterres inundables; Es decir, que los valores de z_1 y z_2 de la Figura 28 sean 0), se sugiere reducir el valor máximo del rango hasta un máximo de unos 20 cm.
- Volumen pico de atenuación. En el supuesto de que el área de biorretención sea diseñada con el objetivo de atenuar el volumen pico de lluvia mediante su almacenamiento temporal, puede incluirse una estructura de rebose adicional a la anteriormente descrita asociada con el volumen de tratamiento del primer

lavado, que permita la gestión de otros 30 cm más de altura de lámina de agua superficial sobre la superficie vegetal. No obstante, se recomienda que la estructura de rebose adicional comience a un máximo de 45 cm sobre la superficie de la vegetación, permitiendo la correcta evacuación del flujo de escorrentía y evitando posibles fallos hidráulicos del sistema que conlleven su inundación. En este caso no existe una lluvia de diseño asociada específicamente al dimensionamiento de la estructura, siendo esta última elegida por el / la proyectista, teniendo en cuenta las ecuaciones asociadas con el dimensionamiento de estas estructuras de tipo vertedero de pluviales.

- Vaciado del sistema. Se recomienda que, una vez finalizado el evento de lluvia, el volumen de agua albergada en el interior del área de biorretención se evacúe en menos de 48 horas, permitiendo la restauración de la capacidad hidráulica de todas las capas del SUDS. De esta manera, se mantiene una correcta oxigenación de la biota del suelo y de la vegetación presente en el sistema. Mantener esta capacidad de recuperación del área de biorretención es clave para conservar la general de este sistema biológico y para mantener unas condiciones adecuadas del mismo en sus funciones de biodegradación y retención de contaminantes presentes en la escorrentía, así como su funcionalidad hidrológica.
- Tubería-dren inferior o de fondo. Este elemento de evacuación del flujo de escorrentía tratado por el sistema no sería necesario en aquellos casos en los que se infiltre al terreno y éste presente una permeabilidad superior a 10^{-6} m/s; ya que, en ese escenario, la escorrentía tratada en el sistema podría infiltrarse sin poner en riesgo el cumplimiento de las condiciones de vaciado del sistema tras el evento de lluvia previamente expuestas. En aquellos casos en que se diseñe un codo invertido en conjunción con la tubería-dren por razones de aumento de la capacidad de almacenamiento en la capa de filtro, éste se diseñará para una separación mínima recomendada entre la parte superior de este elemento y la superficie inferior de la capa de la vegetación de 45 cm. El diámetro mínimo de la tubería debe de ser de 110 mm para evitar la aparición rápida de problemas de colmatación.
- Espesor de la capa o medio filtrantes. La capa filtrante tendrá espesores variables en función del tipo de vegetación superficial que soporte.
    - *Árboles y arbustos*. El espesor mínimo recomendable sería de 1 m, permitiendo el espacio suficiente para el crecimiento de las raíces.

- *Resto de especies vegetales utilizadas en áreas de biorretención*. Dentro de este tipo se encuentran las plantas herbáceas, ornamentales y césped, entre otros. En los casos en que no se disponga un elemento que permita la creación de una profundidad de almacenamiento interno dentro de la capa filtrante como el codo invertido, el espesor mínimo deberá de ser de al menos 60 cm; mientras que, en el caso contrario, se recomienda un espesor mínimo de 75 cm (presencia de codo invertido).

- Selección de especies vegetales. Se debe priorizar el uso de especies autóctonas que sean capaces de soportar escenarios de inundación (lámina superficial de agua temporal generada en eventos de lluvia), saturación de las capas inferiores de suelo hasta un máximo de 96 horas y periodos de sequía (periodos secos alargados en el tiempo entre eventos de lluvia). Guías nacionales e internacionales de SUDS proponen el uso de plantas de hoja perenne para mantener su valor paisajístico a lo largo del año con una densidad aproximada de 6-10 plantas/m^2. Otros manuales internacionales sugieren que se alcance al menos un 75% de la cobertura vegetal tras 5 años en los casos en que la vegetación sea distinta al césped. En el caso de usarse césped, éste deberá de tener raíces profundas. También se recomienda utilizar en el diseño un mínimo de 3 tipos de especies vegetales para evitar que la enfermedad de alguna de ellas pudiera colapsar el funcionamiento biológico del sistema en su vertiente de tratamiento de la calidad de aguas. Por último, se recomienda que se seleccionen especies vegetales que no requieran el uso de pesticidas y químicos para su mantenimiento, puesto que éstos pudieran ser liberados y arrastrados por la escorrentía hacia el sistema de drenaje aguas abajo o el terreno subyacente en el caso de infiltración al mismo, comprometiendo la calidad y eficiencia del tratamiento aportado por el SUDS.

- Infiltración al terreno subyacente. En el caso de que se den las condiciones adecuadas para infiltrar al terreno subyacente, incluyendo la separación mínima con el nivel freático y la distancia suficiente con las edificaciones contiguas, respetando siempre las distancias mínimas recomendadas en el CTE; el suelo deberá de cumplir, además, la condición de tener una permeabilidad mínima de 10^{-6} m/s para permitir el rápido vaciado del sistema. Se recomienda incluir un estudio geotécnico que muestre los posibles movimientos de la escorrentía dentro del terreno (horizontales y verticales), además de proporcionar la permeabilidad de este.

- Superficie ocupada por el área de biorretención. Como norma general de diseño, se suele diseñar el área de biorretención ocupando una superficie dentro del rango de 2-4% del área total de la cuenca drenada. Adicionalmente, se recomienda que no se superen áreas a drenar de 0,8 ha. Cabe mencionar que el área ocupada por el área de biorretención no tiene por qué coincidir con el área bajo la cual se encuentra la capa del medio filtrante. Solamente coincidirían en el caso de que el talud de diseño en alzado fuese vertical como puede ocurrir en algunos diseños de parterres inundables y en las jardineras elevadas (casos en que z_1 y z_2 en la Figura 28 sean 0). En los casos más habituales, esta situación no se dará, diseñándose taludes de 1:3 (V:H) como los que pueden apreciarse en la Figura 28. Por tanto, la superficie ocupada por el área de biorretención no sería la misma que la utilizada para calcular el volumen del medio filtrante.
- Diseño geométrico del sistema. Los límites recomendados para el diseño geométrico vienen dados fundamentalmente por los procesos constructivos, de forma que para que éstos sean lo más efectivos posibles, se recomienda que la anchura del área de biorretención sea mayor de 0,6 m. Esta anchura de la capa de filtro determinaría, a su vez, la anchura de la superficie de ocupación del área de biorretención vista en planta a 1,8 m, obtenido para un talud máximo de 1:3 (V:H). Adicionalmente, la longitud del área de biorretención debería de ser inferior a 20 m para que una excavadora convencional con un alcance de 10 m pueda acceder desde ambos lados de esta. En aquellos casos en que solamente haya acceso desde un lado, la longitud debería de limitarse a los 10 m. Estas recomendaciones aplican fundamentalmente en aquellos casos de implementación de áreas de biorretención en calles y edificaciones próximas. En aquellos casos en los que se disponga de grandes espacios de implementación, que drenen superficies hasta un máximo de 0,8 ha, se recomienda que se limite la longitud a 40 m de forma que se fomente un acceso de la escorrentía superficial al sistema lo más distribuida posible.

Además de los anteriores criterios de diseño, se tienen que considerar dos estados o escenarios fundamentales de diseño que deben cumplirse simultáneamente en un área de biorretención, y a partir de los cuales se puede dimensionar la superficie ocupada del área de biorretención (S_b), así como el resto de los componentes del sistema:

- Capacidad de gestionar el volumen de tratamiento de la calidad de escorrentía superficial (V_t).

- Tiempo de vaciado tras evento de lluvia requerido para el correcto funcionamiento del sistema (t_v).

El primero de estos escenarios, asociado con el volumen de tratamiento de la calidad de aguas viene definido por los siguientes parámetros:

- Volumen de tratamiento (V_t). Volumen de diseño asociado al volumen de tratamiento del evento del primer lavado para una lluvia de diseño equivalente al percentil 91 en la ciudad de Gijón según la serie histórica de precipitaciones de la ciudad (V_{91}).
- Precipitación de diseño (P_D). Valor de la lluvia de diseño calculada para la ciudad de Gijón. En el caso de este manual, se ha calculado la lluvia de diseño para un volumen de tratamiento en el percentil del 91 (V_{91}), corresponde a 16,1 mm de altura de lluvia.
- Superficie drenada (S_D). Área tributaria que drena hacia el área de biorretención medida en m^2.
- Coeficiente de escorrentía (C). Valor del coeficiente de escorrentía de la superficie drenada estimado a partir de la norma 5.2-IC de drenaje superficial.

En base a los parámetros anteriores, el volumen de diseño al que debe de hacer frente el área de biorretención se define mediante la siguiente expresión en la Ec. 5:

$$V_t = P_D \times S_D \times C \qquad \text{Ec. 5}$$

Una vez establecido dicho volumen de tratamiento mínimo para la calidad de aguas, dependiente de las características de la cuenca a drenar, deberá de calcularse el área de biorretención proporcionado por el sistema (V_{BIO}). Ésta es dependiente a su vez de sus características geométricas y de las propiedades de los materiales que la componen, los cuales deben de hacer frente al escenario de diseño (Ec. 6). Debe cumplirse que el V_{BIO} sea, al menos, igual al volumen de tratamiento de calidad de aguas (Ec. 7) obtenido según la Ec. 5.

$$V_{BIO} = V_w + V_f + V_{ct} + V_d \qquad \text{Ec. 6}$$

$$V_{BIO} \geq V_t \qquad \text{Ec. 7}$$

El V_{BIO} se determina en función de los siguientes parámetros:

- Volumen de la lámina de escorrentía sobre la superficie vegetal (V_w) medido en m^3 y calculado según la Ec. 8 (en función de la superficie de la capa de filtro) y la Ec. 9 (en función de la superficie ocupada por al área de biorretención), considerando la sección transversal estándar presentada en la Figura 27 y la

Figura 28. El volumen, en el caso de un área de biorretención con talud que mantiene una sección transversal constante, viene dado por el volumen de un prisma de base rectangular y dos prismas de base triangular. En este caso, se utiliza la situación más habitual de taludes idénticos a ambos lados. Algunos manuales internacionales proponen el uso del valor de la superficie media entre w_s y w_f.

$$V_w = d_w \times L \times [w_f + x] \qquad \text{Ec. 8}$$

$$V_w = d_w \times L \times [w_s - z \times d_w] \qquad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- d_w = altura de la lámina de escorrentía sobre la superficie vegetada (m).
- L = longitud del área de biorretención (m).
- w_f = anchura del fondo de la capa vegetada o anchura de la capa de filtro (m).
- w_s = anchura del área la superficie ocupada por el área de biorretención (m).
- z = valor del talud horizontal (H) (m/m).

- Volumen efectivo de la capa de filtro (V_f). Volumen de la capa de filtro disponible para el almacenamiento de agua y definido por la porosidad de la capa, según Ec. 10.

$$V_f = w_f \times d_f \times L \times n_f \qquad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- d_f = profundidad o espesor de la capa de filtro (m).
- L = longitud del área de biorretención (m).
- w_f = anchura del fondo de la capa vegetada o anchura de la capa de filtro (m).
- n_f = porosidad de la capa de filtro (%).

- Volumen efectivo de la capa de transición (V_f). Volumen de la capa de transición disponible para el almacenamiento de agua y definido por la porosidad de la capa, según Ec. 11.

$$V_{ct} = w_f \times d_{ct} \times L \times n_{ct} \qquad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- d_{ct} = profundidad o espesor de la capa de transición (m).
- L = longitud del área de biorretención (m).
- w_f = anchura del fondo de la capa vegetada o anchura de la capa de filtro (m).

- n_{ct} = porosidad de la capa de transición (%).

- Volumen efectivo de la capa de drenaje (V_d). Volumen de la capa de transición disponible para el almacenamiento de agua y definido por la porosidad de la capa, según Ec. 12.

$$V_d = w_f \times d_d \times L \times n_d \qquad \text{Ec. 12}$$

Donde:

- d_d = profundidad o espesor de la capa de drenaje (m).
- L = longitud del área de biorretención (m).
- w_f = anchura del fondo de la capa vegetada o anchura de la capa de drenaje (m).
- n_d = porosidad de la capa de drenaje (%).

Por tanto, sustituyendo los anteriores parámetros, la expresión general del volumen del área de biorretención viene dada en la Ec. 13:

$$V_{BIO} = L \times \left[d_w \times [w_s - z \times d_w] + [w_s - 2 \times z \times d_w] \times [d_e]\right] \qquad \text{Ec. 13}$$

Donde:

- d_e = profundidad efectiva de almacenamiento de las capas de filtro, transición y drenaje (m) y cuyo valor viene dado en la Ec. 14.

$$d_e = d_f \times n_f + d_{ct} \times n_{ct} + d_d \times n_d \qquad \text{Ec. 14}$$

Además, esta expresión puede presentarse en función de la superficie ocupada por el área de biorretención; la cual, al despejarse, permite obtener su valor de dimensionamiento. Para ellos definimos las dos superficies de la siguiente manera:

- Superficie ocupada por el área de biorretención (S_b). Se define como la superficie ocupada por el sistema en planta (m^2). Para el caso propuesto anteriormente de un área de biorretención con sección transversal en talud que se mantiene constante en toda su longitud, la S_b se calcularía según la Ec. 15. Eliminando el parámetro L, la expresión quedaría como se presenta en la Ec. 16.

$$S_b = w_s \times L = \frac{\left[V_t - \left(w_f \times d_e\right)\right]}{d_w} + (z \times L) \qquad \text{Ec. 15}$$

$$S_b = \frac{\left[V_t - \left(w_f \times d_e\right)\right]}{d_w \times \left(1 - \left(\frac{z}{w_s}\right)\right)} \qquad \text{Ec. 16}$$

- Superficie de la superficie de la capa de filtro (S_f). Área asociada a la base de la capa superficial vegetal o del volumen de la capa de filtro (m^2). Para el mismo caso expuesto anteriormente, la S_f se calcularía según la Ec. 17.

Eliminando el parámetro L, la expresión quedaría como se presenta en la Ec. 18.

$$S_f = w_f \times L = [w_s - (2 \times z \times d_w)] \times L \quad \text{Ec. 17}$$

$$S_f = \frac{S_b \times w_f}{w_s} \quad \text{Ec. 18}$$

Las expresiones anteriores sirven para el dimensionamiento de una estructura estándar con taludes laterales en su sección transversal. En el caso de un parterre inundable o de una jardinera elevada con taludes verticales, se darían los siguientes supuestos mostrados en la Ec. 19 y en la Ec. 20:

$$w_f = w_s \quad \text{Ec. 19}$$

$$S_b = S_f \quad \text{Ec. 20}$$

Se sustituirían estos supuestos dentro de las ecuaciones anteriores y se resolvería. Además, sería de aplicación la siguiente fórmula (Ec. 21) para el cálculo de la superficie de biorretención (S_b).

$$S_b = \frac{V_t}{d'} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

- d' = profundidad efectiva de almacenamiento de todo el sistema de biorretención (m).

$$d' = d_e + d_w \quad \text{Ec. 22}$$

En el segundo de los escenarios descritos con anterioridad correspondiente con el tiempo de vaciado tras evento de lluvia requerido para el correcto funcionamiento del sistema, se tiene que calcular el tiempo de filtración a través de todo el sistema o tiempo de vaciado (t_{vac}) medido en s, haciendo que éste sea inferior al rango máximo admisible de vaciado del sistema, indicado en el rango de 24 a 48 horas.

$$t_{vac} = \frac{d_T}{K_{eq}} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

- d_T = profundidad total del sistema de biorretención más la altura de lámina de la escorrentía (m).

$$d_T = d_w + d_f + d_{ct} + d_d \quad \text{Ec. 24}$$

- K_{eq} = permeabilidad equivalente de todas las capas de filtración del sistema de biorretención ponderados en función de la profundidad de estas (m/s).

$$K_{eq} = \frac{(K_f \times d_f) + (K_{ct} \times d_{ct}) + (K_d \times d_d)}{d_T} \qquad \text{Ec. 25}$$

Por lo tanto, el tiempo de vaciado del sistema para un escenario de no infiltración al terreno o en el que la capacidad de infiltración del terreno sea superior a la de las capas superiores, sería el siguiente (Ec. 26).

$$t_{vac} = \frac{{d_T}^2}{(K_f \times d_f) + (K_{ct} \times d_{ct}) + (K_d \times d_d)} \qquad \text{Ec. 26}$$

Este tiempo no debe de ser superior al rango establecido de 24 a 48 horas. En el escenario de diseño con infiltración al terreno o en el que el factor limitante sea la capacidad de permeabilidad de este, la expresión de cálculo vendrá dada por la Ec. 27. Igualmente, deberá de cumplir con el rango temporal de vaciado establecido previamente.

$$t_{vac} = \frac{d_T}{K_s} \qquad \text{Ec. 27}$$

Donde:

- K_S = permeabilidad del terreno (m/s).

Otra forma de calcular la superficie del área de la capa de filtro (S_f) es la propuesta por el manual británico de SUDS (Woods Ballard et al. 2015) en base a la siguiente expresión (Ec. 28).

$$S_f = \frac{V_t \times (d_f + d_{ct} + d_d)}{k_{eq} \times \left[\frac{d_w}{2} + d_f + d_{ct} + d_d\right] \times t_{vac}} \qquad \text{Ec. 28}$$

La Ec. 44 permite identificar los parámetros que gobiernan el proceso de diseño, destacando sobre todos ellos la permeabilidad del medio filtrante, el volumen de calidad de aguas a tratar y el tiempo límite establecido para poder evacuar dicho volumen del sistema. El resto de los parámetros, como la profundidad de la capa de filtro y la altura de la lámina superficial de escorrentía, vienen ya definidos por el tipo de diseño y la funcionalidad buscada por el mismo.

Es importante recordar que S_b no tiene porqué coincidir con el valor de S_f, por lo que el área a utilizar en los cálculos de dimensionamiento asociados con la calidad de aguas debe de ser siempre S_f; mientras que, el área utilizada para el cálculo de la superficie

ocupada para su comparación con el área drenada o tributaria debe ser S_b. En cualquier caso, se debe de cumplir siempre que $S_b \geq S_f$.

Por último, cabe aclarar que no se ha propuesto ningún tipo de coeficiente de mayoración en las formulaciones de cálculo propuestas, ya que la hipótesis de partida es que todo el volumen que interceptan las áreas de biorretención se ha considerado como volumen que filtraría a través de sus capas sin tener en cuenta la evapotranspiración del sistema. Este escenario es en sí mismo una hipótesis conservativa de cálculo que permite ahorrarse coeficientes de mayoración en el dimensionamiento. Adicionalmente, la hipótesis geométrica del área de biorretención empleada en las formulaciones puede modificarse aplicando aquellas condiciones geométricas impuestas por el proyecto o bajo criterio del proyectista. Por ello, es importante tener en cuenta que el planteamiento que se propone en este documento está basado en la forma geométrica más habitual (sección transversal constante con talud lateral).

4.1.3 Variantes tipológicas

Las áreas de biorretención pueden presentar diferentes variantes tipológicas entre las que destacan las siguientes.

4.1.3.1 Alcorques inundables – BIO1

Los alcorques inundables, también conocidos como alcorques estructurales, son áreas de biorretención compuestas por un suelo estructurado con capacidad portante, el cual ha sido modificado para permitir el almacenamiento de la escorrentía superficial y el crecimiento de las raíces. Los árboles y arbustos de gran tamaño son muy beneficiosos como sistemas de biorretención aportando una mejora de la interceptación de la lluvia, mejorando la evaporación, disipando la energía en la interfase entre la lluvia y la escorrentía superficial, e incrementando la infiltración al terreno a través de sus sistemas de raíces, entre otros.

A continuación se presentan imágenes y esquemas de la estructura de un área de biorretención que incluye arbolado en su interior (Figura 29 y Figura 30).



Figura 29. Área de biorretención ejecutada mediante la inclusión de arbolado en sistema de alcorque inundable gestionando escorrentía de un aparcamiento en Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Además, aportan una reducción de la temperatura de las superficies urbanas a través de las sombras que proyectan sobre las mismas, proveyendo de otros beneficios asociados con la biodiversidad en los ámbitos urbanos, así como la mejora del servicio ecosistémico aportado a la ciudadanía.

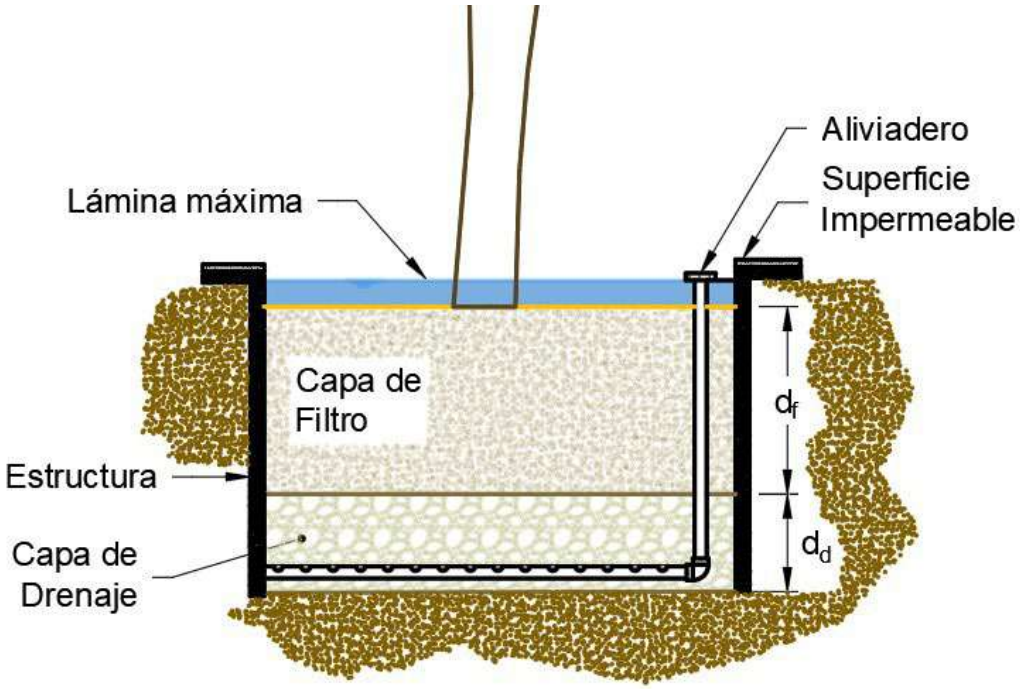


Figura 30. Sección estándar de un alcorque inundable basada en la práctica internacional, mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

En las secciones mostradas en las imágenes de la Figura 29, se pueden identificar con claridad las mismas capas descritas con anterioridad en el caso general de área de biorretención. La sección descrita en la Figura 29 está ejecutada a partir de materiales granulares. En otros casos, éstos pueden ser complementados con la presencia de celdas reticulares de polipropileno u hormigón, incluyendo el uso de materiales reciclados dentro de la mezcla del propio hormigón en algunos casos, fomentando la circularidad de los materiales.

La capa de filtro o medio filtrante está compuesta de substrato con un 80% de contenido de arena entremezclado con un 20% de compost; que, en combinación con las raíces del árbol, trata los contaminantes presentes en la escorrentía, con especial eficacia con los nutrientes y los aceites. En algunos casos, el suelo filtrante de esta capa puede diseñarse específicamente para albergar materiales que permitan tratar contaminantes de una tipología específica como pudiera ser el caso de bacterias. Se incluye *mulch* hasta una profundidad de unos 8-10 cm.

Dentro de esta categoría se englobarían los sistemas de tipo "Estocolmo", ya implementados con anterioridad en la ciudad de Gijón y que presentan la siguiente sección transversal en la Figura 31.

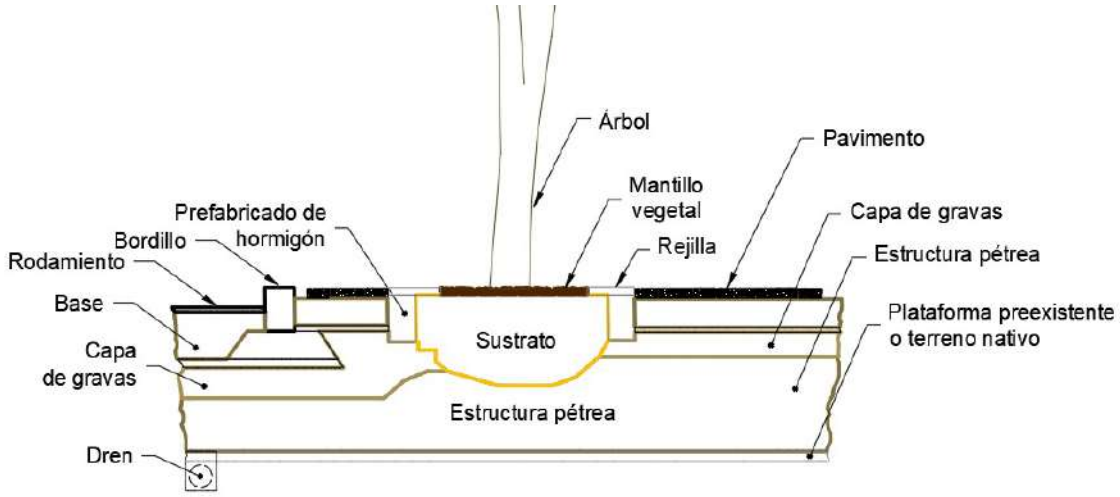


Figura 31. Sección estándar de un alcorque inundable de tipo "Estocolmo", mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

El sistema Estocolmo se caracteriza por la inclusión de material granular de gran tamaño rellenada con materiales enriquecidos con nutrientes para facilitar el mantenimiento de las raíces del árbol, como puede apreciarse en la Figura 31. Además, dispone de una capa aireante de material granular de menor tamaño a la anterior que sirve de soporte.

4.1.3.2 Parterres inundables – BIO2

Los parterres inundables o jardines de lluvia son áreas de biorretención de tamaños menores a los sistemas de biorretención generales. En los casos en los que se esté drenando una vivienda unifamiliar o un edificio de pequeñas dimensiones, los jardines de lluvia pueden sustituir sus capas de filtro, transición y drenante por una única capa de 20 a 50 cm de espesor compuesta por suelo nativo de arena y compost, o mezclas especialmente diseñadas en función de los contaminantes a tratar. En este tipo de escenario, el valor máximo de la lámina de escorrentía superficial permitida es de 15 cm. El sistema suele diseñarse para albergar una única entrada de la escorrentía. Un par de ejemplos de este tipo de área de biorretención se muestra en la Figura 32.

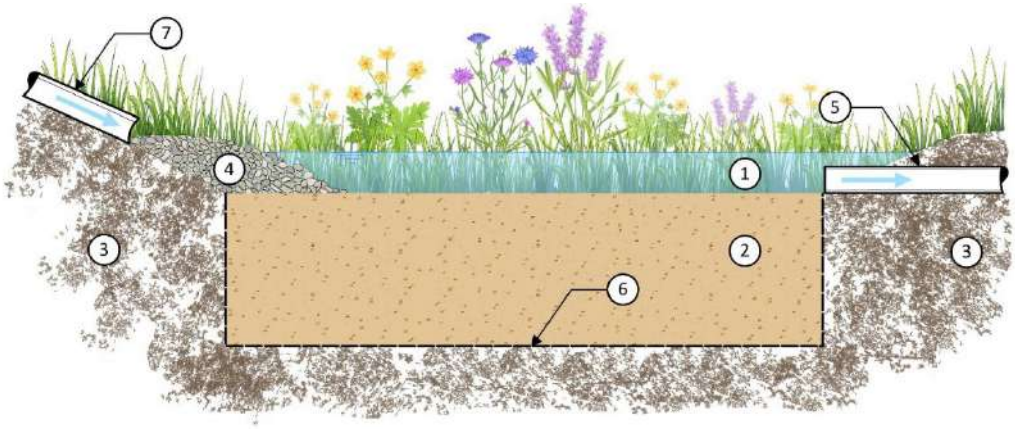


Figura 32. Sección estándar de un jardín de lluvia o parterre inundable, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa de superficie vegetada con lámina de escorrentía temporal; (2) Capa de filtro o suelo especialmente diseñado; (3) Terreno natural adyacente; (4) Elemento de ingreso de la escorrentía al SUDS con sistema antierosión; (5) Elemento de desagüe del sistema en caso de rebose; (6) Geosintético perimetral de filtrado al terreno subyacente o de impermeabilización dependiendo de la función final del diseño del SUDS; (7) Bajante de cubierta adyacente. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo, adaptado a partir de Woods Ballard et al. (2015) y North Carolina Department of Environmental Quality (2020).

Esta variedad de área de biorretención se ha convertido en una de las más populares entre los ciudadanos y ciudadanas por todo el mundo, dado su atractivo paisajístico y la facilidad de mantenimiento, pudiendo ser realizada ésta por los propios vecinos y vecinas de los inmuebles a los que dan servicio.

4.1.3.3 Jardineras elevadas – BIO3

Las jardineras elevadas pudieran ser consideradas como una sub-variedad dentro de los jardines de lluvia, ya que su sección transversal suele ser coincidente con la de los jardines de lluvia más pequeños. Su aplicación es prácticamente exclusiva para el drenaje sostenible de la escorrentía captada en las cubiertas de las edificaciones y direccionada a cota de calle mediante bajantes. Estos sistemas utilizados dentro de cajas o jardineras no se utilizan para infiltrar al terreno, aportado una atenuación del volumen de escorrentía

interceptada por las cubiertas de los edificios adyacentes, además de aportarla un tratamiento de filtración inicial previo a su posterior ingreso al sistema de drenaje convencional o a otro SUDS, conformando un tren de tratamiento. En la mayoría de los casos, toda la sección de la jardinera estaría por encima de la cota de la calle. No obstante, este sería un caso en que una parte de la jardinera se presenta enterrada por debajo de la cota superficial pavimentada.

Las jardineras elevadas son un sistema muy utilizado y que presenta gran variedad de posibilidades de diseño y flexibilidad en su implementación asociada con el drenaje de cubiertas de edificaciones.

Otro ejemplo de una sección transversal de jardinera con un alto nivel de detalle en su diseño es el presentado a continuación en la Figura 33.

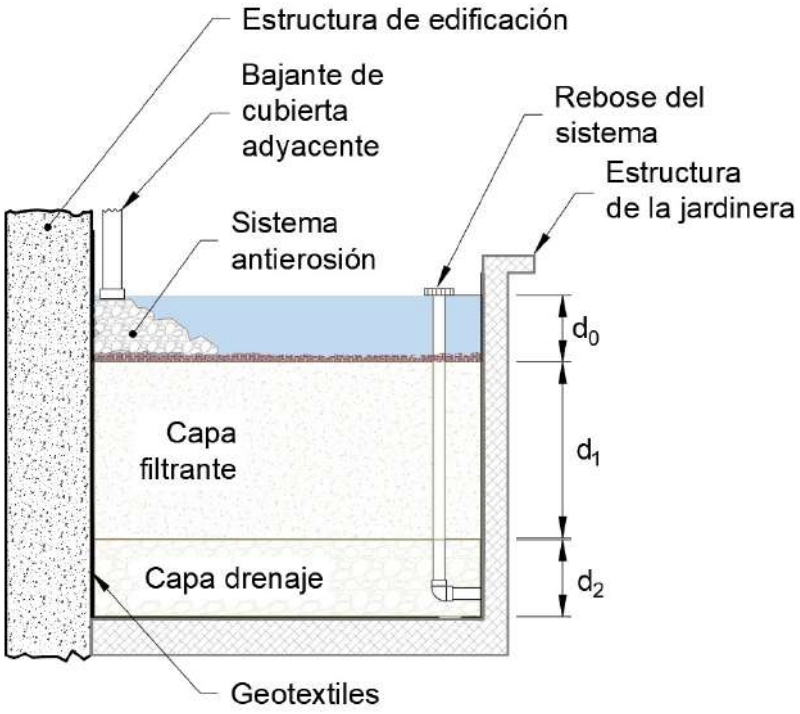


Figura 33. Sección estándar de una jardinera elevada, mostrando sus distintos componentes. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

4.1.3.4 Cunetas de biorretención – BIO4

Las cunetas de biorretención o bio-cunetas son un tipo de área de biorretención que utiliza como base la estructura de una cuneta, pudiendo clasificarse indistintamente dentro de esta categoría o en la concerniente a las cunetas vegetadas. Las cuentas de biorretención se pueden diseñar con un componente de biorretención longitudinal a lo largo de toda su estructura o centrando esa zona de biorretención en la parte final de la cuneta previo al elemento de desagüe de la cuneta vegetada.

Se recomienda que la cuneta de biorretención se diseñe para que sea capaz de captar y filtrar a través de su estructura el volumen de tratamiento para el V_{90}. En los casos en que se produzca excedencia de este volumen, el flujo de escorrentía sobrante fluirá por la cuneta de manera superficial. Se debe de prestar especial atención a las velocidades del flujo de escorrentía dentro de la cuneta de biorretención para evitar erosión de la capa superficial y daño a las especies vegetales empleadas en el diseño. Como en el caso de las variantes anteriores, la vegetación debe ser capaz de tolerar condiciones temporales de inundación, así como escenarios de sequía entre eventos de lluvia consecutivos en periodos secos.

Un ejemplo de cuneta de biorretención sería el que se presenta a continuación en la Figura 34.

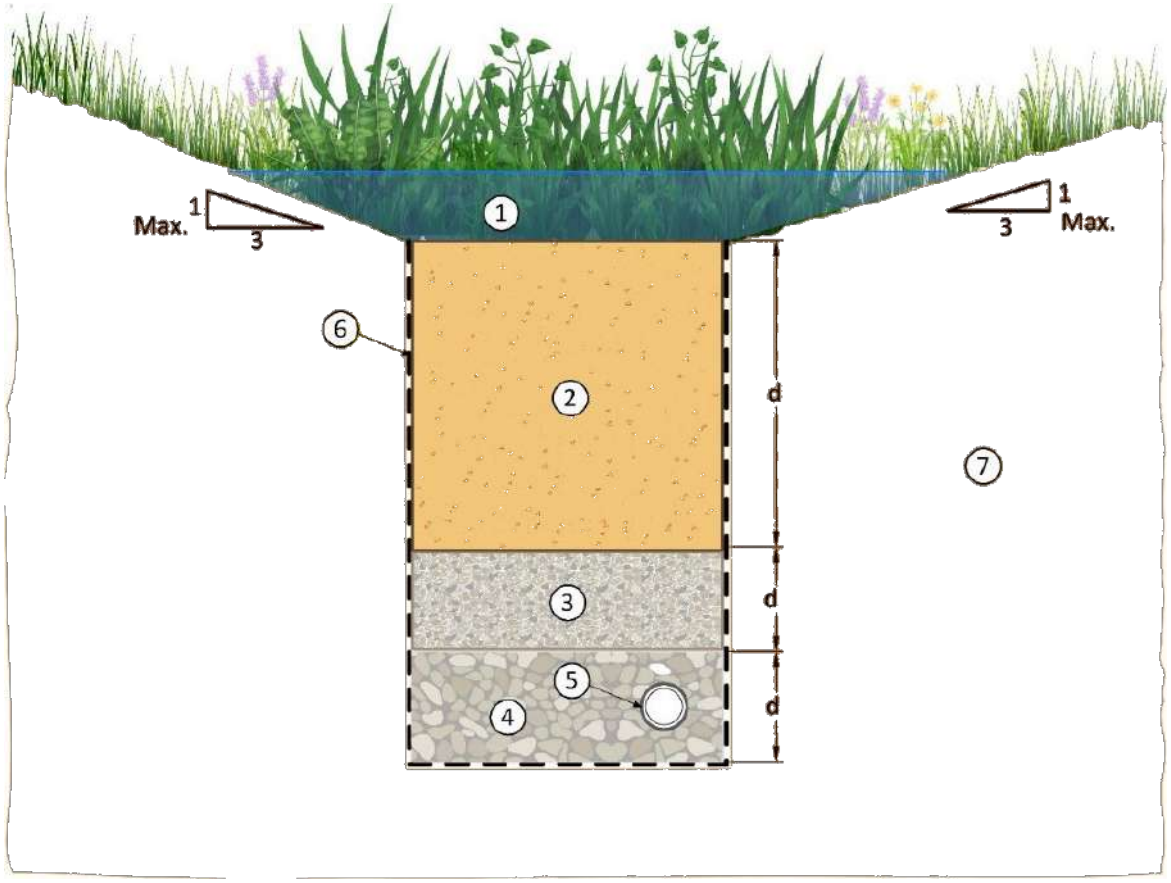


Figura 34. Sección estándar de una cuneta de biorretención, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa de superficie vegetada con lámina de escorrentía temporal transportada a lo largo del sistema; (2) Capa de filtro; (3) Capa de transición; (4) Capa drenante; (5) Tubería-dren de fondo perforada para la recolección del flujo filtrado a través de la cuneta; (6) Geosintético de filtro al terreno adyacente y de recogida de caudales sub-superficiales, o de impermeabilización, dependiendo de la función final de diseño del sistema; (7) Terreno adyacente. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

4.1.3.5 Sistemas de retención anaeróbicos – BIO5

Los sistemas de retención anaeróbicos se diferencian de las tipologías presentadas con anterioridad en que trabajan sin la presencia de oxígeno, gracias a la implementación de un codo invertido (ver Figura 35). Esto permite aumentar la eficiencia en el tratamiento y reducción de nutrientes.

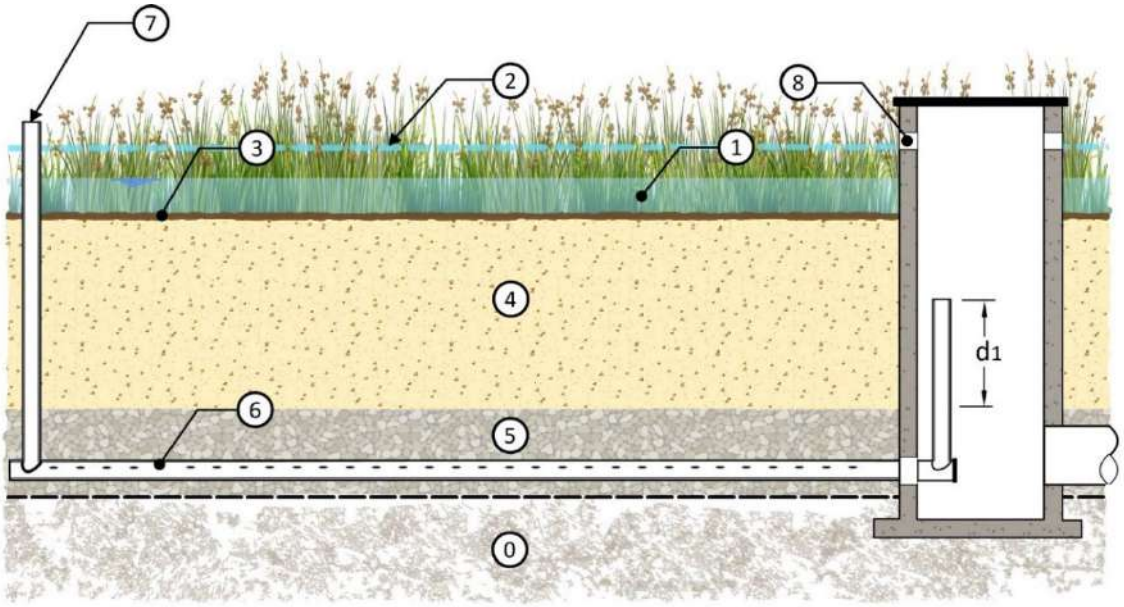


Figura 35. Sección estándar de una cuneta de biorretención, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa de superficie vegetada con lámina de escorrentía temporal transportada a lo largo del sistema; (2) Máxima altura de lámina de agua soportada por el sistema hasta el comienzo del rebose al drenaje convencional; (3) Capa de sustrato; (4) Capa de filtro; (5) Capa drenante; (6) Tubería-dren de fondo perforada para la recolección del flujo filtrado a través de la cuneta; (7) Tubería vertical de rebose; (8) Estructura de control de reboses y bypass al sistema convencional; (0) Terreno subyacente. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

4.1.4 Recomendaciones para la fase de construcción

Las áreas de biorretención debieran de construirse hacia el final de la obra del desarrollo o de rehabilitación urbana con el objetivo de disminuir las posibles afecciones negativas provenientes de la erosión y el transporte de sedimentos en la escorrentía superficial desde otras zonas de la obra. Además, pueden afectar en fase de construcción a la capa de filtro, colmatándola de forma prematura, por lo que se sugiere tomar medidas a este respecto que garanticen que el proceso de construcción no influya negativamente sobre el futuro funcionamiento del SUDS.

En esa línea de recomendaciones, se propone evitar el ingreso de la escorrentía superficial al sistema antes de haber instalado la capa de la superficie vegetal del área de biorretención y que ésta haya desarrollado una cobertura mínima de la superficie alcanzando una densidad mínima que permita la posterior maduración de las especies vegetales empleadas en su construcción. Por ello, se sugiere la utilización de trampas de

arena localizadas en la zona de ingreso de la escorrentía superficial al sistema, que permitan atrapar los sedimentos con potencial erosivo de la capa superficial vegetal mientras esta se establece definitivamente.

Además de las anteriores sugerencias a implementar dentro del proceso constructivo de un área de biorretención, se recomiendan las siguientes consideraciones generales:

- Vigilar que no haya un exceso de compactación del suelo subyacente al SUDS, prestando especial atención a las capas de filtro y del sustrato que sirve como base a las especies vegetales de la capa superficial del sistema. De esta manera se garantiza que no se reduzca la capacidad de infiltración del sistema, ya que ésta es básica en el diseño del SUDS (9.1.2) y su reducción implicaría un fallo del sistema para gestionar el volumen de tratamiento del sistema (el V_{91} o 16 mm de altura de lluvia con los que se dimensiona el sistema).
- Impedir el ingreso de vehículos de obra ajenos a los necesarios para poder ejecutar el procedimiento constructivo del SUDS sobre la zona destinada a servir como área de biorretención.
- Se recomienda el uso de una retroexcavadora para las labores de excavación del área de biorretención cuando ésta tenga una superficie considerable y medios manuales cuando se trate de pequeñas intervenciones como un parterre inundable de pequeñas dimensiones. En el caso de jardineras elevadas, el uso de maquinaria de excavación, tanto hidráulica como manual, no sería necesaria, por tratarse de sistemas que se introducen en un prefabricado.
- En el caso de que se usen geotextiles como capas de transición y filtración dentro de un área de biorretención, se recomienda encarecidamente de que se cuide su protección frente a colmatación o daño previa a su instalación, evitando dobleces o roturas durante la fase de construcción de las capas.
- La capa de filtro requiere de un cuidado más, además de su protección frente a la colmatación durante la fase de construcción. Se trata de una recomendación durante instalación. No se debe de instalar la capa de filtro si ésta y/o el suelo subyacente al SUDS se encuentran en estado de saturación, ya que sus características físicas variarían y pudieran desencadenar fallos estructurales del sistema y defectos posteriores en el funcionamiento de ambas capas.

Los materiales para utilizar en la construcción de cada una de las capas que componen la estructura del área de biorretención se especifican a continuación.

La construcción de la capa superficial vegetada debe de ser planificada cuidadosamente, considerando su particularización específica a las condiciones del lugar de implantación del SUDS y a los objetivos estéticos del desarrollo urbano o de la rehabilitación urbana. Las especies vegetales utilizadas en la capa superficial deben de adecuarse a los requerimientos locales teniendo en cuenta las recomendaciones del servicio de Parques y Jardines de la ciudad. Se recomienda el uso de manuales y guías técnicas especializadas en áreas de biorretención, además de la consulta a especialistas en la temática, para la correcta selección de las especies vegetales óptimas para los diseños propuestos.

Se recomienda asegurar que la capa de filtro cumple con las siguientes especificaciones durante la fase de construcción, comenzando por la granulometría del material granular, la cual se presenta a continuación en la Tabla 32.

Tabla 32. Granulometría recomendada para la construcción de la capa de filtro de un área de biorretención.

Tamaño de partícula (mm)	% pasa
6,0	100
2,0	90 – 100
0,6	40 – 70
0,2	5 – 20
0,063	0 – 5

Otra forma de presentar la anterior granulometría es la de referirse a la naturaleza de los áridos a utilizar en la distribución granulométrica Tabla 33.

Tabla 33. Granulometría recomendada para la construcción de la capa de filtro de un área de biorretención.

Tipo de árido	% de utilización con respecto al total
Material granular arenoso lavado	75 – 85
Finos de tipo limoso y arcilloso	8 – 15*
Materia orgánica	5 – 10

* El % de finos debería de limitarse a un 8% cuando el foco del tratamiento de contaminantes no esté puesto en el N, pudiendo elevarse dentro del rango propuesto en caso contrario.

Se recomienda que el índice de P no supere un valor de 30 – 50, dependiendo del punto de vertido del sistema. Esta recomendación es particularmente importante en aquellas zonas rurales donde pueda haber actividad ganadera o de agricultura.

La capa de transición deberá de asegurar que no hay migración de finos procedentes de la capa de filtro hacia las capas inferiores, lo que representaría un riesgo de colmatación del sistema impidiendo la infiltración al terreno o la correcta evacuación del flujo de escorrentía hacia el sistema convencional.

La capa de drenaje tiene que presentar una permeabilidad mayor que la inmediatamente superior a ella (capa de filtro), por lo que se recomienda la utilización de árido limpio

cuyo rango granulométrico sea 4 – 20 mm sin presencia de finos. También pueden utilizarse cajas reticulares prefabricadas que permiten aumentar la capacidad de gestión de volumen de escorrentía filtrada a través del sistema, ya sea para su almacenamiento temporal y posterior drenaje diferido a la red de drenaje convencional, o para su infiltración al terreno subyacente.

Esta capa puede ser recipiente de áridos reciclados, fomentando la economía circular en el uso de materiales de construcción. Sin embargo, se recomienda que se estos áridos cumplan las mismas especificaciones técnicas que un árido convencional usado como capa de drenaje, además de garantizar que no libera sustancias contaminantes a la escorrentía superficial tratada por el sistema. En caso de no poder garantizar dicho comportamiento, se deberá de evitar su uso. Estudios previos sugieren que el uso de materiales reciclados mixtos presenta mayor variabilidad en el comportamiento hidrológico y de tratamiento de la calidad de aguas que los materiales reciclados procedentes del hormigón. En cualquier caso, se recomienda la revisión de las características y la necesidad de homogeneizar el material reciclado que vaya a implementarse en la capa de drenaje.

Las tuberías verticales de limpieza y los reboses deben de construirse con materiales rígidos, evitando el uso de tuberías flexibles que pudieran doblarse y romperse, causando el fallo del sistema de rebose del SUDS, evitando que la lámina de agua de la capa de superficie se filtre a través de todo el sistema de tratamiento, vertiéndose a través de la tubería, sin tratamiento, hacia el sistema de desagüe de la propia área de biorretención.

En función de las condiciones de la zona de estudio y de su tamaño, se puede recomendar la implementación de un sistema de disipación de la energía para limitar la velocidad de entrada a 0,5 m/s, o una zona de pretratamiento que ya incluya dicho elemento de disipación de la energía. Cuando se disponga un área de biorretención que ocupe una superficie importante de terreno, se debe de incluir dicha zona de pretratamiento que permite proteger a la capa de superficie vegetada frente a la potencial erosión causada por la energía del flujo de la escorrentía superficial, así como para atrapar un porcentaje de los contaminantes presentes en ella. Esta zona debería de tener, al menos, un espesor de unos 20 cm de grava, seguido de unos 10 cm de césped. Esta zona debe de estar impermeabilizada perimetralmente mediante un espacio estanco de hormigón o mediante una geomembrana de impermeabilización, para asegurar que la escorrentía superficial pase a la zona de tratamiento.

4.1.5 Operación, mantenimiento y monitorización

Las labores de operación y mantenimiento de un área de biorretención se pueden resumir en la Tabla 34. Se incluyen dentro de las labores de operación y mantenimiento aquellas relacionadas con las tareas de inspección para comprobar que el SUDS funciona correctamente según el diseño propuesto para su construcción.

Las labores de mantenimiento podrían dividirse entre aquellas planificadas con antelación (preventivas) con el objetivo de detectar reducciones en el comportamiento de algún componente del sistema de manera temprana, y aquellas tomadas tras un fallo del sistema y que requieren medidas correctoras para recuperar la funcionalidad del SUDS (correctoras).

Tabla 34. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un área de biorretención, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Capa superficial de vegetación	Inspección visual y análisis descriptivo del estado de las especies vegetales	Aparición de enfermedades, crecimiento inadecuado de las especies y presencia de especies invasoras, entre otros	Quincenal (inspección regular)
	Mantenimiento de las especies vegetales a través de labores de poda, riego*(1) y recogida de basura	Sequedad de las plantas, arbustos o árboles presentes o de la capa superficial de sustrato, crecimiento desigual de las especies	Quincenal (inspección regular)
	Control de plagas	Presencia de especies animales potencialmente peligrosas o de vectores	Bajo necesidad (medida correctora)
	Resiembra de especies vegetales	Perdida de la densidad de la cobertura vegetal por aparición de plantas muertas	Bajo necesidad (medida correctora)
	Reparaciones menores por acumulación de sedimentos en superficie, socavación de la capa de superficial hacia la capa de filtro, llenado de agujeros superficiales, reemplazo del mulch o escarificación de la capa superior del suelo	Presencia de agujeros en la capa superficial y exposición de la capa de filtro al exterior	Bajo necesidad (medida ocasional)

Capa de filtro	Realizar ensayos de permeabilidad al sistema	Reducción de la permeabilidad inicial de diseño	Anual (inspección ocasional)
	Inspección visual de generación de charcos y determinación de tiempo de vaciado de la lámina de agua superficial en la capa superficial vegetada	Generación de charcos mantenidos en un tiempo superior al de diseño	Quincenal (inspección regular)
	Reemplazo completo de la capa de filtro	Fallo catastrófico del sistema por falta de permeabilidad de la capa de filtro	Bajo necesidad (posiblemente a los 25 años)
Zona de ingreso de la escorrentía superficial / Zona de pretratamiento y protección frente a la erosión	Retirada de residuos y escombros arrastrados por la escorrentía superficial y atrapados en la zona de pretratamiento o elementos de entrada y protección frente a la erosión	Aparición de residuos en las zonas de ingreso de la escorrentía superficial al área de biorretención	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en las zonas de ingreso de la escorrentía superficial tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Falta de impermeabilidad de los elementos de ingreso de la escorrentía al SUDS	No ingreso de la escorrentía en la zona de tratamiento del SUDS	Quincenal (mantenimiento regular)
Elementos de rebose, limpieza o desagüe, incluyendo los drenes perforados de sub-base	Inspección de elementos de rebose, limpieza y desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de rebose, limpieza, transporte y desagüe	Obstrucción de tuberías a través de la reducción en el flujo de salida del sistema	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tratada por el sistema tras evento de lluvia	Reducción de los caudales de salida o lecturas anómalas de los mismos	Quincenal (inspección regular)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las	Mantenimiento de los equipos de instrumentación	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento

estructuras de monitorización de su funcionamiento			(mantenimiento regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

*(1) Prestar especial atención durante los primeros 2 – 5 años (dependiendo de la tipología de diseño) de desarrollo del área de biorretención.

La monitorización de un área de biorretención debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal de entrada y salida del área de biorretención.
- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.).
- Inspección visual de las condiciones de funcionamiento tras un evento intenso de lluvia (Figura 36).



Figura 36. Personal de la North Carolina State University llevando a cabo inspección visual sobre área de biorretención que gestiona la escorrentía de un aparcamiento adyacente en Raleigh, Carolina del Norte. Fotografía: Carlos Rey Mahía.

Para ello, habría que ejecutar una serie de elementos auxiliares de obra civil que permitan albergar los instrumentos de monitorización, tales como arquetas de monitorización. Éstas deberían poder contener elementos como los descritos a continuación:

- Vertederos de tipo "v" que permitan obtener el caudal y la velocidad del flujo entrante y saliente al área de biorretención.

En condiciones ideales, se recomienda la instalación de los siguientes instrumentos:

- Instalación de estaciones meteorológicas o de pluviómetros.
- Sensores de altura dispuestos en ambos extremos de la cuneta
- Toma-muestras automáticos de la calidad de aguas.

4.1.6 Referencias especializadas en áreas de biorretención

A continuación, se muestran las referencias empleadas para la elaboración de la información presentada sobre esta tipología de SUDS, con el objeto de que el usuario del manual técnico pueda obtener un mayor nivel de detalle en alguno de los aspectos, elementos o criterios de diseño que desee, pudiendo contrastar diferentes experiencias prácticas y variantes técnicas nacionales e internacionales.

4.1.6.1 Referencias a guías y manuales técnicos

Alvem, B. -M., and Grönjord, R. *Plant beds in Stockholm city - a handbook*, 3ª ed., Estocolmo, Suecia: City of Stockholm, 2017. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

California Department of Transportation. *Biofiltration swale. Design Guidance*. En: *Caltrans Storm Water Quality Handbook*. Sacramento, EE. UU.: Septiembre, 2012 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. En: Observatorio Ambiental de Bogotá. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Acueducto de Bogotá. Octubre, 4, 2021 [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

City of Melbourne. Raingarden tree pits. En: Urban Water. Melbourne, Australia. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

County of Los Angeles Department of Public Works. *Low Impact Development Standards Manual*. Los Angeles, EE. UU.: 2014. Febrero, 1, 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

De la Fuente García, L., Perales Momparler, S., Rico Cortés, M., Andrés Doménech, I., Marco Segura, J. B. *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*. Valencia: Cicle Integral de l'Aigua. Ajuntament de València, 2021. ISBN 978-84-9089-386-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Embrén, B., Alvem, B. -M., Stål, Ö, and Orvesten, A. *Planting Beds in the City of Stockholm, A Handbook*. Estocolmo, Suecia: City of Stockholm, 2009.

Maryland Department of Environment. *Apéndice B.3. Construction specifications for sand filters, bioretention and open channels*. En: Maryland Stormwater Design Manual, Vols. I and II., 2000. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

North Carolina Department of Environmental Quality. *C-2. Bioretention Cell*. En: *Stormwater Design Manual*. Noviembre, 20, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Philadelphia Water Department. *Downspout planters*. En: *Stormwater*. 2022. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Rector, P., Obropta, C., and Brown. J. *Green Infrastructure Practices: Tree Boxes*. En: *Cooperative Extension Fact Sheets FS1209*, Rutgers University, New Jersey, EE. UU.: Agosto, 2013. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

US Environmental Protection Agency. *Stormwater to Street Trees: Engineering Urban Forests for Stormwater Management*. EPA 841-B-13-001. Septiembre, 2013 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 18. Bioretention systems*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.1.6.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión

Davis, A.P. Field performance of bioretention: Water quality. *Environmental Engineering Science*, 2009, vol. 24, no. 8. pp. 1048-1064. DOI: 10.1089/ees.2006.0190.

Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G., Clar, M. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, vol. 135, no. 3. pp. 109-117. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109).

Furén, R., Flanagan, K., Winston, R.J., Tirpak, R. A., Dorsey, J. D., Viklander, M., Blecken, G.-T. Occurrence, concentration, and distribution of 38 organic micropollutants in the

filter material of 12 stormwater bioretention facilities. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 846, pp. 157372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157372

Galleto, F.A., Cabatuan, M.K., Africa, A.D.M., Maniquiz-Redillas, M. C., Navaluna, J. M., Herrera, J. C. Q., Ubando, A. T., Culaba, A.B., Redillas, M.C.F.R. Bioretention Systems Optimization and Design Characterization Model Using Fuzzy Rough Set Theory. *Water (Switzerland)*, 2022, vol. 14, no. 13. pp. 2037. DOI: [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Hunt, W.F., Davis, A.P., Traver, R.G. Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, vol. 138, no. 6. pp. 698-707. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000504.

Hunt, W. F. *Bioretention design fundamentals + selecting bioretention media: practical cases in the US*. En: Curso internacional introductorio al diseño y planificación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), (Mieres 9-11 de diciembre 2020). Mieres: Universidad de Oviedo, 2020.

Lammers, R.W., Miller, L., Bledsoe, B.P. Effects of Design and Climate on Bioretention Effectiveness for Watershed-Scale Hydrologic Benefits. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2022, vol. 8, no. 4. pp. 04022011. DOI: 10.1061/JSWBAY.0000993 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Lisenbee, W.A., Hathaway, J.M., Winston, R.J. Modeling bioretention hydrology: Quantifying the performance of DRAINMOD-Urban and the SWMM LID module. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 612, pp. 128179. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128179.

4.1.6.3 Casos de estudio

SUSDRAIN. Bioretention. En: *Case studies*. 2022 [acceso 29 enero 2024] Enlace de consulta

U.S. Environmental Protection Agency. *Case Studies Analyzing the Economic Benefits of Low Impact Development and Green Infrastructure Programs*. EPA 841-R-13-004. Agosto, 2013. Enlace de descarga libre

4.1.6.4 Referencias a normativas

ASTM F1815-06 *Standard test methods for saturated hydraulic conductivity, water retention, porosity, and bulk density of athletic rootzones*.

4.2 Cunetas vegetadas

4.2.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Las cunetas vegetadas son canales vegetados abiertos de poca profundidad (0,3 – 1 m) cuyo objetivo fundamental es el transporte y tratamiento de la escorrentía superficial. Su uso más común se da en el drenaje lineal de carreteras o vías de transporte, además de en caminos y parques, gracias a sus beneficios paisajísticos y de biodiversidad. La inclusión de cunetas vegetadas es muy habitual en zonas de aparcamiento por su versatilidad y economía en comparación a otros SUDS. En este último caso, se suele considerar la opción de la cuneta de biorretención, incluida dentro de las áreas de biorretención. Las cunetas vegetadas son SUDS utilizados habitualmente como parte de un tren de tratamiento, siendo su función de transporte la que primaría en ese caso, llevando la escorrentía de manera segura hacia un SUDS de tratamiento específico de los contaminantes objetivo.



Figura 37. Ejemplo de cuneta vegetada implementada para gestionar las pluviales de una zona residencial. Fotografía: Carlos Rey Mahía.

Los principales mecanismos de tratamiento de los contaminantes presentes en la escorrentía superficial a través de una cuneta vegetada son los siguientes: biofiltración, sedimentación, evapotranspiración e infiltración. El tratamiento de los contaminantes se produce mediante el proceso de transporte de la escorrentía superficial a lo largo de la longitud de la cuneta vegetada gracias a las especies vegetales y las raíces de estas

presentes en el sistema, por lo que diversos autores las consideran como SUDS de biofiltración con similitudes a las áreas de biorretención. De hecho, las cunetas de biorretención quedan incluidas dentro de las áreas de biorretención dado el diseño de sus capas de filtro y las especies vegetales utilizadas en la capa superficial.

Las cunetas vegetadas contribuyen a la reducción del caudal pico de la escorrentía superficial mediante el aumento del tiempo de concentración de la escorrentía fluyendo a través del SUDS. Esa reducción de la velocidad se da a partir de las especies vegetales implementadas en su superficie además de la incorporación de represas estratégicamente construidas a lo largo de su longitud (Figura 38). Estas últimas permiten retener un mayor volumen de escorrentía, fomentando la reducción de la velocidad del flujo de escorrentía y aumentando las posibilidades de infiltración de esta cuando se promueva la función de infiltración al terreno.



Figura 38. Cuneta vegetada seca con represa situada en la parte superior de la imagen, Yorkshire, Reino Unido. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

La sección transversal de una cuneta vegetada puede ser constante o variable a lo largo de la longitud de avance del flujo de escorrentía, permitiendo libertad de diseño. Por otra parte, las cunetas vegetadas son SUDS que pueden sustituir a las tuberías o a los canales hormigonados tradicionales gracias a su efectividad en el transporte y a su contribución paisajística como elemento renaturalizador en entornos urbanos, siendo uno de los SUDS más conocidos y utilizados hasta la fecha (Jato-Espino et al. 2017).

Existen dos tipologías principales de cunetas vegetadas (ver variantes tipológicas en el punto 9.2.3), distinguiéndose entre aquellas cuya función principal es el transporte, sin apenas consideración de la vertiente de tratamiento de los contaminantes; y las tipologías de cuneta vegetada de tratamiento, cuya función de transporte no es la única relevante. En este segundo caso, hay dos subcategorías, diferenciando entre las cunetas vegetadas secas y las húmedas.

4.2.2 Recomendaciones de diseño

Las cunetas vegetadas se suelen diseñar con formas típicas de canales de transporte de agua abiertos en superficie como la sección trapezoidal y la sección parabólica o en hondonada, ambas estándar dentro de la norma de drenaje de carreteras (Ministerio de Fomento, 2018).

El tiempo de residencia de la escorrentía superficial en una cuneta vegetada de transporte se mide dividiendo la longitud de la cuneta entre la velocidad del flujo de escorrentía, y debiera de ser de al menos de 4 minutos en las cunetas vegetadas de transporte (North Carolina Department of Environmental Quality 2020), pudiendo subirse hasta los 10 minutos en las cunetas de tratamiento (Iowa 2009).

Se deberán de llevar a cabo las comprobaciones hidráulicas para elementos lineales de la norma 5.2-IC de drenaje superficial, tanto para la capacidad hidráulica del sistema, como para la velocidad máxima admisible. Se recomienda que la cuneta vegetada sea capaz de transportar el caudal punta correspondiente a un periodo de retorno de 25 años sin generar problemas de rebose, siendo el periodo de 10 años indispensable como valor mínimo de diseño.

La máxima velocidad del caudal de la escorrentía superficial permitida dentro del sistema depende de los valores máximos admisibles propuestos por la norma 5.2-IC de drenaje superficial para caudales asociados con periodos de retorno de 25 años. La máxima velocidad admisible para un “terreno con vegetación herbácea permanente” asimilable a una cuneta vegetada, según la norma 5.2-IC de drenaje superficial, es del

rango 1,20 – 1,80 m/s, recomendándose que se trate de limitar al valor mínimo del rango (1,20 m/s).

Se debe de incluir una estructura de alivio a la red de drenaje convencional o hacia cauce natural según corresponda, de forma que se eviten posibles eventos de inundación del SUDS hacia las áreas adyacentes en caso de verse desbordado por un potencial mal funcionamiento que requiera de labores de mantenimiento.

Las capas estándar de una cuneta vegetada y sus funciones principales son las siguientes:

- Capa superficial vegetal. La capa vegetal se compone de las especies vegetales elegidas para realizar las funciones de transporte y tratamiento de los contaminantes presentes en la escorrentía. Además de este criterio, se debe de tener en cuenta el paisajístico, primando siempre que se pueda la selección de especies locales propuestas por especialistas en la materia. En el caso de las cunetas vegetadas de transporte, la altura máxima de la vegetación debiera de mantenerse entre 7,5 y 15 cm.
- Capa de filtro o medio filtrante. Esta capa se incluye en las cunetas de tratamiento secas y húmedas, pero no es necesaria en las cunetas vegetadas cuyo único objetivo es el de transporte. Dicha capa puede alcanzar un espesor máximo de 75 cm y está formada por una mezcla de áridos y arena que conformen un suelo permeable.
- Capa de transición. La principal función de la capa de transición es la de servir de capa se separación entre la capa de filtro y la capa de drenaje o sub-base del SUDS, de forma que se evite la migración de materiales (especialmente finos) desde la capa de filtro hacia la capa de drenaje. Esta capa de separación, cuando se incluye, se ejecuta mediante un geotextil con un adecuado diseño de apertura de poros y permeabilidad. Esta capa también actúa como capa de filtro, pudiendo aportar capacidad de reducción de ciertos contaminantes mediante la generación de una capa de actividad microbiana en los casos en que se use un geotextil de filtro.
- Capa de drenaje. Se trata de la capa inferior del sistema o capa de sub-base, cuyo objetivo es el de captar el agua de escorrentía procedente de las capas superiores y dirigirla hacia los elementos de vertido convenientemente diseñados para tal efecto. Esta capa está compuesta por gravilla que sirve de cama para la disposición de una tubería de fondo perforada en caso de disponerse en las cunetas vegetadas de tratamiento.

Además de las capas anteriormente expuestas, se deben añadir los siguientes elementos constructivos complementarios al diseño con sus respectivas funciones asociadas también con la operación, mantenimiento y monitorización del sistema:

- Elemento de entrada de la escorrentía y zona de pretratamiento. La entrada del flujo de escorrentía superficial en una cuneta vegetada suele producirse lateralmente a través de toda la longitud de esta. Por lo que se recomienda la incorporación de una zona de pretratamiento anterior a la zona de talud, consistente en una pequeña franja filtrante de gravilla que permita pre-tratar flujos sub-superficiales circulando en la dirección de la cuneta vegetada. Existe la posibilidad de que haya una entrada a través de uno de los extremos de la cuneta vegetada cuando el SUDS recibe un flujo procedente de aguas arriba, ya sea de otro SUDS como parte de un tren de tratamiento, o como entrada desde una red de drenaje convencional como elemento intermedio de transporte y tratamiento. En este último caso, se recomienda la inclusión de una pequeña zona de transición previa a la entrada a la cuneta que sea capaz de acomodar el ingreso del flujo de escorrentía procedente de aguas arriba.
- Elemento o estructura de rebose. Se trata de un elemento constructivo auxiliar al SUDS que permite la gestión de volúmenes de escorrentía que generan alturas de lámina de agua superiores a las recomendadas por diseño y que puedan comprometer el funcionamiento hidráulico de la cuneta generando situaciones de inundación en el SUDS. Esta estructura de rebose suele disponerse al final de la longitud de la cuneta vegetada; pudiendo ser, tanto una estructura tradicional de alivio, como una tubería de desagüe.
- Elementos de desagüe del sistema. Existen varios componentes que permiten evacuar el agua de escorrentía tratada hacia el exterior del sistema, ya sea hacia el terreno subyacente o hacia la red de drenaje convencional.
    - *Tubería-dren*. Tubería perforada de fondo embebida dentro de la capa de drenaje o sub-base, y diseñada para evacuar el agua tratada por el sistema mediante su filtración por las capas superiores, direccionándola habitualmente hacia un elemento de conexión tipo arqueta, donde este flujo puede conectarse con el sistema de drenaje convencional.
    - *Área de vertido*. Zona de tratamiento final en caso de vertido a cauce natural, la cual deberá de definirse en función del tratamiento

proporcionado y de los valores máximos de vertido permitidos por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico.

- *Conexión con otro SUDS*. Tubería de conexión entre el área de biorretención y un segundo SUDS que permitiría aumentar las posibilidades de tratamiento tal y como se describe en el punto 8.3.1 y en la Tabla 14.

- Área de talud y escalón exterior. En los casos de diseño de cunetas vegetadas donde se incluya un talud lateral, éste estará limitado a un valor máximo de 1:3 (V:H), comenzando en la superficie vegetal del sistema. En ocasiones, existen recomendaciones de manuales internacionales que aceptan subir a una relación de 1:4, siempre que esto esté adecuadamente justificado en el diseño siempre y cuando se garantice la estabilidad del talud y de la vegetación existente en él. Se recomienda añadir un escalón perimetral exterior que actúa, además, como amortiguamiento inicial de la escorrentía superficial en aquellos casos en que ésta ingrese al sistema por todo su perímetro exterior.

Dependiendo de los objetivos funcionales que se persigan en el diseño de una cuneta vegetada, la sección transversal de ésta puede estar envuelta perimetralmente por un geotextil o geomembrana que permita o no la infiltración al terreno y limite los movimientos horizontales o verticales de la escorrentía dentro del sistema según corresponda (Figura 27).

Las recomendaciones generales y los criterios mínimos de diseño para el dimensionamiento de una cuneta verde se presentan a continuación:

- Separación con el nivel freático. La distancia mínima con respecto al nivel freático debiera de ser de al menos 1 m, medida desde el punto más bajo de la cuneta vegetada, siempre y cuando se permita la infiltración al terreno subyacente.
- Nivel máximo de lámina de agua superficial. La altura máxima aconsejable de la lámina de agua sobre la superficie vegetada debiera de mantenerse a una distancia vertical mínima de 15 cm con respecto a la parte superior del talud de la cuneta vegetada, permitiendo siempre que haya una altura de resguardo que impida posibles problemas de rebose del sistema que desencadenen situaciones de inundación. Se recomienda que no se alcancen alturas superiores a 45 cm por condiciones de seguridad. Esto limitaría la profundidad máxima de la cuneta vegetada hasta los 60 cm, medidos verticalmente desde la superficie de la capa de vegetación hasta la parte superior del talud.

- Volumen pico de atenuación. En el supuesto de que el área de biorretención sea diseñada con el objetivo de atenuar el volumen pico de lluvia mediante su almacenamiento temporal, puede incluirse una estructura de rebose adicional a la anteriormente descrita asociada con el volumen de tratamiento del primer lavado, que permita la gestión de otros 30 cm extras de altura de lámina de agua superficial sobre la superficie vegetal.
- Vaciado del sistema. En aquellos casos en que la cuneta vegetada permita la presencia temporal de una altura de lámina de agua en superficie, ésta deberá de poder infiltrar completamente a través del sistema en un límite de 48 horas, permitiendo la restauración de la capacidad hidráulica de todas las capas del SUDS. De esta manera, se mantiene una correcta oxigenación de la biota del suelo y de la vegetación presente en el sistema. Mantener esta capacidad de recuperación de la cuneta vegetada es clave para mantener unas condiciones adecuadas de retención de los contaminantes presentes en la escorrentía, así como de su funcionalidad hidrológica.
- Infiltración al terreno subyacente. En el caso de que se den las condiciones adecuadas para infiltrar al terreno subyacente, incluyendo la separación mínima con el nivel freático y la distancia suficiente con las edificaciones contiguas, respetando siempre las distancias mínimas recomendadas en el CTE; el suelo deberá de cumplir, además, la condición de tener una permeabilidad mínima de 10^{-6} m/s para permitir el rápido vaciado del sistema. Se recomienda incluir un estudio geotécnico que muestre los posibles movimientos de la escorrentía dentro del terreno (horizontales y verticales), además de proporcionar la permeabilidad de este.
- Diseño geométrico del sistema. La sección geométrica de una cuneta vegetada puede variar en función de las necesidades de diseño. No obstante, los rangos de diseño para una cuneta con forma trapezoidal suelen ir desde un mínimo de 0,5 m de ancho en la parte inferior de la superficie de la sección transversal de la cuneta hasta los 3 m en aquellos casos de transporte de grandes volúmenes de escorrentía superficial y buena disponibilidad de área de implementación del SUDS dentro de la zona de estudio; si bien, una anchura habitual estaría en el rango de 1 – 3 m. Se recomienda limitar la pendiente longitudinal de la cuneta vegetada a un mínimo de 0,5% y a un máximo de 7 – 10%, utilizando represas a partir de pendientes que superen el 3%. También se recomienda la inclusión de drenajes de fondo en la sub-base de la sección transversal de la cuneta vegetada

en aquellas cunetas con pendientes bajas cercanas al 0,5 – 1%, de forma que se garantice el transporte del flujo tratado a través de las capas de la cuneta vegetada. En el caso de la pendiente del talud lateral de la cuneta vegetada, se recomiendan valores similares a los utilizados en las áreas de biorretención, siendo 1:3 (V:H). Si el espacio lo permite, se pueden hacer taludes más tendidos de 1:4 (V:H). Las longitudes habituales de las cunetas vegetadas suelen oscilar desde los 10 – 20 m en los casos de cunetas más pequeños, hasta los 30 – 60 m en los casos de mayores distancias sin interrupción por un elemento constructivo de conexión con otra cuneta o con elemento de conexión hacia el vertido final.

- Superficie ocupada por la cuneta vegetada. Como norma general de diseño, se suele limitar el área drenada por la cuneta a unos 10.000 – 20.000 m² (Iowa 2009 y City of Townsville 2022). En el caso en que se disponga una cuneta vegetada con sección transversal en forma trapezoidal con taludes 1:3 y una anchura máxima recomendable de 3 m, la anchura total ocupada por la cuneta (incluidos los taludes) sería de 9 m, pudiendo subir hasta los 11 m en casos de taludes más tendidos de 1:4.

Se recomienda seguir el siguiente flujo de diseño (adaptado de City of Townsville 2022 y Woods Ballard et al. 2015):

1. Establecimiento de las condiciones conceptuales de diseño y valores mínimos de volúmenes de tratamiento.
2. Cálculo de los flujos de diseño y caudales picos asociados con los periodos de retorno seleccionados.
3. Dimensionamiento geométrico de la cuneta vegetada considerando las condiciones específicas del lugar de implementación.
4. Diseño de las estructuras de ingreso del flujo de escorrentía de la cuneta vegetada.
5. Comprobación hidráulica del diseño: capacidad hidráulica de la sección transversal, velocidades máximas del flujo de escorrentía superficial, comportamiento del tratamiento de la calidad de aguas, y elementos de seguridad de la cuneta.
6. Definición de las especies vegetales a utilizar y sus densidades de plantación.
7. Establecimiento de actividades de mantenimiento requeridas, incluyendo un plan de mantenimiento y monitorización del sistema durante su vida útil.

Para el cálculo de los caudales pico a utilizar en la cuneta vegetada, se deberá de utilizar el punto 3.3.2 de este manual.

Las comprobaciones hidráulicas para una cuneta vegetada vienen definidas en España por la norma 5.2-IC de drenaje superficial (Ministerio de Fomento 2018), y consisten en los siguientes pasos.

- Capacidad hidráulica de la cuneta vegetada con hipótesis de cálculo basada en elemento lineal de drenaje con régimen uniforme y en lámina libre para la sección llena sin entrada en carga. El caudal que aporta la sección transversal de la cuneta vegetada (Q_{CH}) debe de ser mayor o igual al caudal de proyecto (Q_P) determinado para el periodo de retorno exigido (mínimo de 10 años y recomendado de 25 años, según el presente manual), utilizando la Ec. 29.

$$Q_{CH} = \frac{J^{1/2} \times {R_H}^{2/3} \times S_{max}}{n} \geq Q_P \qquad \text{Ec. 29}$$

  Donde:

  - J = pendiente geométrica longitudinal de la cuneta vegetada (adimensional).
  - R_H = radio hidráulico (m), calculado a partir de la siguiente expresión; $R_H = \frac{S}{p}$
    - Siendo; s = área de la superficie transversal ocupada por la escorrentía superficial en la cuneta vegetada (m^2), y p = perímetro mojado (m).
  - S_{max} = área de la sección transversal de la cuneta vegetada (m^2).
  - n = coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$). Se recomienda el uso de un coeficiente en el rango de 0,033 (vegetación herbácea segada) y 0,040 (vegetación herbácea espesa).

- Velocidad media del flujo de escorrentía superficial circulando por la cuneta vegetada (V_P), la cual debe de ser igual o menor que aquella que produce daños en la cuneta vegetada (V_{Max}) según la Ec. 30, dependiendo de su material constructivo. En el caso de una cuneta vegetada, el rango máximo admisible de velocidades está entre 1,20 y 1,80 m/s.

$$V_P = \frac{Q_P}{S_P} \geq V_{Max} \qquad \text{Ec. 30}$$

Donde:

- S_P = área de la sección transversal ocupada por la escorrentía superficial fluyendo a través de la cuneta vegetada (m²).

4.2.3 Variantes tipológicas

Existen dos tipologías básicas de diseño asociadas con el transporte y el tratamiento. Aquellas cunetas vegetadas que priorizan el transporte reciben el nombre de cunetas vegetadas de transporte y su diseño es el más sencillo de todos los SUDS, no necesitando capas en profundidad bajo la superficie de la cuneta; mientras que, en el caso de considerar, tanto el transporte, como el tratamiento, se deben de incluir capas de filtración bajo la superficie de la cuneta vegetada, dando lugar a dos variantes tipológicas denominadas cunetas vegetadas de tratamiento secas y húmedas.

4.2.3.1 Cunetas vegetadas secas – CUN1

Las cunetas vegetadas secas son cunetas de tratamiento de la calidad de la escorrentía superficial, por lo que no solamente realizan labores de transporte de la escorrentía, sino que llevan a cabo un tratamiento de esta a través de sus capas inferiores, las cuales sirven de filtro para los contaminantes presentes en la escorrentía. Por esa razón, estas cunetas están diseñadas para tener una altura de lámina de agua temporal asociada a la lluvia de diseño del volumen de tratamiento, de una manera muy similar a la ya expuesta en las áreas de biorretención.

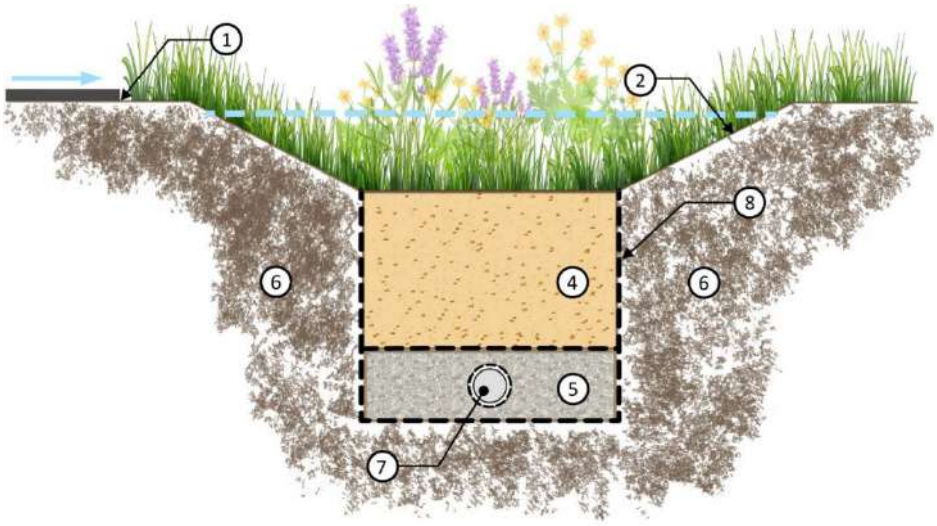


Figura 39. Sección estándar de una cuneta vegetada seca, mostrando sus distintos componentes: (1) Entrada lateral al sistema desde berma amortiguadora de la escorrentía superficial; (2) Talud lateral de la cuneta; (4) Capa de filtro mezcla de arena y materia orgánica; (5) Capa de drenaje; (6) Terreno adyacente; (7) Tubería-dren longitudinal de evacuación de la escorrentía filtrada por la cuneta (optativa si se quiere evacuar el flujo de escorrentía tratado hacia un punto de desagüe en lugar de infiltrar al terreno); (8) Geosintético o geomembrana de filtro para recoger caudales subsuperficiales (en los casos en los que no desee infiltrar al terreno, este geosintético deberá de ser impermeable). Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

4.2.3.2 Cunetas vegetadas húmedas – CUN2

Las cunetas vegetadas húmedas son cunetas de tratamiento de la calidad de la escorrentía superficial, como en el caso de las cunetas vegetadas secas. Sin embargo, en el caso de las húmedas, hay una altura de lámina de agua sobre la superficie vegetada constante en el tiempo. Por tanto, en un evento de lluvia, esta altura se eleva hasta los umbrales determinados por los caudales de periodo de retorno de 10 y 25 años, como se explicó anteriormente en el caso general.

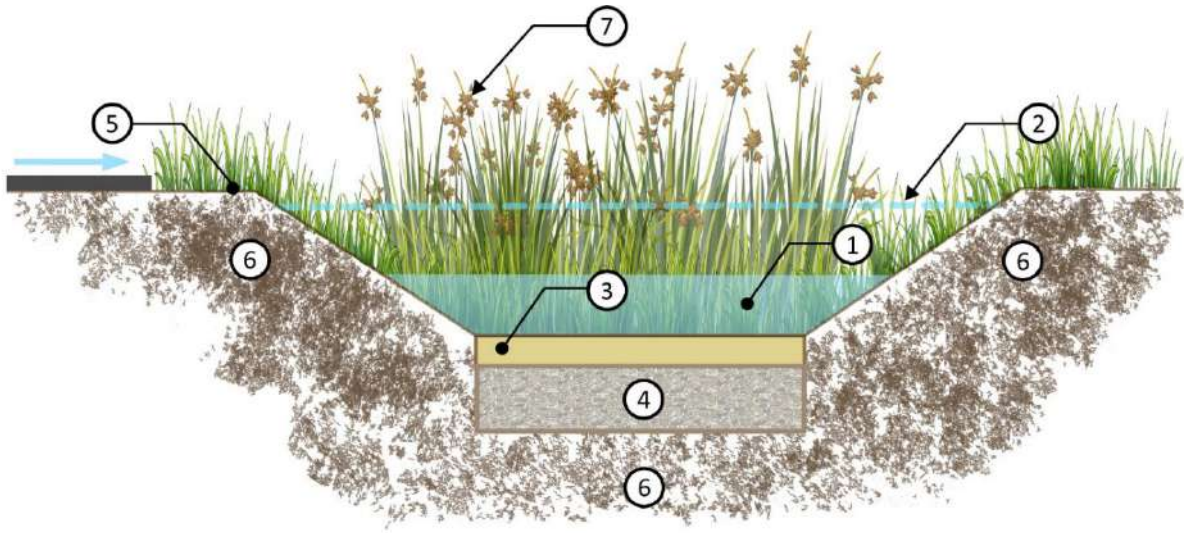


Figura 40. Sección estándar de una cuneta vegetada húmeda, mostrando sus distintos componentes: (1) Capa superficial vegetada y altura máxima de lámina de agua asociada con el volumen de tratamiento de calidad de aguas; (2) Altura máxima de lámina de agua superficial permitida, asociada con el T = 10 años (en ocasiones se puede recomendar subir hasta el T = 25 años si las condiciones de peligrosidad lo recomiendan); (3) Capa de sustrato o mulch; (4) Capa de filtro; (5) Entrada lateral al sistema desde berma amortiguadora de la escorrentía superficial; (6) Terreno adyacente;. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

4.2.4 Operación, mantenimiento y monitorización

Las labores de operación y mantenimiento recomendadas sobre una cuneta vegetada se presentan resumidas en la Tabla 35. Se incluyen dentro de las labores de operación y mantenimiento aquellas relacionadas con las tareas de inspección para comprobar que el SUDS funciona correctamente según el diseño propuesto para su construcción.

Las labores de mantenimiento podrían dividirse entre aquellas planificadas con antelación (preventivas) con el objetivo de detectar reducciones en el comportamiento de algún componente del sistema de manera temprana, y aquellas tomadas tras un fallo del sistema y que requieren medidas correctoras para recuperar la funcionalidad del SUDS (correctoras).

Tabla 35. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en una cuneta vegetada, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Capa superficial de vegetación (*incluye la capa de sustrato vegetal en las cunetas vegetadas de transporte*)	Inspección visual y análisis descriptivo del estado de las especies vegetales	Aparición de enfermedades, crecimiento inadecuado de las especies y presencia de especies invasoras, entre otros	Quincenal (inspección regular)
	Mantenimiento de las especies vegetales a través de labores de poda (*mantenimiento de la altura de diseño*), riego*(1) y recogida de basura	Sequedad de las plantas, arbustos o árboles presentes o de la capa superficial de sustrato, crecimiento desigual de las especies	Quincenal (inspección regular)
	Control de plagas	Presencia de especies animales potencialmente peligrosas o de vectores	Bajo necesidad (medida correctora)
	Reparaciones menores por acumulación de sedimentos en superficie, erosión de la superficie, reemplazo del mulch o escarificación de la capa superior del suelo, y resiembra de especies vegetales	Erosión localizada de la cuneta y presencia de huecos en la vegetación superficial por perdida de la densidad de la cobertura vegetal por aparición de vegetación muerta	Bajo necesidad (medida correctora)
	Revisión del perfil longitudinal y transversal de la cuneta vegetada según diseño	Inestabilidad de los taludes laterales y aparición de charcas localizadas	Bajo necesidad (medida correctora)
Capa de filtro (*cuando se disponga en las cunetas vegetadas de tratamiento secas o húmedas*)	Realizar ensayos de permeabilidad al sistema	Reducción de la permeabilidad inicial de diseño	Anual (inspección ocasional)
	Inspección visual de generación de charcos y determinación de tiempo de vaciado de la lámina de agua superficial en la capa superficial vegetada	Generación de charcos mantenidos en un tiempo superior al de diseño	Quincenal (inspección regular)
	Reemplazo completo de la capa de filtro	Fallo catastrófico del sistema por falta de permeabilidad de la capa de filtro	Bajo necesidad (posiblemente a los 25 años)
Zona de ingreso de la escorrentía superficial	Retirada de residuos y escombros arrastrados por la escorrentía superficial o elementos de entrada y protección frente a la erosión	Aparición de residuos en las zonas de ingreso de la escorrentía superficial a la cuneta vegetada	Quincenal (inspección regular)

	Inspección visual de posibles daños estructurales en las zonas de ingreso de la escorrentía superficial tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños localizados en la cuneta vegetada	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
Elementos de desagüe, incluyendo los drenes perforados de sub-base (*en aquellos diseños en los que se incluyan los drenes perforados*)	Inspección de elementos de desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de transporte y vertido	Obstrucción de tuberías a través de la reducción en el flujo de salida del sistema	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tras evento de lluvia	Reducción de los caudales de salida	Quincenal (inspección regular)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las estructuras de monitorización de su funcionamiento y las de rebose	Mantenimiento de los equipos de instrumentación	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento (mantenimiento regular)
	Comprobación del correcto funcionamiento de las estructuras de rebose del sistema	Eventos de desbordamiento del SUDS en episodios de lluvia	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

*(1) Prestar especial atención durante los primeros 2 años (dependiendo de la tipología de diseño) de desarrollo de la cuneta vegetada.

La monitorización de una cuneta vegetada debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal de entrada y salida de la cuneta vegetada.
- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.).
- Para ello, habría que ejecutar una serie de elementos auxiliares de obra civil que permitan albergar los instrumentos de monitorización, tales como arquetas de

monitorización. Éstas deberían poder contener elementos como los descritos a continuación:

- Vertederos de tipo “v” que permitan obtener el caudal y la velocidad del flujo entrante y saliente a la cuneta vegetada.

En condiciones ideales, se recomienda la instalación de los siguientes instrumentos:

- Instalación de estaciones meteorológicas o de pluviómetros.
- Sensores de altura dispuestos en ambos extremos de la cuneta
- Toma-muestras automáticos de la calidad de aguas.



Figura 41. Instrumentación de una cuneta vegetada mediante sensor de presión para la obtención de la altura de agua en el punto de vertido de una cuneta vegetada, Coventry, Reino Unido. Fuente: Sañudo-Fontaneda et al. (2020).

4.2.5 Referencias especializadas en cunetas vegetadas

4.2.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos

Avery, L.M. Rural Sustainable Drainage Systems (RSuDS). Londres, Reino Unido: Environmental Agency, 2012, ISBN 9781849112772. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. En: Observatorio Ambiental de Bogotá. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Acueducto de Bogotá. Octubre, 4, 2021 [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

City of Townsville. Chapter 2 – Swales (incorporating buffer strips). En: WSUD Technical Design Guidelines for the Coastal Dry Tropics. Townsville, Queensland, Australia, 2022. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

County of Los Angeles Department of Public Works. *Low Impact Development Standards Manual*. Los Angeles, EE. UU.: 2014. Febrero, 1, 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

De la Fuente García, L., Perales Momparler, S., Rico Cortés, M., Andrés Doménech, I., Marco Segura, J. B. *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*. Valencia: Cicle Integral de l'Aigua. Ajuntament de València, 2021. ISBN 978-84-9089-386-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Iowa Department of Natural Resources. Chapter 9. Vegetated swales. En: Iowa Storm Water Management Manual, 2009. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Maryland Department of Environment. *Apéndice B.3. Construction specifications for sand filters, bioretention and open channels*. En: Maryland Stormwater Design Manual, Vols. I and II., 2000. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Montgomery County Department of Environmental Protection. Grass Swale Guide. En: Stormwater facilities. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

North Carolina Department of Environmental Quality. *C-11. Treatment swales*. En: *Stormwater Design Manual*. Noviembre, 20, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 17. Swales*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.2.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión

Abrahams, J., Coupe, S., Sañudo-Fontaneda, L., Schmutz, U. The Brookside Farm Wetland Ecosystem Treatment (WET) System: A Low-Energy Methodology for Sewage Purification, Biomass Production (Yield), Flood Resilience and Biodiversity Enhancement. *Sustainability* 2017, vol. 9, no.1. pp 147. DOI: 10.3390/su9010147 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Andrés-Valeri, V.C., Castro-Fresno, D., Sañudo-Fontaneda, L.A., Rodriguez-Hernandez, J. Comparative analysis of the outflow water quality of two sustainable linear drainage systems. *Water Science and Technology* 2014, vol. 70., no. 8. pp 1341–1347. DOI: 10.2166/wst.2014.382.

Fardel, A., Peyneau, P.-E., Béchet, B., Lakel, A., Rodriguez, F. Analysis of swale factors implicated in pollutant removal efficiency using a swale database. *Environmental Science and Pollution Research* 2019, vol. 26. pp 1287–1302. DOI: 10.1007/s11356-018-3522-9.

Gavrić, S., Leonhardt, G., Marsalek, J., Viklander, M. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment* 2019, vol. 669, no. 15. pp 431–447. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.072.

Horstmeyer, N., Huber, M., Drewes, J.E., Helmreich, B. Evaluation of site-specific factors influencing heavy metal contents in the topsoil of vegetated infiltration swales. *Science of the Total Environment* 2016, vol. 560–561. pp 19–28. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.051.

Jato-Espino, D., Sañudo-Fontaneda, L.A., Andrés-Valeri, V.C. Green Infrastructure: Cost-Effective Nature-Based Solutions for Safeguarding the Environment and Protecting Human Health and Well-Being. En: Hussain, C. (eds) Handbook of Environmental Materials Management. Springer, Cham, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-73645-7_46

Leroy, M.-C., Portet-Koltalo, F., Legras, M., Lederf, F., Moncond'huy, V., Polaert, I., Marcotte, S. Performance of vegetated swales for improving road runoff quality in a moderate traffic urban area. *Science of the Total Environment* 2016, vol. 566–567. pp 113–121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.027.

Lisenbee, W., Hathaway, J., Negm, L., Youssef, M., Winston, R. Enhanced bioretention cell modeling with DRAINMOD-Urban: Moving from water balances to hydrograph production. *Journal of Hydrology* 2020, vol. 582. pp 124491. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124491.

Purvis, R.A., Winston, R.J., Hunt, W.F., Lipscomb, B., Narayanaswamy, K., McDaniel, A., Lauffer, M.S., Libes, S. Evaluating the hydrologic benefits of a bioswale in Brunswick County, North Carolina (NC), USA. *Water* 2019, vol. 11, no. 6. pp 1291. DOI: 10.3390/w11061291. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Rey-Mahía, C., Sañudo-Fontaneda, L.A., Andrés-Valeri, V.C., álvarez-Rabanal, F.P., Coupe, S.J., Roces-García, J. Evaluating the thermal performance of wet swales housing ground source heat pump elements through laboratory modelling. *Sustainability* 2019, vol. 11, no. 11. pp 3118. DOI: 10.3390/su11113118. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Sañudo-Fontaneda, L.A., Roces-García, J., Coupe, S.J., Barrios-Crespo, E., Rey-Mahía, C., Álvarez-Rabanal, F.P., Lashford, C. Descriptive Analysis of the Performance of a Vegetated Swale through Long-Term Hydrological Monitoring: A Case Study from Coventry, UK. *Water* 2020, vol. *12*, no. 10, pp. 2781. DOI: 10.3390/w12102781. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Shafique, M., Kim, R., Kyung-Ho, K. Evaluating the capability of grass swale for the rainfall runoff reduction from an Urban parking lot, Seoul, Korea. *International Journal of Environmenatal Research and Public Health* 2018, vol. 15, no. 3. pp 537. DOI: 10.3390/ijerph15030537. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Suárez-Inclán, A.M., Allende-Prieto, C., Roces-García, J., Rodríguez-Sánchez, J.P., Sañudo-Fontaneda, L.A., Rey-Mahía, C., Álvarez-Rabanal, F.P. Development of a Multicriteria Scheme for the Identification of Strategic Areas for SUDS Implementation: A Case Study from Gijón, Spain. *Sustainability* 2022, vol. *14*, no. 5. pp. 2877. DOI: 10.3390/su14052877. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Young, B.N., Hathaway, J.M., Lisenbee, W.A., He, Q. Assessing the runoffreduction potential of highway swales and WinSLAMM as a predictive tool. *Sustainability* 2018, vol. 10, no. 8. pp. 2871. DOI: 10.3390/su10082871. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.2.5.3 Casos de estudio

SUSDRAIN. Swales. En: *Case studies*. 2022 [acceso 29 enero 2024] Enlace de consulta

U.S. Environmental Protection Agency. *Case Studies Analyzing the Economic Benefits of Low Impact Development and Green Infrastructure Programs*. EPA 841-R-13-004. Agosto, 2013. Enlace de descarga libre

4.3 Cubiertas vegetadas

4.3.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Las cubiertas verdes son un sistema multicapa instalado en los tejados de edificios o estructuras de servicios. El objetivo de este SUDS es capturar las aguas pluviales para su posterior uso, a la vez que las trata a través del efecto filtrante proporcionado por su cubierta vegetal, los medios de cultivo y el suelo, y los materiales agregados incluidos en las capas inferiores de su sección. También proporciona un gran valor estético y de amenidad, aportando valor ecosistémico al crear nuevas zonas verdes. Además, las cubiertas verdes son una de las técnicas de SUDS más estudiadas y utilizadas internacionalmente.

Los tejados verdes suelen consistir en una cubierta vegetal superficial, que se apoya en un sustrato y en un conjunto de capas de drenaje. Bajo la capa de sustrato suele colocarse un geotextil separador que actúa como capa filtrante junto con el lecho granular colocado bajo el geotextil. Debajo se coloca una geomembrana que protege e impermeabiliza la superficie, evitando posibles daños radiculares.



Figura 42. Ejemplo de cubierta vegetada Parc Bit, Mallorca. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica, Núñez Collado et al. (2019).

Las cubiertas verdes/azules ofrecen diversas ventajas, ayudan a reducir la temperatura de las ciudades, mitigando el efecto isla de calor y mejorando el aislamiento de los edificios donde se instalan, lo que a su vez disminuye su consumo de energía. Además, contribuyen a la eliminación de contaminantes atmosféricos y reducen la escorrentía de las aguas pluviales. De hecho, se ha demostrado que las cubiertas verdes retienen más del 50% de la precipitación durante un período de 29 meses. Por último, los tejados

verdes promueven la biodiversidad en el entorno urbano al crear nuevos espacios verdes en la ciudad.

Las cubiertas verdes/azules presentan ciertas limitaciones importantes a considerar. En primer lugar, desde el punto de vista estructural, el edificio debe tener la capacidad de soportar el peso adicional de la cubierta verde, el cual es mayor que el de una cubierta convencional. Además, las cubiertas verdes implican mayores costes tanto en su construcción como en su mantenimiento a lo largo del tiempo. Otro factor a tener en cuenta es que, dependiendo del clima en el que se encuentre la cubierta, puede resultar desafiante mantener la vegetación en un estado óptimo. Por último, es importante tener en cuenta que la capacidad de tratamiento de la escorrentía superficial se limita a la superficie del tejado donde se ha instalado la cubierta. Estas limitaciones se pueden minimizar realizando un correcto diseño, así como una correcta gestión de la infraestructura.

4.3.2 Recomendaciones de diseño

La estructura de una cubierta verde está formada por la superposición de varias capas de diferentes materiales, que permiten obtener una cobertura vegetal y un drenaje óptimo. El diseño de estas cubiertas verdes varía ligeramente según el tipo de cubierta, la ubicación, las condiciones climáticas y los requisitos específicos de cada situación. En general, las cubiertas verdes constan de cinco capas principales, que podrían variar en función de cada diseño:

- Membrana impermeable y barrera anti-raíces: Esta capa interna tiene la función de evitar la filtración de agua hacia la estructura del edificio y prevenir el crecimiento de las raíces que puedan dañarla.
- Capa de drenaje: esta capa permite el paso del agua a través de la cubierta y evita la acumulación excesiva. Suele estar compuesta por materiales porosos que permiten el drenaje.
- Capa filtrante: Esta capa actúa como un filtro, evitando que las partículas finas se laven hacia abajo y obstruyan el sistema de drenaje.
- Medio de crecimiento (sustrato): La cuarta capa consiste en un sustrato o medio de crecimiento que proporciona los nutrientes necesarios para las plantas y retiene la humedad. El sustrato debe ser liviano pero capaz de retener agua y nutrientes para el desarrollo saludable de la vegetación.

- Vegetación: Finalmente, la capa superior está compuesta por las plantas que conforman la cubierta verde. Estas plantas pueden ser especies adaptadas a las condiciones de la cubierta.

Por otra parte, las cubiertas azules, a diferencia de las cubiertas verdes, no incluyen una capa de vegetación, pero siguen una estructura similar de capas para lograr un drenaje adecuado y la gestión sostenible del agua.

Membrana impermeable y barrera anti-raíces

La membrana impermeable es la primera capa sobre la cubierta de los edificios y tiene como principal objetivo evitar filtraciones en el tejado. Debido al contenido de agua en el medio de crecimiento y al alto grado de humedad, las probabilidades de una fuga en una cubierta verde son mucho mayores, por lo que esta capa es una de las más importantes. Además, la reparación de la membrana impermeable, en caso de fuga o avería, va a suponer grandes dificultades al ser de difícil acceso por ser la primera capa, haciendo necesaria la retirada del resto de las capas.

Por tanto, la membrana impermeable es un componente vital en la estructura y debe de ser suficientemente robusta para soportar las cargas que reciba y así alargar la vida útil de las cubiertas verdes. Pueden componerse de una amplia gama de materiales entre los que se incluyen principalmente policloruro de vinilo (PVC) reforzado, caucho sintético, poliolefina termoplástica (TPO), polietileno de alta densidad (HDPE), y asfaltos o bitúmenes modificados.

Justo encima de esta capa impermeable se coloca una barrera anti-raíces. Tiene el objetivo de evitar que las raíces de las plantas puedan penetrar y dañar la membrana impermeable o la estructura de la cubierta del edificio. Se instalarán en todo tipo de tejados ajardinados, pero será especialmente importante en las cubiertas intensivas al tener una vegetación de mayor tamaño y raíces más robustas. En ocasiones, mediante el uso de una capa impermeable apropiada y un correcto diseño se puede evitar su instalación.

Las barreras anti-raíces podrán ser barreras físicas o químicas. En el caso de las barreras químicas se suelen utilizar toxinas como, por ejemplo, productos a base de cobre que impiden la penetración de las raíces. En el caso de las barreras físicas, que son las más habituales, consisten normalmente en una fina capa de polietileno de alta o baja densidad (HDPE o LDPE) o de polietileno (PP).

No se recomienda el empleo de barreras químicas, ya que, si no se realiza un correcto diseño de las mismas, se podrían transmitir estos componentes a la red de drenaje al que se conecte la cubierta.

Capa de drenaje

La capa de drenaje está colocada por encima de la barrera anti-raíces y la membrana impermeable. Su principal función es la de drenar y evacuar el exceso de agua que pudiera haber en la cubierta y el sustrato para evitar que se dañe la membrana impermeable o colapse la estructura del edificio. Asimismo, esta capa también puede ser diseñada para retener y almacenar volúmenes específicos de agua, consiguiendo gestionar grandes cantidades de agua de lluvia y reducir la escorrentía superficial que se genera en las ciudades. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento de agua permite mantener el sustrato y las plantas con una cierta cantidad de agua y un cierto grado de humedad, incluso en épocas de escasez de lluvias.

Existen infinidad de soluciones y materiales para aplicar a las capas de drenaje, pero principalmente se pueden agrupar las capas drenantes en dos grandes grupos:

- Paneles modulares o tableros de drenaje hechos con agujeros para almacenar una mayor cantidad de agua mientras permiten un correcto drenaje. Suelen estar fabricados en materiales sintéticos o plásticos como el polietileno o poliestireno.
- Materiales granulares de drenaje de gran porosidad para almacenar mayores volúmenes de agua. Algunos de los materiales granulares más habituales son, por ejemplo, agregados ligeros de arcilla expandida o arlita, esquisto expandido, ladrillo triturado, grava gruesa y gravilla.

Filtro textil

La capa filtro es utilizada para separar el medio de crecimiento de la capa de drenaje, con el principal objetivo de evitar que las partículas finas del sustrato o detritus vegetales se infiltren durante el proceso de drenaje junto con el agua causando el bloqueo de la capa drenante. De igual modo, este filtro textil permite mantener el medio de crecimiento en su sitio evitando que se mueva. Incluso puede actuar como una primera barrera anti-raíces que ayuda a conservar la integridad de toda la estructura de la cubierta verde.

Como filtro textil por lo general se suelen utilizar geotextiles, y su uso está ampliamente extendido en el mundo de las SUDS y las cubiertas verdes. Los geotextiles tienen una gran resistencia a la tracción y una alta permeabilidad que permite el flujo de agua hacia la capa de drenaje. Las características y propiedades de estos materiales van a permitir

la separación de las partículas más finas, el refuerzo y control de la erosión del sustrato, el filtrado del agua y la mejora del drenaje.

Medio de crecimiento (sustrato)

La mayoría de los beneficios de las cubiertas verdes están relacionados con el sustrato, como por ejemplo la mejora de la calidad del agua, la reducción del agua de escorrentía y de los caudales pico, o la mejora térmica de los edificios. Además, esta capa tiene la función de mantener viva la vegetación aportando los nutrientes y la cantidad de agua que las plantas necesitan para el desarrollo de sus funciones biológicas. Adicionalmente, el medio de crecimiento debe de proporcionar espacio suficiente para albergar las raíces de las plantas y permitir su fortalecimiento para así soportar y aguantar las fuerzas del viento u otras condiciones meteorológicas adversas

El espesor de esta capa va a variar considerablemente en función del tipo de cubierta verde instalada (intensiva o extensiva). En cualquier caso, las limitaciones de peso, para evitar el colapso de la estructura, serán determinantes en la composición del medio de crecimiento, tratando de minimizarlo al máximo. Por otro lado, el sustrato debe tener el mineral orgánico suficiente para proveer a las plantas de nutrientes. Ante estas necesidades, existen distintas alternativas como medio de crecimiento, pero todas tienen algo en común: una baja densidad aparente (especialmente en edificios antiguos) y una cantidad idónea de material orgánico que aporte nutrientes.

El sustrato es una combinación de material orgánico (abono, madera, turba, paja orgánica, hojas, etc.) e inorgánico (arlita, roca volcánica, etc.) en las correctas proporciones, ya que un exceso de materia orgánica podría resultar perjudicial para la cubierta verde. Se recomienda que el contenido en materia orgánica para una cubierta extensiva sea de 4-8%, y de 6-12% para una cubierta intensiva.

El medio de crecimiento ideal es aquel que pueda cumplir con las siguientes características: óptima capacidad de retención de agua y mejora de su calidad; buen drenaje y aireación; alta conductividad hidráulica; capacidad de retención de nutrientes; gran estabilidad bajo diferentes condiciones; y mínimo peso.

Vegetación

Junto con el medio de crecimiento, la vegetación es un punto clave para conseguir los beneficios deseados en una cubierta verde. Esta capa vegetal va a ayudar a mitigar el "efecto isla de calor", mejorar la calidad del aire y la calidad del agua de escorrentía, restauración paisajística y mejora de la biodiversidad. Además, también van a regular la

escorrentía del agua de lluvia atenuándola mediante procesos de retención y evapotranspiración.

El tipo de vegetación y plantas usadas en una cubierta verde van a depender de distintos factores. En este sentido, se debe considerar la localización geográfica, la intensidad de lluvias, la humedad, el viento y la exposición de sol. El espesor de la capa de sustrato, y por tanto el tipo de cubierta elegida, también es un factor determinante a la hora de seleccionar el tipo de vegetación. Sin embargo, en cualquiera de las situaciones dadas, la vegetación de una cubierta verde tiene que cumplir con una serie de características básicas como son la resistencia a las sequías; sistemas de raíces poco profundas; cualidades regenerativas; y resistencia a la radiación directa, a las heladas y al viento.

A grandes rasgos, se puede diferenciar entre la vegetación utilizada en cubiertas extensivas e intensivas. Las plantas de tipo sedum son la opción más utilizada para las cubiertas extensivas por tener unas propiedades idóneas; así como los musgos y cualquier otro tipo de vegetación perenne que no requiera muchos cuidados y mantenimiento. Por otra parte, en las cubiertas intensivas el abanico de elección es mucho más amplio, abarcando pastos, hierbas, arbustos, árboles pequeños, e incluso pequeños árboles frutales u hortalizas.

Tanto para la vegetación de cubiertas extensivas como para las intensivas, se recomienda que se utilicen plantas locales, porque son fácilmente accesibles y se mejora y conserva la biodiversidad local. Además, son plantas que ya están adaptadas a las condiciones climáticas locales, resistiendo mejor a las inclemencias meteorológicas y mejorando el rendimiento de las cubiertas verdes.

Las recomendaciones generales y los criterios mínimos de diseño para el dimensionamiento de una cubierta verde/azul se presentan a continuación:

- Medio de crecimiento: Se recomienda que la fracción orgánica máxima del medio sea del diez por ciento en volumen. Se aconseja que la profundidad mínima del sustrato sea de 10 cm.
- Volumen de diseño: El volumen de diseño de una cubierta vegetal será igual a la profundidad del medio multiplicada por el agua disponible para las plantas.
- Pendiente de la cubierta: La cubierta deberá tener una pendiente (o inclinación) no superior al ocho por ciento, a menos que se utilicen sistemas de contención. Para cubiertas con pendientes inferiores al dos por ciento, se recomienda colocar un geotextil y una capa de drenaje debajo del sustrato.

- Perímetro: En el caso de las cubiertas verdes, se recomienda la colocación de una franja perimetral de grava, protegiendo así la estructura del edificio.

4.3.3 Variantes tipológicas

Dentro de los SUDS, existen dos grandes tipologías de cubiertas, las verdes y las azules, en función de si cuentan con vegetación o no. Esta diferencia influye en la estructura tipo de la cubierta, así como en el funcionamiento de la misma.

Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes cuentan con una capa superior de sustrato y vegetación, pudiéndose dividir a su vez en dos tipos principales:

Cubiertas verdes extensivas. En los tejados verdes extensivos, toda la superficie del tejado se cubre con vegetación resistente, de crecimiento lento, de bajo mantenimiento y, a ser posible, tolerante a la sequía. Por ejemplo, se suelen utilizar musgos, hierbas o gramíneas. Las cubiertas pueden ser planas o inclinadas y tener un peso ligero.

Cubiertas verdes intensivas. Estas cubiertas están diseñadas para albergar una mayor biodiversidad, proporcionando importantes beneficios paisajísticos y recreativos. A menudo se utiliza una gran variedad de plantas, como hierbas, arbustos o árboles. Estos tipos de cubiertas también pueden incluir elementos de almacenamiento de agua, es decir, elementos de cubierta azul. Este tipo de cubiertas tienen un mayor peso, por lo que hay que tener en cuenta consideraciones estructurales.

Además, existe un tercer tipo de cubierta, denominada cubierta semi-intensiva, que es un tipo intermedio entre los dos anteriores.

Cubiertas azules

Las cubiertas azules, no cuentan con la capa superior de vegetación y sustrato, sino que se instala un material granular en la parte superior de la misma. Esta tipología permite almacenar grandes volúmenes de agua, siendo necesario realizar un mantenimiento inferior a las cubiertas verdes, al no poseer vegetación.

La estructura de las cubiertas azules es más sencilla que la de los techos verdes, pero la sucesión de las distintas capas en el fondo se asemeja bastante. En este caso, de abajo a arriba, se encuentra una primera capa impermeable que impide el paso e infiltración del agua hacia la cubierta del edificio. Al no tener vegetación que lleve consigo la presencia de raíces no será necesaria la instalación de una barrera anti-raíces que proteja a la capa

impermeable. Seguidamente, se coloca la capa de drenaje y almacenamiento utilizando los mismos materiales que para las cubiertas verdes.

Finalmente, la última capa (capa superior) está compuesta por material granular como árido calizo, arlita o áridos reciclados. Con el propósito de evitar la colmatación de la capa de drenaje se coloca un filtro textil de protección. Por otra parte, en algunas ocasiones la capa superior de material granular hace a su vez la función de capa de drenaje y almacenamiento, convirtiéndose la cubierta azul en un sistema de únicamente dos capas (capa impermeable, y capa superior y de drenaje).

Los beneficios de las cubiertas azules son prácticamente los mismos que los que se les atribuyen a las cubiertas verdes. Sin embargo, existen algunas diferencias. El principal punto negativo de estas cubiertas con respecto a las cubiertas verdes es que, al no haber un medio natural y vegetación en la superficie superior, los beneficios imputables a la mejora de la calidad del aire de manera directa no serán apreciables. En cambio, la simplicidad de las cubiertas azules hace que resulten más baratas y la inversión inicial sea menor.



Figura 43. Modelos experimentales de cubiertas vegetadas y azules en la zona piloto de SUDS del Grupo de Enxeñería da Auga y do Medio Ambiente (GEAMA), Universidade da Coruña. Fotografía: Cortesía de Roberto Valcarce Vuelta.

4.3.4 Operación, mantenimiento y monitorización

Las labores de operación y mantenimiento recomendadas para una cubierta verde/azul se presentan resumidas en la Tabla 36. Se incluyen dentro de las labores de operación y

mantenimiento aquellas relacionadas con las tareas de inspección para comprobar que la técnica SUDS funciona correctamente según el diseño propuesto para su construcción.

Las labores de mantenimiento podrían dividirse entre aquellas planificadas con antelación (preventivas) con el objetivo de detectar reducciones en el comportamiento de algún componente del sistema de manera temprana, y aquellas tomadas tras un fallo del sistema y que requieren medidas correctoras para recuperar la funcionalidad del SUDS (correctoras).

Además, las labores de mantenimiento se deberán ajustar al diseño de cubierta realizado, prestando especial atención a la existencia o no de vegetación y al tipo de vegetación, atendiendo a las diferentes sub-tipologías de cubiertas.

Tabla 36. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en una cubierta verde/azul, incluyendo inspecciones de comprobación de su funcionamiento.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Capa superficial de vegetación (*incluye la capa de sustrato vegetal***)**	Inspección visual y análisis descriptivo del estado de las especies vegetales	Aparición de enfermedades, crecimiento inadecuado de las especies y presencia de especies invasoras, entre otros	Quincenal (inspección regular)
	Mantenimiento de las especies vegetales a través de labores de poda (*mantenimiento de la altura de diseño*) y riego*(1)	Sequedad de las plantas, arbustos o árboles presentes o de la capa superficial de sustrato, crecimiento desigual de las especies	Quincenal (inspección regular)
	Control de plagas	Presencia de especies animales potencialmente peligrosas o de vectores	Bajo necesidad (medida correctora)
	Reparaciones menores por acumulación de sedimentos en superficie, erosión de la superficie, reemplazo del mulch o escarificación de la capa superior del suelo, y resiembra de especies vegetales	Erosión localizada y presencia de huecos en la vegetación superficial por perdida de la densidad de la cobertura vegetal por aparición de vegetación muerta	Bajo necesidad (medida correctora)
Capa de filtro	Realizar ensayos de permeabilidad al sistema	Reducción de la permeabilidad inicial de diseño	Anual (inspección ocasional)
	Inspección visual de generación de charcos y determinación de tiempo de vaciado de la lámina de agua superficial en la capa superficial vegetada	Generación de charcos mantenidos en un tiempo superior al de diseño	Quincenal (inspección regular)
	Reemplazo completo de la capa de filtro	Fallo catastrófico del sistema por falta de permeabilidad de la capa de filtro	Bajo necesidad (posiblemente a los 25 años)

Elementos de desagüe, incluyendo elementos de alivio y bajantes de drenaje	Inspección de elementos de desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de transporte y vertido	Obstrucción de tuberías a través de la reducción en el flujo de salida del sistema	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tras evento de lluvia	Reducción de los caudales de salida	Quincenal (inspección regular)
Membrana impermeable y barrera anti-raíces	Inspección visual de posibles filtraciones o humedades en la parte inferior del forjado de cubierta	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en la superficie de la membrana impermeable y la barrera anti-raíces	Aparición de daños en la integridad	Anual (inspección ocasional)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las estructuras de monitorización de su funcionamiento y las de rebose	Mantenimiento de los equipos de instrumentación	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento (mantenimiento regular)
	Comprobación del correcto funcionamiento de las estructuras de rebose del sistema	Eventos de desbordamiento del SUDS en episodios de lluvia	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

*(1) Prestar especial atención durante los primeros 2 años (dependiendo de la tipología de diseño) de desarrollo de la cubierta vegetada.

La monitorización de una cubierta verde/azul debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal de entrada y salida del sistema.
- Medida de los contaminantes de entrada y salida del sistema para el análisis del grado de eficiencia en la eliminación de dichos contaminantes.
- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.) como contexto para un correcto análisis del comportamiento de los firmes permeables.

En este tipo de instalaciones se deberá prestar especial atención, durante las labores de mantenimiento y monitorización, a las medidas de seguridad para garantizar la seguridad de los trabajadores y preservar la integridad de la cubierta. Para ello se deberá diseñar la cubierta incluyendo las medidas de seguridad necesarias, tales como barandillas perimetrales, líneas de vida, etc.

4.3.5 Referencias especializadas en cubiertas vegetadas

4.3.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. En: Observatorio Ambiental de Bogotá. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Acueducto de Bogotá. Octubre, 4, 2021 [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

De la Fuente García, L., Perales Momparler, S., Rico Cortés, M., Andrés Doménech, I., Marco Segura, J. B. *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*. Valencia: Cicle Integral de l'Aigua. Ajuntament de València, 2021. ISBN 978-84-9089-386-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Grupo Técnico de Techos Verdes. *Recomendaciones técnicas para proyectos de cubiertas vegetales*, 2010. Santiago de Chile.

Iowa Department of Natural Resources. Chapter 17. Green roofs. En: Iowa Storm Water Management Manual, 2009. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Núñez Collado, A., Salgado Cámara, A., Martín Anta, D., Prieto Leache, I., Montoya Rodríguez, J., Ferreriro Gómez, P., Soler Gómez, V. Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Madrid: Ministerior para la Transición Ecológica. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2019. NIPO 638-18-030-2. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 17. Swales*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.3.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión

Hathaway, A. M., Hunt, W. F., & Jennings, G. D. (2008). A field study of green roof hydrologic and water quality performance. Transactions of the ASABE, 51(1), 37-44.

Rey-Mahía, C.; Álvarez-Rabanal, F.P.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Hidalgo-Tostado, M.; Menéndez Suárez-Inclán, A. An Experimental and Numerical Approach to Multifunctional Urban Surfaces through Blue Roofs. *Sustainability* 2022, *14*, 1815. https://doi.org/10.3390/*su14031815*.

Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 90, 2018, Páginas 757-773, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006.

Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. Journal of Hydrology, 414-415, 148-161. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.022.

Stovin, V., Vesuviano, G., & De-Ville, S. (2017). Defining green roof detention performance. Urban Water Journal, 14(6), 574-588. doi:10.1080/1573062X.2015.1049279.

4.3.5.3 Casos de estudio

SUSDRAIN. Green roofs. En: *Case studies*. 2022 [acceso 29 enero 2024] Enlace de consulta

U.S. Environmental Protection Agency. *Case Studies Analyzing the Economic Benefits of Low Impact Development and Green Infrastructure Programs*. EPA 841-R-13-004. Agosto, 2013. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

4.4 Firmes permeables

4.4.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Los firmes permeables son técnicas de ingeniería multicapa capaces de captar el agua de lluvia y la escorrentía superficial procedente de las superficies impermeables adyacentes en origen, así como de filtrarlas a través de cada una de sus capas, reduciendo significativamente los contaminantes y promoviendo la infiltración al terreno y/o el almacenamiento en función de si son diseñados a tales efectos; pudiendo, además, ser o no resistentes al tráfico rodado de vehículos.

Los firmes permeables se aplican principalmente en plazas, zonas peatonales, carriles bici, viales para vehículos ligeros, y aparcamientos (ver Figura 44), entre otras opciones; pudiendo emplearse en instalaciones portuarias con una modificación sustancial de sus capas estructurales.



Figura 44. Ejemplo de pavimento permeable implementada para gestionar las aguas pluviales del aparcamiento y de la escorrentía superficial procedente de la cubierta de la edificación adyacente en North Carolina, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo.

El mecanismo principal de captación de los firmes permeables es superficial, tal y como se define en la Tabla 6, siendo las funciones hidrológicas principales las de filtración e infiltración (cuando se diseñe con ese objetivo). Además de dichas funciones, cabe

destacar otros mecanismos de tratamiento de los contaminantes como la retención, con especial importancia cuando los firmes permeables se diseñen con la función principal de llevar a cabo un drenaje diferido al sistema convencional. Asimismo, los firmes permeables pueden proporcionar el mecanismo biológico de biofiltración en aquellos diseños que incluyan una capa de geotextil que permita el crecimiento biológico de microorganismos encargados de la biodegradación de hidrocarburos.

Los firmes permeables se han convertido en una de las prácticas SUDS más extendidas por todo el mundo dada su robustez y cercanía en cuanto a sus procesos constructivos y diseño a otras superficies urbanas pavimentadas. Los firmes permeables contribuyen a un aumento del tiempo de concentración de la cuenca de drenaje, permitiendo una mayor estancia dentro del sistema y, por tanto, aumentando su capacidad de tratamiento. Los firmes permeables pueden diseñarse para pendientes superiores al 5%, utilizando barreras consistentes en la construcción de terrazas sucesivas en la capa sub-superficial que permitan reducir las velocidades del flujo de escorrentía dentro del sistema y que eviten que el flujo de agua resurja superficialmente. No obstante, se recomienda su uso en superficies que tiendan a la horizontalidad.

Estas técnicas SUDS se han llegado a probar en condiciones extremas de bajas temperaturas expuestas a ciclos de hielo y deshielo, mostrando un buen comportamiento debido a que el agua de escorrentía filtra rápidamente a través de las capas superficiales y se almacena temporalmente en la sub-base, lejos de las áreas afectadas por el hielo.

4.4.2 Recomendaciones de diseño

Los firmes permeables se diseñan habitualmente con el objetivo de captar la escorrentía procedente del área drenada impermeable y la lluvia directa sobre su superficie, filtrándola de forma unidimensional vertical a través de todas sus capas, rellenando parcialmente los huecos de las capas de áridos inferiores, fomentando el almacenamiento temporal de la misma dentro del sistema. En ocasiones pueden darse flujos de escorrentía sub-horizontales cuando el firme permeable colabore en el drenaje de cubiertas de edificaciones adyacentes y dicha escorrentía entre al sistema por debajo de la superficie.

Los firmes permeables pueden formar parte de un tren de tratamiento, siendo habitual su inclusión como sistema de final de línea o de secuencia, trabajando juntamente con cubiertas vegetadas y azules, áreas de biorretención, cunetas vegetadas y alcorques estructurales (ver

Tabla 7). Existe la posibilidad de utilizar los firmes permeables como primer elemento del tren de tratamiento en combinación con sistemas de almacenamiento que permitan reutilizar el agua de escorrentía tratada para usos no potables como riego de parques y jardines cercanos.

Se debe incluir en el diseño del firme permeable una estructura de alivio a la red de drenaje convencional o hacia cauce natural según corresponda, de forma que se eviten posibles eventos de inundación del SUDS hacia las áreas contiguas en caso de verse desbordado por una lluvia superior a la de diseño o por un potencial mal funcionamiento que requiera de labores de mantenimiento reactivo.

Las capas estándar de un firme permeable y sus funciones principales son las siguientes:

- Capa superficial (capa de rodadura en caso de tráfico vehicular). La capa define la variante de firme permeable al poder estar compuesta de superficies continuas como mezclas bituminosas porosas y hormigones porosos, y superficies discontinuas como adoquines porosos, adoquines impermeables en disposición permeable, y césped reforzado con celdas de plástico u hormigón. Cada variante tipológica y sus características serán tratadas en el punto 4.4.3. Los espesores habituales de esta capa varían en función de las características resistentes estructurales y de la capacidad de infiltración de ésta, encontrándose en rangos habituales entre 8 y 10 cm. El mecanismo de tratamiento de la escorrentía cambia en función de la variante tipológica utilizada (ver 4.4.3).
- Capa de base. La capa de base se diseña con el objetivo de servir de superficie de apoyo estable y nivelada para el pavimento permeable utilizado en la capa superficial del SUDS. Con ese objetivo, se utiliza un árido de diámetro de tamaño máximo de partícula en un rango entre 4 y 6 mm, evitando el uso de finos que puedan impedir el paso del flujo de escorrentía superficial captada y filtrada a través de la capa superior. La porosidad de esta capa suele alcanzar valores en el rango del 40-50% del volumen ocupado por la capa.
- Geotextil de filtración (opcional). Esta capa se sitúa entre las capas de base y de sub-base con el doble objetivo de servir de separación entre capas de áridos de diferente rango granulométrico, aportando estabilidad estructural; y de capa de tratamiento biológico del firme permeable, ya que investigaciones previas como las de Coupe et al. (2003) y Gómez-Ullate et al. (2010) han demostrado que un firme permeable puede trabajar como una cámara de biodegradación aeróbica,

estando concentrada la actividad microbiológica en el geotextil, y permitiendo la biodegradación de los hidrocarburos presentes en la escorrentía superficial.

- Capa de sub-base. La capa de sub-base está compuesta de árido grueso de tipo grava con diámetro máximo de tamaño de partículas entre 20 y 40 mm sin finos, alcanzando porosidades superiores al 33%. La sub-base puede ejecutarse sustituyendo el árido por estructuras reticulares de tipo caja o celda, aumentando el volumen de huecos hasta valores superiores al 90-95%. El espesor de la capa de sub-base se suele dimensionar a través de la siguiente expresión presentada en la Ec. 31.

$$e_{sub-base} = \frac{Lluvia\ de\ diseño}{n_{sub-base}} \times Ratio \qquad \text{Ec. 31}$$

Donde:

  - $e_{sub-base}$ = Espesor de la capa de sub-base en mm.
  - $Lluvia\ de\ diseño$ = requerimiento mínimo de tratamiento y almacenamiento en mm.
  - $n_{sub-base}$ = Porosidad del material utilizado en la capa de sub-base.
  - $Ratio$ = Ratio entre la superficie drenada y superficie ocupada por el firme permeable.

- Capa de drenaje (opcional). La capa de drenaje o colector subterráneo se utiliza para captar el agua filtrada por el sistema a través de sus capas superiores y conducirlo hacia la arqueta de conexión con el colector de desagüe trabajando en conexión con el sistema de drenaje convencional. El colector subterráneo es una tubería perforada que permite la rápida evacuación del volumen de escorrentía filtrada cuando el firme permeable se diseña con la funcionalidad de drenaje diferido al sistema convencional o de almacenamiento. En el caso de diseñar el SUDS con el objetivo final de infiltrar al terreno, pero se dispone de suelos con poca capacidad de infiltración, se recomienda añadir un codo invertido trabajando solidariamente con el colector subterráneo de forma que genere un volumen extra de almacenamiento en el sistema mientras éste logra ir vaciando el volumen de agua mediante una infiltración más lenta al terreno subyacente. El orificio de salida del colector subterráneo conectado con la arqueta de desagüe del sistema se dimensiona a través de las siguientes expresiones matemáticas recogidas en la Ec. 32 y en la Ec. 33.

$$A_0 = \left[h_0^{\frac{1}{2}} - h^{\frac{1}{2}}\right] \times \left(\frac{2}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{A_{firme} \times n_{sub-base}}{C_d \times t}\right] \quad \text{Ec. 32}$$

Donde:

- A_0 = Área del orificio de salida a la arqueta de desagüe en mm².
- h_0 = Altura inicial del agua medida desde el centro del orificio (mm).
- h = Altura final del agua medida desde el centro del orificio (mm).
- g = valor de la gravedad (9,81 m/s²).
- A_{firme} = Área ocupada por el firme permeable (m²).
- $n_{sub-base}$= porosidad del material utilizado en la capa de sub-base (*zona de almacenamiento*).
- C_d = Coeficiente de descarga del orificio (*se recomienda el uso del valor 0,6*).
- t = tiempo de drenaje (s).

$$A_0 = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde:

- A_0 = Área del orificio de salida a la arqueta de desagüe en mm².
- D = Diámetro del orificio (mm).

- Geotextil o geosintético de impermeabilización (opcional). Si el sistema se diseña para evitar la impermeabilización al terreno con objetivo de almacenamiento y posterior drenaje diferido al sistema de drenaje convencional, se recomienda el uso de un geosintético de impermeabilización envolviendo la estructura del firme permeable.

Además de las capas anteriormente expuestas, se deben añadir los siguientes elementos constructivos complementarios al diseño con sus respectivas funciones asociadas también con la operación, mantenimiento y monitorización del sistema (Figura 45):

- Arqueta de monitorización. La arqueta de monitorización sirve como elemento de control del funcionamiento hidrológico y de tratamiento de contaminantes del sistema, permitiendo la instalación de los instrumentos de monitorización de los caudales de salida, la medición de los contaminantes tras ser filtrados por el sistema, y la actividad biológica mediante la medición de la respiración a través de los valores de CO_2. La arqueta de monitorización contiene también la tubería de fondo de conexión con el drenaje convencional y el sistema de medición de la altura de agua almacenada en la sub-base del firme permeable.

- Elemento o estructura de rebose. Se trata de un elemento constructivo auxiliar al firme permeable que permite la evacuación del volumen de escorrentía superficial una vez que la capacidad de almacenamiento del firme se ha visto superada mediante el llenado de la capa de sub-base. Dicha estructura consta de una tubería de rebose que direcciona dicho flujo excedente hacia la arqueta de desagüe a drenaje convencional del firme permeable. El objetivo fundamental de este elemento de rebose es evitar que el flujo de agua regrese a la superficie provocando potenciales problemas de inundaciones en caso de ocurrencia de varios eventos de lluvia consecutivos.
- Elementos de desagüe del sistema. Existen varios componentes que permiten evacuar el agua de escorrentía tratada hacia el exterior del firme permeable, ya sea hacia el terreno subyacente mediante infiltración o hacia la red de drenaje convencional como drenaje diferido.
    - *Tubería-dren*. Tubería de fondo perforada situada bajo la capa de sub-base, y diseñada para evacuar el agua tratada por el sistema mediante su filtración por las capas superiores, direccionándola habitualmente hacia un elemento de conexión tipo arqueta, donde este flujo puede conectarse con el sistema de drenaje convencional. También puede diseñarse para proporcionar un volumen extra de atenuación durante un evento de lluvia mientras se produce la infiltración al terreno.
    - *Área de vertido*. Zona de tratamiento final en caso de vertido a cauce natural, la cual deberá de definirse en función del tratamiento proporcionado y de los valores máximos de vertido permitidos por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico.
    - *Conexión con otro SUDS*. Tubería de conexión entre el firme permeable y un segundo SUDS que permitiría aumentar las posibilidades de tratamiento tal y como se describe en el punto 8.3.1 y en la Tabla 14, así como entre un primer SUDS y un firme permeable situado como tratamiento pasivo de final de línea del tren de tratamiento.

Dependiendo de los objetivos funcionales que se persigan en el diseño de una firme permeable, la sección transversal de éste puede estar envuelta perimetralmente por un geotextil o geomembrana que permita o no la infiltración al terreno y limite los movimientos verticales del flujo de la escorrentía filtrada (Figura 45).

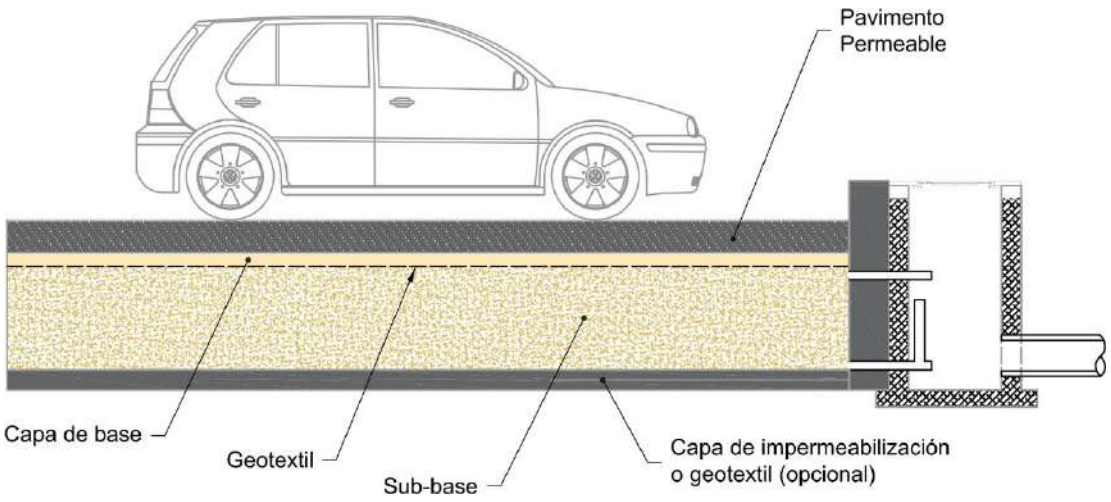


Figura 45. Sección estándar de un firme permeable, mostrando sus distintos elementos. Fuente: infografía diseñada por el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

Las recomendaciones generales y los criterios mínimos de diseño para el dimensionamiento de una cuneta verde se presentan a continuación:

- Ratio área drenada vs superficie ocupada por el firme permeable. Existen diversas recomendaciones en cuanto al ratio a conservar entre el área drenada por el firme permeable y la superficie del propio firme, contando el área ocupada por el propio firme permeable dentro del área a drenar. Por tanto, el mínimo ratio sería de 1:1, representando que no hay entrada de escorrentía superficial de zonas exteriores al firme permeable y que toda el agua filtrada por el propio firme proviene de la lluvia directa cayendo sobre la superficie del firme permeable. Valores de ratios máximos recomendados pueden alcanzar relaciones de 6 a 1 y de 9 a 1, cuando la economía para la construcción del firme permeable obligue a ello, siendo deseable que la ratio no supere la relación de 2 a 1, con especial atención a aquellas escorrentías superficiales procedentes de pavimentos impermeables contiguos para evitar los problemas de colmatación de la superficie del firme derivados del transporte de sedimentos en la escorrentía. Por último, es importante destacar que, a mayor ratio utilizado en el diseño, mayor deberá de ser la capa subsuperficial de almacenamiento temporal de la escorrentía, ya que el volumen de gestión de pluviales aumentará de manera considerable.
- Separación con el nivel freático. La distancia mínima con respecto al nivel freático debiera de ser de al menos 1 m, medida desde el punto más bajo de la última capa del firme permeable, siempre y cuando se permita la infiltración al terreno subyacente. Varios manuales permiten alcanzar los 60 cm, recomendando no

considerar la posibilidad de utilizar firmes permeables cuando se baje a valores estables del nivel freático próximos a los 30 cm. En consecuencia, no se recomienda utilizar firmes permeables en zonas con un nivel freático muy cercano a la superficie.

- Capacidad de infiltración superficial. La capacidad de infiltración de un firme permeable viene limitada por su capa superficial y, por tanto, viene definida por el tipo de material utilizado como pavimento. En consecuencia, la capacidad de infiltración del pavimento permeable debe de ser superior a 2.500 mm/h según las recomendaciones de prácticas previas en España. Si bien, este valor es elevado y las recomendaciones internacionales sitúan el límite para la formación de escorrentía superficial en firmes permeables en torno a los 100 mm/h. Por tanto, se recomienda no bajar de ese valor durante su vida útil, teniendo en cuenta que la capacidad de infiltración de un firme permeable se irá reduciendo conforme avanzan los años dependiendo de la ratio de sedimentación del área de implementación. Se recomienda cuidar este aspecto mediante un mantenimiento proactivo.
- Volumen de atenuación/almacenamiento: el volumen o capacidad máxima de almacenamiento se logra a través de una capa de sub-base de árido, cuya naturaleza depende habitualmente del árido disponible en la zona de implementación. Dicha sub-base suele tener un espesor de capa entre 20 y 35 cm y un porcentaje de huecos igual o superior al 33%, en función de la capacidad estructural deseada y del volumen de atenuación/almacenamiento buscado. De la misma manera, si el objetivo que se busca es incrementar la capacidad de almacenamiento, se puede sustituir el árido por estructuras reticuladas prefabricadas que permitan alcanzar valores de almacenamiento superiores al 90% del volumen ocupado por la capa de sub-base.
- Infiltración al terreno subyacente. En el caso de que se den las condiciones adecuadas para infiltrar al terreno subyacente, incluyendo la separación mínima con el nivel freático y la distancia suficiente con las edificaciones contiguas, respetando siempre las distancias mínimas recomendadas en el CTE; el suelo subyacente a la sub-base del firme permeable puede contribuir en aumentar la capacidad de atenuación del sistema, siendo especialmente relevante bajo condiciones de lluvias extremas de gran intensidad. Se recomienda incluir un estudio geotécnico que muestre los posibles movimientos de la escorrentía dentro del terreno (horizontales y verticales), además de proporcionar la

permeabilidad de este. La capacidad de infiltración del suelo será un factor limitante para el cálculo del volumen de atenuación, ya que al ser generalmente inferior a la ratio de filtración de la sub-base, generará una altura de agua dentro de la misma durante episodios intensos de lluvias o en situaciones de eventos de precipitaciones consecutivas donde no ha habido tiempo suficiente de vaciado del sistema.

- Vaciado del sistema. Se recomienda diseñar la estructura del firme permeable de forma que se pueda vaciar el agua almacenada (cuando ello sea necesario por la llegada de eventos de lluvia de alta intensidad consecutivos) en menos de 24 horas con el objetivo de mantener la capacidad de atenuación de los volúmenes pico de la escorrentía superficial.
- Diseño geométrico del sistema. El diseño geométrico del sistema pone el énfasis en la pendiente superficial del firme permeable, limitando ésta a valores esencialmente inferiores al 5%, si bien, se pueden dar excepciones en determinadas superficies que han probado ser válidas para pendientes más pronunciadas (Sañudo Fontaneda, 2014).

Se recomienda seguir el siguiente flujo de diseño dividido en dos grandes sectores (adaptado de Eisenberg et al. 2015 y Davis et al. 2022):

1. Diseño estructural:
    a. Análisis de tipo de uso: peatonal o tráfico de vehículos. En el caso de tráfico de vehículos se deberá de estudiar la intensidad media diaria de vehículos y el tipo de tráfico.
    b. Análisis de las características del suelo y de la explanada con especial atención a la capacidad portante.
    c. Dimensionamiento de la sección del firme, incluyendo sus capas: superficial (rodadura en caso de tráfico vehicular), base y sub-base.
    d. Comprobación de la capacidad estructural del firme y definición de espesores mínimos.
2. Diseño hidrológico.
    a. Análisis de la zona de estudio y del área de drenaje contribuyente.
    b. Cálculo de la lluvia de diseño.
    c. Análisis de los contaminantes presentes en la zona de estudio.
    d. Determinación de las ratios de infiltración, tratamiento y volúmenes de almacenamiento temporal.

e. Estimación del caudal de salida y volumen de gestión a través del dren subterráneo (cuando éste se incluya en el diseño).
f. Determinación de los espesores mínimos de capas para cumplir con las condiciones de infiltración y almacenamiento temporal del sistema.

Por último, se recomienda comparar ambos análisis y elegir aquellos espesores de capas y materiales que cumplan con los criterios mínimos estructurales e hidrológico.

Para el cálculo de los caudales pico a utilizar en el diseño hidrológico, se deberá de utilizar el punto 8.3.2 de este manual.

Además de los anteriores criterios de diseño, se tienen que considerar dos escenarios básicos de diseño que deben cumplirse simultáneamente en un firme permeable, y a partir de los cuales se puede estimar la superficie ocupada por el SUDS (S_b):

- Capacidad de gestionar el volumen de tratamiento de la calidad de escorrentía superficial (V_t).
- Tiempo de vaciado del sistema tras evento de lluvia (t_v).

El primero de los escenarios anteriormente mencionados asociado con el volumen de tratamiento de la calidad de aguas viene definido por los siguientes parámetros:

- Volumen de tratamiento (V_t). Volumen de diseño asociado al volumen de tratamiento del evento del primer lavado para una lluvia de diseño equivalente al percentil 91 en la ciudad de Gijón según la serie histórica de precipitaciones de la ciudad (V_{91}).
- Precipitación de diseño (P_D). Valor de la lluvia de diseño calculada para la ciudad de Gijón. En el caso de este manual, se ha calculado la lluvia de diseño para un volumen de tratamiento en el percentil del 91 (V_{91}), siguiendo el procedimiento indicado en los apartados 8.2 y 8.3. Dicho percentil corresponde a 16,1 mm de altura de lluvia.
- Superficie drenada (S_D). Área tributaria que drena hacia el pavimento permeable (m^2).
- Coeficiente de escorrentía (C). Valor del coeficiente de escorrentía de la superficie drenada estimado a partir de la norma 5.2-IC de drenaje superficial.

En base a los parámetros anteriores, el volumen de diseño al que debe de hacer frente el firme permeable se define mediante la siguiente expresión en la Ec. 34:

$$V_t = P_D \times S_D \times C \qquad \text{Ec. 34}$$

4.4.3 Variantes tipológicas

Los firmes permeables pueden diferenciarse según el tipo de pavimento superficial empleado, siendo los principales los citados a continuación: pavimento continuo ejecutado mediante hormigón poroso o mezcla bituminosa porosa; y pavimento discontinuo de adoquines permeables o impermeables con juntas, además de celdas reforzadas.

4.4.3.1 Pavimento continuo – PAV1

Los materiales que conforman el pavimento permeable continuo más comúnmente utilizados son las mezclas bituminosas porosas del tipo PA 16 según normativa española de firmes, y los hormigones porosos reforzados.

La porosidad de un pavimento permeable puede variar entre el 20-25% de las mezclas bituminosas porosas o el 20-30% del hormigón poroso. Este último suele reforzarse con polímeros para aumentar la capacidad estructural resistente de la capa en caso de ser transitada por vehículos ligeros (Sañudo-Fontaneda et al., 2014).

El flujo de escorrentía superficial filtrándose a través de la capa de pavimento permeable se puede definir como unidimensional vertical en régimen estable del tipo Darcy (Pagotto et al., 2000).

El tiempo de concentración de la escorrentía superficial a través de un pavimento continuo de hormigón o mezcla bituminosa porosa se define mediante la Ec. 35. El tiempo de concentración puede asumirse como un valor estimado de la retención hidráulica del pavimento relacionada con los tiempos necesarios para el tratamiento y filtración de contaminantes asociados con la calidad de agua de la escorrentía superficial.

$$t_c = \frac{h_{max} \times n_{sup}}{R_i} \qquad \text{Ec. 35}$$

Donde:

- t_c = tiempo de concentración del flujo de la escorrentía superficial en el pavimento permeable (h).
- h_{max} = Altura máxima de drenaje del pavimento permeable (mm).
- n_{sup} = Porosidad de la capa de pavimento permeable.
- R_i = Ratio de infiltración del pavimento permeable (mm/h).



Figura 46. Pavimento continuo conformado por mezcla bituminosa porosa tipo PA-12 tras 5 años de funcionamiento en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía, Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo.

4.4.3.2 Pavimento discontinuo – PAV2

Los pavimentos discontinuos se caracterizan porque el paso de la escorrentía superficial se produce de manera localizada a través de las juntas entre adoquines (Figura 47). Los adoquines suelen consistir en un material del tipo hormigón impermeable, pudiendo ser poroso en ocasiones donde se requiera aumentar la capacidad de infiltración del pavimento permeable. En ese último caso, la infiltración se produce a través de toda la superficie (adoquín y juntas). Las juntas de los adoquines suelen ejecutarse mediante el mismo material que se utiliza para construir la capa de base, destacando el arrocillo de tamaño 4-6 mm. Por tanto, las fórmulas de dimensionamiento y de cálculo de la filtración a través de la capa de pavimento serían las mismas que en las capas de áridos, pero localizadas en la superficie ocupada por las juntas.



Figura 47. Pavimento discontinuo conformado de adoquines impermeables en disposición permeable tras 5 años de funcionamiento en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía, Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo.

Por otra parte, existe un tipo de firme permeable ejecutado mediante césped reforzado con celdas de plástico o de hormigón, cuya infiltración se produce a través del propio césped, variando levemente la configuración de las capas superficiales de pavimento verde (Figura 48).



Figura 48. Pavimento discontinuo conformado de césped reforzado con celdas de plástico tipo Atlantis® tras 5 años de funcionamiento en el aparcamiento del Palacio de los Deportes de La Guía, Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Universidad de Oviedo.

La secuencia recomendada de construcción de un firme permeable es la siguiente según (Iowa Department of Natural Resources, 2019):

1. Verificación que las condiciones para la construcción del firme permeable sean las idóneas: evitar tráfico pesado de obra rodando sobre la superficie del aparcamiento; revisión de las condiciones meteorológicas para asegurar las mejores condiciones posibles evitando exceso de humedad y agua en el suelo y

capas inferiores del firme expuestas a la intemperie durante la construcción; señalizar las futuras zonas de pavimento permeable dentro de la obra; estabilizar las zonas adyacentes a la obra impidiendo la contribución de sedimentos durante la construcción; y evitar la acumulación de material de obra y construcción del firme junto a la ubicación de las áreas permeables.

2. Instalación de medidas de control frente a la erosión y los sedimentos: verificar que las condiciones de diseño se mantienen y se cumplen en la construcción; y disponer barreras de sedimentos entre las zonas impermeables y las permeables dentro de la obra para evitar el ingreso de sedimentos que puedan llegar a colmatar el firme permeable recién instalado.
3. Evaluación y preparación de las superficies: protección y mantenimiento de las ratios de percolación del suelo subyacente mientras se excava para la disposición de las distintas capas del firme permeable. Algunas de las prácticas recomendadas en ese aspecto son las siguientes: verificar las condiciones de humedad del suelo, evitando excavar justo después de un evento de lluvia, dejando un suficiente espacio de tiempo entre eventos de lluvia; implementar una planificación de obra de tal manera de que se evite el tránsito de vehículos sobre la zona excavada, pudiendo transportar accidentalmente tierra hacia otras áreas limpias de la obra; y garantizar que la pendiente del suelo sea lo más horizontal posible, recomendándose valores inferiores al 1%.
4. Evaluación de las ratios de infiltración del terreno: se recomienda que un especialista lleve a cabo ensayos de percolación del terreno, tanto antes, como después de la excavación, así como antes de la puesta en obra de la capa de sub-base del firme permeable sobre la explanada. Se debe mantener un tiempo de vaciado inferior a 72 horas. En caso contrario, y siempre que se busque la infiltración al terreno con esta práctica SUDS, deberá de riparse y airearse el terreno con el objetivo de aumentar la ratio de infiltración recuperando las condiciones previas a la excavación.
5. Colocación de la capa de geosintético de filtración o impermeable (según función buscada de infiltración al terreno o de impermeabilización para almacenamiento, respectivamente): se recomienda seguir las instrucciones del fabricante del geosintético y su colocación tras la finalización de la explanada, y previa disposición de los áridos de las capas inferiores. Igualmente, se recomienda que el geosintético cubra las paredes laterales de las distintas capas del firme permeable para impedir la migración lateral de áridos, ayudando a la función

estructural del sistema. Por último, se fomenta el solape del geosintético con el objeto de evitar espacios aislados sin dicho material por los cuales se produzcan pérdidas de áridos o del flujo de escorrentía superficial filtrado por el sistema.

6. Ejecución de elementos auxiliares del firme permeable: construcción y puesta en obra de las áreas drenadas, pozos de observación, arquetas de monitorización, vertederos, tuberías de desagüe hacia el drenaje convencional, elementos de rebose, codos invertidos y tuberías de los colectores subterráneos de la capa de drenaje.
7. Colocación de la capa de sub-base: disposición de los áridos que conforman la capa de sub-base y posterior compactación. Se recomienda encarecidamente disponer una capa de geotextil o superficie impermeable sobre la recién dispuesta capa de áridos para evitar la sedimentación sobre ella y su posible colmatación durante la construcción y ejecución del firme permeable. Conviene prevenir posibles daños provocados por la maquinaria a las tuberías subterráneas y otros elementos auxiliares previamente dispuestos, lo que requiere de operadores especialistas y el uso de maquinaria ligera de pequeño tamaño adecuada para el trabajo como, por ejemplo, pequeñas cargadoras frontales.
8. Puesta en obra del geotextil de filtro y separación: colocación del geotextil con el suficiente solape para garantizar el paso del flujo de escorrentía a través del geotextil, el cual aporta también la función de separación entre capas de áridos de diferentes granulometrías.
9. Colocación de la capa de base y ejecución del pavimento o capa superficial: puesta en obra de una capa de al menos 5 cm de espesor de "arrocillo" o árido de tamaño máximo de diámetro de partícula 4-6 mm que sirva de base para apoyar con garantías el pavimento superficial, el cual deberá de disponerse de acuerdo con las especificaciones del fabricante en el caso de elementos prefabricados como adoquines. Por otra parte, la ejecución de las mezclas porosas deberá de llevarse a cabo garantizando la correcta puesta en obra del material, incluyendo la compactación adecuada para asegurar el mantenimiento de la porosidad de las mezclas y el correcto alcance de la resistencia final en caso de que sean pavimentos de hormigón poroso reforzado con polímeros.
10. Protección del pavimento hasta la finalización de la obra: planificar la instalación del pavimento al final de la secuencia de construcción. En caso de no poder hacerlo de esta manera, proteger el pavimento de la posible sedimentación

catastrófica procedente por eventos de arrastre de materiales de obra de superficies adyacentes.

11. Formación del personal de operación y mantenimiento: finalmente, se recomienda llevar a cabo un curso de formación en los siguientes puntos: descripción del funcionamiento del firme permeable y del diseño de sus distintos elementos; definición de las etapas de mantenimiento; beneficios públicos de la aplicación de estos sistemas; formación a técnicos en la operación, mantenimiento y monitorización de los firmes y sus elementos auxiliares; seguimiento del funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo e identificación de problemas y posibles fallos; provisión de planos, cálculos y especificaciones de los distintos elementos, capas y materiales de un firme permeable.

4.4.4 Operación, mantenimiento y monitorización

Las labores de operación y mantenimiento recomendadas para la práctica de un firme permeable en la Tabla 37. Se incluyen dentro de las labores de operación y mantenimiento aquellas relacionadas con las tareas de inspección para comprobar que la técnica SUDS funciona correctamente según el diseño propuesto para su construcción.

Las labores de mantenimiento podrían dividirse entre aquellas planificadas con antelación (preventivas) con el objetivo de detectar reducciones en el comportamiento de algún componente del sistema de manera temprana, y aquellas tomadas tras un fallo del sistema y que requieren medidas correctoras para recuperar la funcionalidad del SUDS (correctoras).

En el caso de un firme permeable, la mayoría de las tareas de mantenimiento se centrarán en la capa superficial de pavimento y en la conservación de su capacidad de infiltración hidráulica.

Tabla 37. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un firme permeable, incluyendo inspecciones de comprobación de su funcionamiento.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Capa superficial de pavimento permeable	Inspección visual y análisis descriptivo del estado de la superficie del pavimento permeable, con especial atención a los signos de colmatación que puedan presentarse en las juntas entre	Aparición de encharcamientos superficiales localizados y concentración de sedimentos, basura y materia orgánica de diversa procedencia	Anual (inspección ocasional)

	adoquines, y presencia de sedimentos en los aglomerados continuos y césped reforzados. Realizar ensayos de permeabilidad de la capa de pavimento		
	Mantenimiento de la especie vegetal de césped utilizada en la capa superficial en caso de haber diseñado el pavimento con dicha superficie vegetal y recogida de basura	Sequedad del césped o crecimiento desigual en la superficie	Trimestral (inspección regular)
	Control de plagas que puedan afectar al césped de la superficie si se instala dicha tipología de pavimento	Presencia de especies animales potencialmente peligrosas o de vectores	Bajo necesidad (medida correctora)
	Barrido en seco con aspirado para reducir la acumulación de sedimentos en superficie y eliminación hojas	Pérdida de la capacidad de infiltración del pavimento permeable y encharcamiento	Bajo necesidad (medida correctora). Se recomienda llevar a cabo esta labor cada 5 años como máximo en el caso de superficies de aglomerado poroso
	Inspección visual de posibles daños estructurales en el pavimento	Aparición de daños o grietas localizados	Bajo necesidad (medida correctora)
Capa de base y geotextil de separación (*cuando se disponga geotextil como capa de separación entre las capas de base y sub-base*)	Revisión de la actividad biológica en el firme permeable	Valores de respiración biológica (CO_2)	Quincenal (inspección regular)
	Reemplazo completo de la capa de base	Fallo catastrófico del sistema por falta de permeabilidad de la capa de base o por contaminación de la capa por el filtrado de la escorrentía a lo largo de su vida útil	Bajo necesidad (posiblemente a los 10-15 años)
	Reemplazo del geotextil	Fallo hidráulico del geotextil por falta de permeabilidad debido a la colmatación de este	Bajo necesidad (posiblemente a los 10-15 años)
Área drenada y zonas adyacentes al pavimento permeable	Retirada de residuos, sedimentos y escombros arrastrados por la escorrentía superficial desde áreas adyacentes al pavimento permeable	Aparición de residuos en las zonas próximas al pavimento	Bajo necesidad (medida correctora)
	Revisión del crecimiento de la vegetación de las áreas circundantes y	Crecimiento descontrolado de vegetación	Trimestral (inspección regular)

	susceptible de contribuir sedimentos y restos orgánicos potencialmente colmatantes del pavimento		
Elementos de desagüe, incluyendo los drenes perforados de sub-base (*en aquellos diseños en los que se incluyan los drenes perforados*)	Inspección de elementos de desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de transporte y vertido	Obstrucción de tuberías a través de la reducción en el flujo de salida del sistema	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tras evento de lluvia	Reducción de los caudales de salida	Quincenal (inspección regular)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las estructuras de monitorización de su funcionamiento y las de rebose	Mantenimiento de los equipos de instrumentación	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento (mantenimiento regular)
	Comprobación del correcto funcionamiento de las estructuras de rebose del sistema	Eventos de desbordamiento del SUDS en episodios de lluvia	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

La monitorización de un firme permeable debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal de entrada y salida del sistema, incluyendo la medición de la infiltración al terreno (en caso de diseñarse con esa función) y la evapotranspiración.
- Medida de los contaminantes de entrada y salida del sistema para el análisis del grado de eficiencia en la eliminación de dichos contaminantes a través de las concentraciones medias del evento.

- Registro de los datos de sedimentación de la zona de estudio (área contribuyente) para el análisis de las características de colmatación y pérdida de la capacidad de infiltración del pavimento permeable.
- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.) como contexto para un correcto análisis del comportamiento y funcionalidad hidrológicas de los firmes permeables.
- Medida de la actividad biológica de un firme permeable para determinar la biodegradación de los hidrocarburos mediante microorganismos presentes en la capa del geotextil.

Para lograr medir y registrar los datos anteriores habría que disponer y ejecutar una serie de elementos auxiliares de obra civil que permitan albergar los instrumentos y equipamientos de monitorización, tales como arquetas de monitorización (Figura 49, Figura 50 y Figura 51) y estructuras adyacentes (casetas de monitorización con electrificación y acceso a internet disponibles). Las arquetas deberían poder contener elementos como los descritos a continuación:

- Vertederos de tipo "v" que permitan obtener el caudal y la velocidad del flujo entrante y saliente al firme permeable (Figura 50).
- Estaciones meteorológicas con pluviómetros (Figura 51).
- Sensores de presión para la medición de la altura de agua dispuestos en ambos extremos de la cuneta.
- Toma-muestras automáticos de la calidad de aguas (Figura 51).



Figura 49. Instrumentación de monitorización dispuesta en el interior de arqueta para el análisis del seguimiento discontinuo (puntual) del comportamiento hidrológico, calidad de aguas y biológico de un firme permeable, y diseñado por el GITECO, Universidad de Cantabria, implementado en el Parque Científico Tecnológico de Gijón (Asturias). Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.



Figura 50. Instrumentación de monitorización dispuesta en el interior de la arqueta para el análisis del seguimiento del comportamiento hidrológico de un firme permeable en continuo, y diseñado por el North Carolina State University Stormwater Engineering Group, North Carolina, EE. UU. Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.



Figura 51. Instrumentación de monitorización exteriores a la arqueta para el seguimiento en continuo del comportamiento hidrológico y de tratamiento de contaminantes de un firme permeable, y diseñado por el North Carolina State University Stormwater Engineering Group, North Carolina, EE. UU. Fotografías: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Además, cabe destacar el uso de ensayos para la monitorización de la capacidad de infiltración hidráulica de los pavimentos permeables (capa superficial del firme permeable) como elementos fundamentales para la toma de decisiones sobre cuándo llevar a cabo el mantenimiento superficial de retirada de sedimentos que contribuyen a la colmatación del sistema. Se recomienda utilizar los ensayos que se muestran en la Figura 52, tanto para superficies continuas (imagen izquierda), como para superficies discontinuas (imagen derecha). Se destacan los ensayos según los métodos ASTM C1781/C1781M-15 para mezclas porosas y ASTM C1701/C1701M-17a para adoquines. Además, se recomienda el uso del permeámetro LCS según la norma española NLT-327/00 para superficies recién instaladas, no siendo recomendable en superficies bajo cierto grado de colmatación por deficiencias en su comportamiento descritas por Sañudo-Fontaneda et al. (2018).



Figura 52. Monitorización de la capacidad de infiltración de pavimentos permeables continuos (imagen izquierda) y discontinuos (imagen derecha) llevada a cabo por el equipo de la Universidad de Oviedo en colaboración con la Universidad de Cantabria en el aparcamiento experimental de Las Llamas, Santander (Cantabria). Fotografías: Luis Ángel Sañudo publicadas en abierto en Sañudo-Fontaneda et al. (2018).

Por último, se muestra una gráfica orientativa sobre el momento en el cual llevar a cabo las labores de mantenimiento en un firme permeable con las características del aparcamiento experimental de Las Llamas de Santander, tanto meteorológicas (ver Sañudo-Fontaneda et al. 2014), como de ratios de sedimentos (ver Sañudo-Fontaneda et

al. 2018), y ratio de superficie drenada vs superficie ocupada por el pavimento permeable (1:1).

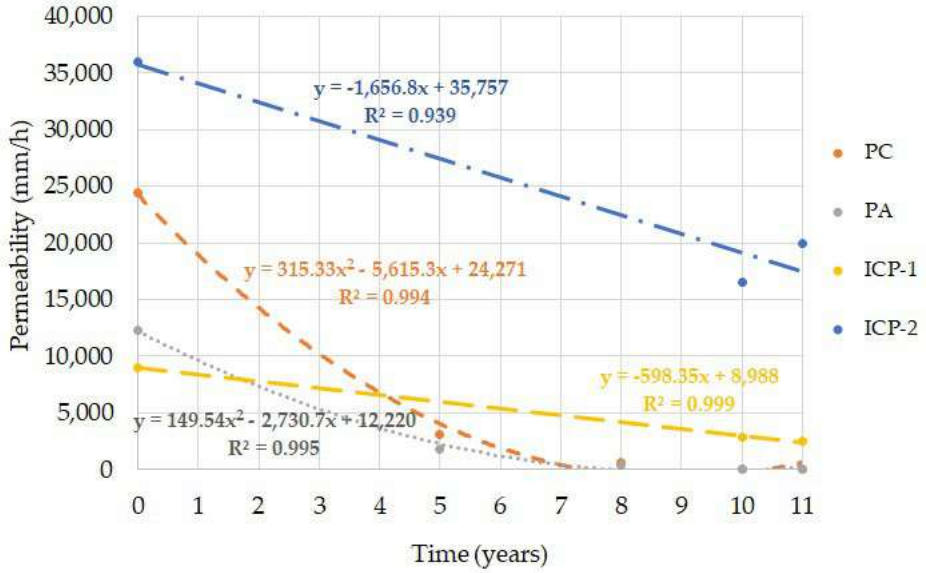


Figura 53. Gráfica de la pérdida de la capacidad de infiltración de firmes permeables en el aparcamiento permeable experimental de Las Llamas en Santander para hormigón poroso (PC), asfalto poroso (PA) y adoquines impermeables en disposición permeable según diseño (ICP-1 e ICP-2). Fuente: Sañudo-Fontaneda et al. (2018).

4.4.5 Referencias especializadas en firmes permeables

4.4.5.1 Referencias a guías, normativas y manuales técnicos

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. En: Observatorio Ambiental de Bogotá. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Acueducto de Bogotá. Octubre, 4, 2021 [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

County of Los Angeles Department of Public Works. *Low Impact Development Standards Manual*. Los Angeles, EE. UU.: 2014. Febrero, 1, 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

De la Fuente García, L., Perales Momparler, S., Rico Cortés, M., Andrés Doménech, I., Marco Segura, J. B. *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*. Valencia: Cicle Integral de l'Aigua. Ajuntament de València, 2021. ISBN 978-84-9089-386-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Eisenberg, B., Collins Lindow, K., Smith, D.R. Permeable Pavements.Editorial American Society of Civil Engineers, Vriginia, EE. UU. ISBN: 9780784413784. DOI: 10.1061/9780784413784.

Iowa Department of Natural Resources. Chapter 8. Permeable Pavement Systems. En: Iowa Storm Water Management Manual, 2019. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

North Carolina Department of Environmental Quality. *C-5. Permeable Pavement*. En: *Stormwater Design Manual*. Noviembre, 20, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 20. Pervious pavements*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.4.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión

Al-Rubaei, A.M.; Stenglein, A.L.; Viklander, M.; Blecken, G.T. Long-Term hydraulic performance of porous asphalt pavements in Northern Sweden. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 2013, 139 (6), 499-505. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000569.

Andrés-Valeri, V.C.; Marchioni, M.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Giustozzi, F.; Becciu, G. Laboratory assessment of the infiltration capacity reduction in clogged porous mixture surfaces. Sustainability (Switzerland) 2016, 8(8), 751. DOI: 10.3390/su8080751.

Bean, E.Z.; Hunt, W.F.; Bidelspach, D.A. Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 2007, 133(3), pp. 249-255. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:3(249).

Bustos, G. and Pérez, E. (2007). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. 5th Edition. Ediciones LITEAM. Madrid, Spain.

Castro-Fresno, D.; Andrés-Valeri, V.C.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J. Sustainable drainage practices in Spain, specially focused on pervious pavements. Water (Switzerland) 2013, 5(1), pp. 67-93. DOI: 10.3390/w5010067.

Fernández-Barrera, A.H.; Castro-Fresno, D.; Rodríguez-Hernández, J.; and Calzada-Pérez, M.A. Infiltration capacity assessment of urban pavements using the LCS permeameter and the CP infiltrometer. J.Irrig.Drain.Eng. 2008, 134(5), 659-665. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:5(659).

Fletcher, T.D.; Shuster, W.; Hunt, W.F.; Ashley, R.; Butler, D.; Arthur, S.; Trowsdale, S.; Barraud, S.; Semadeni-Davies, A.; Bertrand-Krajewski, J.-L.; Mikkelsen, P.S.; Rivard, G.; Uhl, M.; Dagenais, D.; Viklander, M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution

and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water Journal 2015, 12(7), 525-542. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314.

Jato-Espino, D., Sañudo-Fontaneda, L.A., Andrés-Valeri, V.C. Green Infrastructure: Cost-Effective Nature-Based Solutions for Safeguarding the Environment and Protecting Human Health and Well-Being. En: Hussain, C. (eds) Handbook of Environmental Materials Management. Springer, Cham, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-73645-7_46

Li, H.; Kayhanian, M.; Harvey, J.T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. Journal of Environmental Management 2013, 118, 144-152. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.01.016.

Lucke, T.; Beecham, S. Field investigation of clogging in a permeable pavement system. Building Research and Information 2011, 39(6), pp. 603-615. DOI: 10.1080/09613218.2011.602182.

McLaughlin, A-M.; Charlesworth, S.; Coupe, S.; de Miguel, E. Resilience and sustainable drainage: end-of-life. 9th International Conference NOVATECH, Lyon, France, 28 June 2016. GRAIE, Lyon, France. ISBN: 978-2-917199-06-0.

Nnadi, E.O.; Coupe, S.J.; Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J. An evaluation of enhanced geotextile layer in permeable pavement to improve stormwater infiltration and attenuation. International Journal of Pavement Engineering 2014, 15(10), pp. 925-932. DOI: 10.1080/10298436.2014.893325.

Nichols, P.W.B., Lucke, T. A Detailed Analysis of Sediment Particle Sizes and Clogging in Permeable Pavements. Clean - Soil, Air, Water 2017, 45(4),1700078. DOI: 10.1002/clen.201700078.

Pindado, M.Á; Aguado, A; Josa, A. Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes. Cem. Concr. Res. 1999, 29 (7), 1077-1083. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00095-2.

Rodriguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D.; Fernández-Barrera, A.H.; Vega-Zamanillo, Á. Characterization of Infiltration Capacity of Permeable Pavements with Porous Asphalt Surface Using Cantabrian Fixed Infiltrometer. Journal of Hydrologic Engineering 2012, 17 (5), 597-603. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000480.

Sañudo Fontaneda, L.A. The analysis of rainwater infiltration into permeable pavements, with concrete blocks and porous mixtures, for the source control of flooding. PhD Thesis. University of Cantabria, Spain, 10 June 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Calzada-Pérez, M.A.; and Castro-Fresno, D. Infiltration behaviour of Polymer-Modified Porous Concrete and Porous Asphalt surfaces used in SUDS techniques. Clean –Soil, Air, Water, Article in press, DOI: 10.1002/clen.201300156.

Sañudo-Fontaneda, L.A.; Charlesworth, S.M.; Castro-Fresno, D.; Andres-Valeri, V.C.A.; Rodriguez-Hernandez, J. Water quality and quantity assessment of pervious pavements performance in experimental car park areas. Water Science and Technology 2014, 69(7), pp. 1526-1533.

Sañudo-Fontaneda, L.A.; Andrés-Valeri, V.C.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D. Field study of infiltration capacity reduction of porous mixture surfaces. Water (Switzerland) 2014, 6(3), pp. 661-669. DOI: 10.3390/w6030661.

Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Vega-Zamanillo, A.; Castro-Fresno, D. Laboratory analysis of the infiltration capacity of interlocking concrete block pavements in car parks. Water Science and Technology 2013 67(3), pp. 675-681. DOI: 10.2166/wst.2012.614.

4.4.5.3 Casos de estudio

SUSDRAIN. Permeable surfaces, porous surfaces, other pervious surfaces. En: *Case studies*. 2023 [acceso 29 enero 2024] Enlace de consulta

U.S. Environmental Protection Agency. *Case Studies Analyzing the Economic Benefits of Low Impact Development and Green Infrastructure Programs*. EPA 841-R-13-004. Agosto, 2013. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

4.4.5.4 Referencias a normativas

ASTM C1701 / C1701M-17a, Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017ASTM. DOI: 10.1520/C1701_C1701M-17A.

ASTM C1781 / C1781M-15, Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. DOI: 10.1520/C1781_C1781M-15.

BS EN 1338:2003. Concrete paving blocks. Requirements and test methods.

European Standard EN 12390-1, Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, European Committee for Standardization, Brussels 2012.

European Standard EN 12390-2, Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests, European Committee for Standardization, Brussels 2009.

European Standard EN 12390-3, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, European Committee for Standardization, Brussels 2009.

European Standard EN 12697-40, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 40: In situ drainability, European Committee for Standardization, Brussels 2012.

European Standard EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas 2012. Método del tamizado. Madrid. AENOR.

NLT-327/00. Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Gabinete de Formación y Documentación.

4.5 Sistemas de infiltración

4.5.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Los sistemas de infiltración son técnicas SUDS especialmente diseñadas y construidas para infiltrar al terreno la escorrentía superficial captada y drenada por el sistema después de filtrarla a través del sistema. Pueden distinguirse entre sistemas de tipo puntual, como los pozos de infiltración; sistemas de tipo longitudinal como las zanjas o franjas de infiltración; y, sistemas superficiales de tipo balsas de infiltración (Figura 54). Estos últimos son los de más amplia utilización. En muchos casos, los elementos de infiltración se ejecutan mediante depósitos reticulares que permiten aumentar su capacidad atenuadora de volumen de escorrentía y caudales punta.



Figura 54. Balsa de infiltración gestionando escorrentía de centro comercial adyacente en Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

4.5.2 Recomendaciones de diseño

Se recomienda dejar una distancia mínima de 1 m entre la base del sistema de infiltración y la máxima altura del nivel freático de forma que se garantice el funcionamiento del sistema como elemento de infiltración al terreno a través de una columna de suelo que se encuentre en condiciones no saturadas.

El manual SUDS británico (Woods Ballard et al. 2015) sugiere que se tomen precauciones en el diseño de sistemas de infiltración en los siguientes aspectos fundamentales:

- Inestabilidad del suelo y fenómenos de subsidencia a causa de la infiltración al terreno debido a la implementación del sistema de infiltración.
- Inestabilidad de los taludes adyacentes debido a la infiltración al terreno a causa de la construcción del sistema de infiltración.
- Contaminación de aguas o acuíferos subterráneos a causa de la infiltración al terreno.
- Riesgo de inundación por afloramiento del agua subterránea debido a su aumento por la infiltración al terreno.
- Riesgo de fugas del caudal infiltrado al terreno hacia la infraestructura de abastecimiento y saneamiento, garajes, túneles, cimentaciones de edificaciones y otras estructuras circundantes.

La sección transversal más habitual en un sistema de infiltración del tipo de balsa de infiltración es la mostrada en la Figura 55.

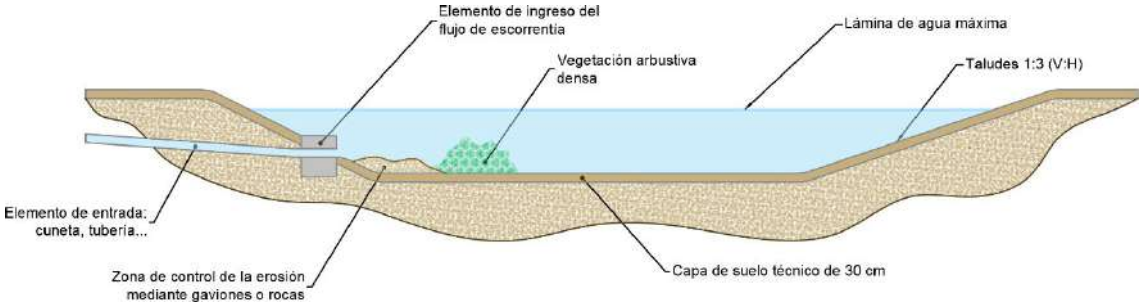


Figura 55. Sección transversal de un sistema de infiltración del tipo balsa de infiltración. Fuente: infografía diseñada por el Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

El fondo del sistema de infiltración, en especial en el caso de un diseño de tipo balsa de infiltración, debe de ser plano con el objetivo de facilitar una superficie de infiltración y posible almacenamiento de lámina de agua temporal lo más homogéneo posible.

Se sugiere que el sistema de infiltración se diseñe para periodos de retorno asociados con 10 años (recomendado) y 25 años (deseable), tal y como se indica en el apartado de diseño de este manual técnico, proponiendo que el sistema pueda vaciarse en un periodo de 24 a 48 horas tras la finalización del evento de lluvia de diseño. De esta manera, se permite que el SUDS no pierda capacidad funcional en casos extremos de eventos de lluvia intensos y consecutivos.

Un ejemplo de formulación para el dimensionamiento de la superficie necesaria para el sistema de infiltración viene dado por la siguiente expresión (Ec. 36):

$$S_i = CS \times \frac{V_D \times 13{,}37}{K \times t} \geq Q_P \qquad \text{Ec. 36}$$

Donde:

- S_i = superficie ocupada por el sistema de infiltración (m^2).
- CS = coeficiente o factor de seguridad (se recomienda el uso de valores en el rango de 1,5-2).
- V_D = volumen de diseño asociado con la lluvia de diseño (m^3).
- K = conductividad hidráulica del terreno subyacente (m/h).
- t = tiempo máximo de evacuación de la lámina de agua del sistema (se recomienda limitar dicha variable a 48-72 horas).

4.5.3 Variantes tipológicas

4.5.3.1 Zanjas y pozos de infiltración INF1

Las pozos y zanjas / franjas de infiltración (Figura 56) presentan estructuras y secciones transversales similares a aquellas de los drenes filtrantes (ver sistemas de filtración en punto 4.6), con la excepción del elemento de impermeabilización que suele disponerse de forma perimetral a estos sistemas. En el caso de los sistemas de infiltración, se busca precisamente poder facilitar la infiltración al terreno.



Figura 56. Franja filtrante situada en el Centre for Agroecology, Water and Resilience (CAWR), Coventry University, Reino Unido. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

4.5.3.2 Balsa de infiltración – INF2

Las balsas de infiltración proporcionan una superficie, generalmente vegetada con especies de bajo crecimiento en altura, que permiten la infiltración al terreno a través de un área mayor al habilitada por los pozos de infiltración y las zanjas o franjas de infiltración (Figura 57).



Figura 57. Balsa de infiltración en el Campus de la North Carolina State University, Raleigh, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

4.5.4 Operación, mantenimiento y monitorización

Se proponen algunas actividades o tareas de mantenimiento a continuación en la Tabla 38. Una actividad o labor de monitorización que debiera de llevarse a cabo a lo largo dela vida operativa del sistema es la de revisar el estado del sistema de infiltración 24 horas después de que éste se haya visto sometido a un evento de lluvia similar o superior al de la lluvia de diseño del SUDS, de forma que pueda comprobarse que no ha sufrido daños estructurales y que se encuentra funcionando de manera correcta.

Tabla 38. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un sistema de infiltración, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Área de infiltración, ya sea en la franja (lineal), pozo (puntual) o en la balsa (superficial)	Inspección visual y análisis descriptivo del estado de la zona de infiltración	Observación de la sedimentación y posible colmatación superficial	Mensual (inspección regular)
	Crecimiento de plantas o hierbas en la zona de infiltración	Presencia de especies vegetales que presenten un riesgo de colmatación al sistema	Mensual (inspección regular)
	Limpieza de basura y restos arrastrados por la escorrentía hacia la superficie del sistema	Presencia de restos y basura en la superficie del sistema	Mensual (inspección regular)
	Replantado de especies vegetales	Pérdida de plantas en el sistema	Bajo necesidad (medida correctora)
	Corte y poda de especies vegetales para mantener una altura sobre la lámina de agua determinada por diseño	Exceso de altura de la vegetación de estanque / humedal sobre la lámina de agua	Bianual (inspección ocasional)
Elementos de entrada y desagüe del sistema	Inspección de elementos de entrada y desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de transporte y vertido	Obstrucción de tuberías de entrada y salida del sistema o vertederos de salida a través de la reducción en el flujo de salida del sistema, estableciendo medidas correctoras	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en tuberías y vertederos	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Corte y poda de superficies vegetales adyacentes	Exceso de crecimiento de la vegetación en las áreas de acceso al sistema de infiltración	Bajo necesidad (medida correctora)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tras evento de lluvia extremo	Reducción de los caudales de salida	Quincenal (inspección regular)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las estructuras de monitorización de su funcionamiento	Mantenimiento de los equipos de monitorización del sistema	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento (mantenimiento regular)
	Comprobación del correcto funcionamiento de las estructuras de rebose del sistema	Eventos de desbordamiento del SUDS en episodios de lluvia	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

La monitorización de un humedal o de un estanque debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal de entrada al sistema.
- Registro de la altura de agua en el sistema.
- Medición del caudal de rebose y/o desagüe del sistema.
- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.).
- Medida de la ratio de sedimentación del sistema.

Para ello, habría que ejecutar una serie de elementos auxiliares de obra civil que permitan albergar los instrumentos de monitorización, tales como arquetas y casetas de monitorización. En condiciones ideales, se recomienda la instalación de los siguientes instrumentos:

- Instalación de estaciones meteorológicas o de pluviómetros.
- Caudalímetros para el registro de caudales de entrada y salida del sistema.
- Toma-muestras automáticos de la calidad de aguas en el interior del SUDS para asegurarse que el agua de lluvia almacenada y tratada cumple con las condiciones mínimas de este tipo de sistemas.



Figura 58. Demostración de operaciones de mantenimiento de la tubería de entrada al sistema de una balsa de infiltración durante la Conferencia de SUDS de la ASCE en Carolina del Norte. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

4.5.5 Referencias especializadas en sistemas de infiltración

4.5.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos

California Department of Transportation. *Design Guidance*. En: *Caltrans Storm Water Quality Handbook*. Sacramento, EE. UU.: Septiembre, 2012 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. En: Observatorio Ambiental de Bogotá. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Acueducto de Bogotá. Octubre, 4, 2021 [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

County of Los Angeles Department of Public Works. *Low Impact Development Standards Manual*. Los Angeles, EE. UU.: 2014. Febrero, 1, 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

North Carolina Department of Environmental Quality. *C-1. Infiltration System*. En: *Stormwater Design Manual*. Noviembre, 20, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 17. Swales*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.5.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión

Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G. (2022). Green Stormwater Infrastructure. Fundamentals and Design. Editorial Wiley. ISBN: 9781118590195.

Emerson C.H., Welty C., Traver R.G. (2005). Watershed-scale evaluation of a system of storm water detention basins. Journal of Hydrologic Engineering, 10 (3), pp. 237 – 242. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:3(237)

Rosa D.J., Clausen J.C., Dietz M.E. (2015). Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. Journal of the American Water Resources Association, 51 (3), pp. 746 - 757. Doi: 10.1111/jawr.12272

4.5.5.3 Casos de estudio

SUSDRAIN. Infiltration trenches, infiltration basins. En: *Case studies*. 2023 [acceso 29 enero 2024] Enlace de consulta

4.6 Sistemas de filtración

4.6.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Los sistemas filtrantes son SUDS cuyo objetivo y proceso hidrológico principal es el de filtración de la escorrentía superficial, pudiendo distinguirse entre elementos lineales como las franjas y los drenes filtrantes (también denominados drenes franceses) y los sistemas concentrados como los filtros de arena. Estos sistemas constan de zanjas superficiales rellenas de áridos del suficiente tamaño de partícula para permitir un drenaje rápido de la escorrentía superficial posibilitando una leve atenuación del caudal pico y el tratamiento ligero de los contaminantes. De la misma manera, estos sistemas de filtración suelen usarse en combinación con SUDS de tratamiento pasivo dispuestos a continuación en la secuencia de un tren de tratamiento. Su principal aplicación es en infraestructuras de transporte como elementos lineales de drenaje de plataforma y talud natural adyacente, así como elementos de drenaje subsuperficial perimetral en otro tipo de superficies urbanas. En el caso de los filtros de arena, suelen disponerse en un tren de tratamiento donde se requiere una mayor eficiencia en la eliminación de partículas sedimentarias que puedan colmatar otros sistemas en la secuencia posterior del tren de tratamiento.

Las franjas y drenes filtrantes (Figura 59) son elementos cuyo principal mecanismo de funcionamiento es el de transporte, habitualmente trabajando en combinación con otros SUDS dentro de un tren de tratamiento. El caso de los filtros de arena es diferente, destacando esencialmente el mecanismo de tratamiento.



Figura 59. Ejemplo de labores de mantenimiento de un dren filtrante implementado para gestionar las pluviales de un tramo de la autopista M50 en Inglaterra, distinguiéndose la franja vegetada y la zanja que va rellenada de áridos. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Los sistemas de filtración lineales reciben el flujo de escorrentía superficial de manera lateral a través de toda su longitud, siendo habitualmente diseñados en combinación con franjas vegetadas que permiten llevar a cabo un pretratamiento de los contaminantes presentes en dicha escorrentía (Figura 59).

4.6.2 Recomendaciones de diseño

Las capas estándar de un dren filtrante son las siguientes:

- Capa superficial. La capa superficial suele estar compuesta de vegetación de tipo césped (franja filtrante) o de áridos de tamaño 20-60 mm que aseguren un volumen de huecos superior al 40%.
- se compone de las especies vegetales elegidas para realizar las funciones de transporte y tratamiento de los contaminantes presentes en la escorrentía. Además de este criterio, se debe de tener en cuenta el paisajístico, primando siempre que se pueda la selección de especies locales propuestas por especialistas en la materia. En el caso de las cunetas vegetadas de transporte, la altura máxima de la vegetación debiera de mantenerse entre 7,5 y 15 cm.
- Capa de filtro. Esta capa se incluye en las cunetas de tratamiento secas y húmedas, pero no es necesaria en las cunetas vegetadas cuyo único objetivo es el de transporte. Dicha capa puede alcanzar un espesor máximo de 75 cm y está formada por una mezcla de áridos y arena que conformen un suelo permeable.
- Geotextil de filtración. La principal función de la capa de transición es la de servir de capa se separación entre la capa de filtro y la capa de drenaje o sub-base del SUDS, de forma que se evite la migración de materiales (especialmente finos) desde la capa de filtro hacia la capa de drenaje. Esta capa de separación, cuando se incluye, se ejecuta mediante un geotextil con un adecuado diseño de apertura de poros y permeabilidad. Esta capa también actúa como capa de filtro, pudiendo aportar capacidad de reducción de ciertos contaminantes mediante la generación de una capa de actividad microbiana en los casos en que se use un geotextil de filtro.
- Geosintético de impermeabilización. Se trata de la capa inferior del sistema o capa de sub-base, cuyo objetivo es el de captar el agua de escorrentía procedente de las capas superiores y dirigirla hacia los elementos de vertido convenientemente diseñados para tal efecto. Esta capa está compuesta por gravilla que sirve de cama para la disposición de una tubería de fondo perforada en caso de disponerse en las cunetas vegetadas de tratamiento.

Además de las capas anteriormente expuestas, se deben añadir los siguientes elementos constructivos complementarios al diseño con sus respectivas funciones asociadas también con la operación, mantenimiento y monitorización del sistema:

- Elemento o estructura de rebose. Se trata de un elemento constructivo auxiliar al SUDS que permite la gestión de volúmenes de escorrentía que generan alturas de lámina de agua superiores a las recomendadas por diseño y que puedan comprometer el funcionamiento hidráulico de la cuneta generando situaciones de inundación en el SUDS. Esta estructura de rebose suele disponerse al final de la longitud de la cuneta vegetada; pudiendo ser, tanto una estructura tradicional de alivio, como una tubería de desagüe.
- Elementos de desagüe del sistema. Existen varios componentes que permiten evacuar el agua de escorrentía tratada hacia el exterior del sistema, ya sea hacia el terreno subyacente o hacia la red de drenaje convencional.
    - *Tubería-dren*. Tubería perforada de fondo embebida dentro de la capa de drenaje o sub-base, y diseñada para evacuar el agua tratada por el sistema mediante su filtración por las capas superiores, direccionándola habitualmente hacia un elemento de conexión tipo arqueta, donde este flujo puede conectarse con el sistema de drenaje convencional.
    - *Conexión con otro SUDS*. Tubería de conexión entre el área de biorretención y un segundo SUDS que permitiría aumentar las posibilidades de tratamiento tal y como se describe en el punto 8.3.1 y en la Tabla 14.
- Área de talud y escalón exterior. En los casos de diseño de cunetas vegetadas donde se incluya un talud lateral, éste estará limitado a un valor máximo de 1:3 (V:H), comenzando en la superficie vegetal del sistema. En ocasiones, existen recomendaciones de manuales internacionales que aceptan subir a una relación de 1:4, siempre que esto esté adecuadamente justificado en el diseño siempre y cuando se garantice la estabilidad del talud y de la vegetación existente en él. Se recomienda añadir un escalón perimetral exterior que actúa, además, como amortiguamiento inicial de la escorrentía superficial en aquellos casos en que ésta ingrese al sistema por todo su perímetro exterior.

Dependiendo de los objetivos funcionales que se persigan en el diseño de una cuneta vegetada, la sección transversal de ésta puede estar envuelta perimetralmente por un geotextil o geomembrana que permita o no la infiltración al terreno y limite los

movimientos horizontales o verticales de la escorrentía dentro del sistema según corresponda (Figura 27).

Las recomendaciones generales y los criterios mínimos de diseño para el dimensionamiento de una cuneta verde se presentan a continuación:

- Separación con el nivel freático. La distancia mínima con respecto al nivel freático debiera de ser de al menos 1 m, medida desde el punto más bajo de la cuneta vegetada, siempre y cuando se permita la infiltración al terreno subyacente.
- Nivel máximo de lámina de agua superficial. La altura máxima aconsejable de la lámina de agua sobre la superficie vegetada debiera de mantenerse a una distancia vertical mínima de 15 cm con respecto a la parte superior del talud de la cuneta vegetada, permitiendo siempre que haya una altura de resguardo que impida posibles problemas de rebose del sistema que desencadenen situaciones de inundación. Se recomienda que no se alcancen alturas superiores a 45 cm por condiciones de seguridad. Esto limitaría la profundidad máxima de la cuneta vegetada hasta los 60 cm, medidos verticalmente desde la superficie de la capa de vegetación hasta la parte superior del talud.
- Volumen pico de atenuación. En el supuesto de que el área de biorretención sea diseñada con el objetivo de atenuar el volumen pico de lluvia mediante su almacenamiento temporal, puede incluirse una estructura de rebose adicional a la anteriormente descrita asociada con el volumen de tratamiento del primer lavado, que permita la gestión de otros 30 cm extras de altura de lámina de agua superficial sobre la superficie vegetal.
- Vaciado del sistema. En aquellos casos en que la cuneta vegetada permita la presencia temporal de una altura de lámina de agua en superficie, ésta deberá de poder infiltrar completamente a través del sistema en un límite de 48 horas, permitiendo la restauración de la capacidad hidráulica de todas las capas del SUDS. De esta manera, se mantiene una correcta oxigenación de la biota del suelo y de la vegetación presente en el sistema. Mantener esta capacidad de recuperación de la cuneta vegetada es clave para mantener unas condiciones adecuadas de retención de los contaminantes presentes en la escorrentía, así como de su funcionalidad hidrológica.
- Infiltración al terreno subyacente. En el caso de que se den las condiciones adecuadas para infiltrar al terreno subyacente, incluyendo la separación mínima con el nivel freático y la distancia suficiente con las edificaciones contiguas,

respetando siempre las distancias mínimas recomendadas en el CTE; el suelo deberá de cumplir, además, la condición de tener una permeabilidad mínima de 10-6 m/s para permitir el rápido vaciado del sistema. Se recomienda incluir un estudio geotécnico que muestre los posibles movimientos de la escorrentía dentro del terreno (horizontales y verticales), además de proporcionar la permeabilidad de este.

- Diseño geométrico del sistema. La sección geométrica de una cuneta vegetada puede variar en función de las necesidades de diseño. No obstante, los rangos de diseño para una cuneta con forma trapezoidal suelen ir desde un mínimo de 0,5 m de ancho en la parte inferior de la superficie de la sección transversal de la cuneta hasta los 3 m en aquellos casos de transporte de grandes volúmenes de escorrentía superficial y buena disponibilidad de área de implementación del SUDS dentro de la zona de estudio; si bien, una anchura habitual estaría en el rango de 1 – 3 m. Se recomienda limitar la pendiente longitudinal de la cuneta vegetada a un mínimo de 0,5% y a un máximo de 7 – 10%, utilizando represas a partir de pendientes que superen el 3%. También se recomienda la inclusión de drenajes de fondo en la sub-base de la sección transversal de la cuneta vegetada en aquellas cunetas con pendientes bajas cercanas al 0,5 – 1%, de forma que se garantice el transporte del flujo tratado a través de las capas de la cuneta vegetada. En el caso de la pendiente del talud lateral de la cuneta vegetada, se recomiendan valores similares a los utilizados en las áreas de biorretención, siendo 1:3 (V:H). Si el espacio lo permite, se pueden hacer taludes más tendidos de 1:4 (V:H). Las longitudes habituales de las cunetas vegetadas suelen oscilar desde los 10 – 20 m en los casos de cunetas más pequeños, hasta los 30 – 60 m en los casos de mayores distancias sin interrupción por un elemento constructivo de conexión con otra cuneta o con elemento de conexión hacia el vertido final.
- Superficie ocupada por la cuneta vegetada. Como norma general de diseño, se suele limitar el área drenada por la cuneta a unos 10.000 – 20.000 m2 (Iowa 2009 y City of Townsville 2022). En el caso en que se disponga una cuneta vegetada con sección transversal en forma trapezoidal con taludes 1:3 y una anchura máxima recomendable de 3 m, la anchura total ocupada por la cuneta (incluidos los taludes) sería de 9 m, pudiendo subir hasta los 11 m en casos de taludes más tendidos de 1:4.

Se recomienda seguir el siguiente flujo de diseño (adaptado de City of Townsville 2022 y Woods Ballard et al. 2015):

1. Establecimiento de las condiciones conceptuales de diseño y valores mínimos de volúmenes de tratamiento.
2. Cálculo de los flujos de diseño y caudales picos asociados con los periodos de retorno seleccionados.
3. Dimensionamiento geométrico de la cuneta vegetada considerando las condiciones específicas del lugar de implementación.
4. Diseño de las estructuras de ingreso del flujo de escorrentía de la cuneta vegetada.
5. Comprobación hidráulica del diseño: capacidad hidráulica de la sección transversal, velocidades máximas del flujo de escorrentía superficial, comportamiento del tratamiento de la calidad de aguas, y elementos de seguridad de la cuneta.
6. Definición de las especies vegetales a utilizar y sus densidades de plantación.
7. Establecimiento de actividades de mantenimiento requeridas, incluyendo un plan de mantenimiento y monitorización del sistema durante su vida útil.

Para el cálculo de los caudales pico a utilizar en la cuneta vegetada, se deberá de utilizar el punto 8.3.2 de este manual.

Las comprobaciones hidráulicas para una cuneta vegetada vienen definidas en España por la norma 5.2-IC de drenaje superficial (Ministerio de Fomento 2018), y consisten en los siguientes pasos.

- Capacidad hidráulica de la cuneta vegetada con hipótesis de cálculo basada en elemento lineal de drenaje con régimen uniforme y en lámina libre para la sección llena sin entrada en carga. El caudal que aporta la sección transversal de la cuneta vegetada (Q_{CH}) debe de ser mayor o igual al caudal de proyecto (Q_P) determinado para el periodo de retorno exigido (mínimo de 10 años y recomendado de 25 años, según el presente manual), utilizando la Ec. 37.

$$Q_{CH} = \frac{J^{1/2} \times {R_H}^{2/3} \times S_{max}}{n} \geq Q_P \qquad \text{Ec. 37}$$

  Donde:

  - J = pendiente geométrica longitudinal de la cuneta vegetada (adimensional).

- R_H = radio hidráulico (m), calculado a partir de la siguiente expresión; $R_H = \frac{S}{p}$
- Siendo; s = área de la superficie transversal ocupada por la escorrentía superficial en la cuneta vegetada (m^2), y p = perímetro mojado (m).
- S_{max} = área de la sección transversal de la cuneta vegetada (m^2).
- n = coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$). Se recomienda el uso de un coeficiente en el rango de 0,033 (vegetación herbácea segada) y 0,040 (vegetación herbácea espesa).

- Velocidad media del flujo de escorrentía superficial circulando por la cuneta vegetada (V_P), la cual debe de ser igual o menor que aquella que produce daños en la cuneta vegetada (V_{Max}) según la Ec. 38, dependiendo de su material constructivo. En el caso de una cuneta vegetada, el rango máximo admisible de velocidades está entre 1,20 y 1,80 m/s.

$$V_P = \frac{Q_P}{S_P} \geq V_{Max} \qquad \text{Ec. 38}$$

Donde:

- S_P = área de la sección transversal ocupada por la escorrentía superficial fluyendo a través de la cuneta vegetada (m^2).

4.6.3 Variantes tipológicas

Existen dos tipologías básicas de sistema de filtración. Por una parte, los sistemas lineales como los drenes filtrantes o franceses, y las franjas filtrantes; y, por otra parte, los sistemas puntuales o concentrados como los filtros de arena.

4.6.3.1 Dren filtrante – FIL1

Las cunetas vegetadas secas son cunetas de tratamiento de la calidad de la escorrentía superficial, por lo que no solamente realizan labores de transporte de la escorrentía, sino que llevan a cabo un tratamiento de esta a través de sus capas inferiores, las cuales sirven de filtro para los contaminantes presentes en la escorrentía. Por esa razón, estas cunetas están diseñadas para tener una altura de lámina de agua temporal asociada a la lluvia de diseño del volumen de tratamiento, de una manera muy similar a la ya expuesta en las áreas de biorretención.

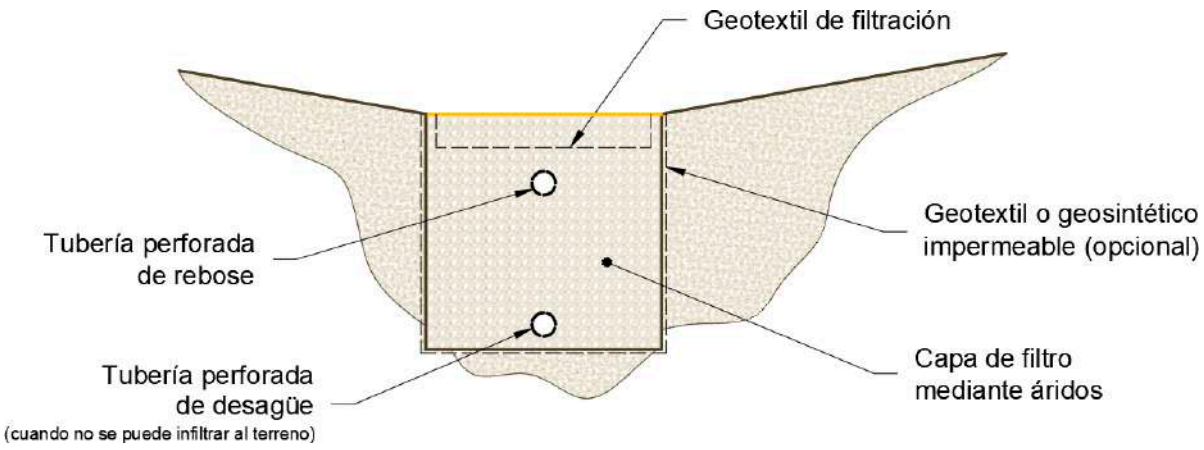


Figura 60. Sección estándar de un dren filtrante. Fuente: Grupo de Ingeniería Civil, Ambiental y Geomática de la Universidad de Oviedo.

4.6.3.2 Filtros de arena – FIL2

Los filtros de arena utilizan un medio filtrante ejecutado mediante arenas que permiten eliminar los contaminantes presentes en la escorrentía superficial. Los filtros de arena son particularmente utilizados como elementos de un tren de tratamiento trabajando en combinación con un estanque húmedo. El filtro de arena suele ir como SUDS inicial en dicho tren de tratamiento, continuando el flujo de escorrentía tratado en él hacia el siguiente SUDS.

El principal mecanismo de remoción de los contaminantes es el de sedimentación y filtración a través de las diferentes capas del sistema. Además, pueden diseñarse con filtros mejorados con materiales especialmente diseñados para que los contaminantes sean eliminados mediante la acción química de esos materiales en contacto con el agua de escorrentía.

Los filtros de arena suelen estar compuestos de algún elemento más en comparación a los otros sistemas de filtración, destacando separadores del flujo de escorrentía superficial y zonas localizadas de sedimentación y pre-tratamiento específicas.

Existen multitud de variantes de este tipo de SUDS, dependiendo fundamentalmente de su utilización final asociada con los usos del suelo del área contribuyente de drenaje y del espacio disponible.

Se recomienda el uso de los manuales técnicos referenciados en este apartado para los filtros de arena para el dimensionamiento de los distintos elementos de este SUDS especializado.

4.6.4 Operación, mantenimiento y monitorización

Las labores de operación y mantenimiento recomendadas sobre una cuneta vegetada se presentan resumidas en la Tabla 42. Se incluyen dentro de las labores de operación y mantenimiento aquellas relacionadas con las tareas de inspección para comprobar que el SUDS funciona correctamente según el diseño propuesto para su construcción.

Las labores de mantenimiento podrían dividirse entre aquellas planificadas con antelación (preventivas) con el objetivo de detectar reducciones en el comportamiento de algún componente del sistema de manera temprana, y aquellas tomadas tras un fallo del sistema y que requieren medidas correctoras para recuperar la funcionalidad del SUDS (correctoras).

Tabla 39. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un dren o franja filtrante, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Capa superficial (*incluye áreas de pretratamiento cuando se diseñan dentro del sistema*)	Retirada de desperdicios y residuos de la capa superficial, y siega de la capa vegetal de la franja filtrante	Aparición de residuos sobre la capa superficial arrastrados por la escorrentía	Mensual / bajo necesidad (inspección regular o medida correctora)
	Inspección de la capa superficial y de las zonas de acceso del flujo de escorrentía superficial en busca de daños o mal funcionamiento del sistema	Colmatación y encharcamientos localizados o generalizados	Mensual (inspección regular)
	Retirada de sedimentos de la capa superficial de los drenes lineales y de la zona de pretratamiento de los drenes lineales	Acumulación de sedimentos en la capa superficial y mal funcionamiento del flujo de entrada de la escorrentía al dren lineal	Bianual (medida correctora)
	Realizar ensayos de permeabilidad al sistema	Reducción de la permeabilidad inicial de diseño	Anual (inspección ocasional)
	Resembrado de áreas con baja densidad de vegetación y eliminación de plantas invasoras	Aumento de la exposición de la capa superior de la franja filtrante superando un 10%	Bajo necesidad (medida correctora)
Capa de filtro (*incluye el geotextil de filtro y separación entre la capa superficial y la capa de filtro*)	Reemplazo del geotextil de filtro y separación por colmatación	Pérdida de la capacidad de infiltración del sistema	Anual (recomendado) o bajo necesidad (medida correctora)
	Retirada, limpieza y colocación del árido que conforma la parte superior de la capa de filtro (primeros 10-30 cm del espesor de la capa)	Pérdida de la capacidad de infiltración del sistema	Anual (recomendado) o bajo necesidad (medida correctora)
	Limpieza, tratamiento y desecho (cuando sea necesario) de materiales	Presencia de contaminación asociada	Anual (recomendado) o bajo necesidad (medida correctora)

	expuestos a aceites e hidrocarburos	con aceites e hidrocarburos	
Elementos de desagüe, incluyendo los drenes perforados de sub-base (*en aquellos diseños en los que se incluyan los drenes perforados*)	Inspección de elementos de desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de transporte y vertido	Obstrucción de tuberías a través de la reducción en el flujo de salida del sistema	Bianual (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tras evento de lluvia	Reducción de los caudales de salida	Bianual (inspección regular)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las estructuras de monitorización de su funcionamiento y las de rebose	Mantenimiento de los equipos de instrumentación	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento (mantenimiento regular)
	Comprobación del correcto funcionamiento de las estructuras de rebose del sistema (tuberías perforadas superiores)	Eventos de desbordamiento del SUDS en episodios de lluvia	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

La monitorización de un dren y franja filtrantes debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal de entrada y salida a estos sistemas lineales.
- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.).

Será necesario ejecutar una serie de elementos auxiliares de obra civil que permitan albergar los instrumentos de monitorización, tales como arquetas de monitorización. Éstas deberían poder contener elementos como los descritos a continuación:

- Vertederos de tipo "v" que permitan obtener el caudal y la velocidad del flujo entrante y saliente a la cuneta vegetada, habitualmente trabajando en combinación con sensores de presión para la medida de la altura de agua.

En condiciones ideales, se recomienda la instalación de los siguientes instrumentos:

- Instalación de estaciones meteorológicas o de pluviómetros en las proximidades del SUDS.

- Sensores de altura dispuestos en ambos extremos de la cuneta.
- Toma-muestras automáticos para el registro de los parámetros asociados con la calidad de aguas.

4.6.5 Referencias especializadas en sistemas de filtración

4.6.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos

Iowa Department of Natural Resources. Chapter 6. Sand filters. En: Iowa Storm Water Management Manual, 2009. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Minnesota Stormwater Manual (2022). Calculating credits for sand filter. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 17. Swales*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.6.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión

Andrés-Valeri, V.C.A., Castro-Fresno, D., Sañudo-Fontaneda, L.A., and Rodriguez-Hernandez, J., 2014. 'Comparative analysis of the outflow water quality of two sustainable linear drainage systems'. Water Science and Technology, 70 (8), 1341-1347.

Broda, J., Gawlowski, A., Laszczak, R., Mitka, A., Przybylo, S., Grzybowska-Pietras, J., Rom, M., 2017. Application of innovative meandrically arranged geotextiles for the protection of drainage ditches in the clay ground. Geotextiles and Geomembranes, 45 (1), 45-53.

Bruen, M., Johnston, P., Quinn, M.K., Desta, M., Higgins, N., Bradley, C., and Burns, S., 2006. "Impact Assessment of Highway Drainage on Surface Water Quality". Report prepared for the Environmental protection Agency by the Centre for Water Resources Research, University College Dublin.

Carnell, 2015. SMARTscan. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga

Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V.C., Sañudo-Fontaneda, L.A., and Rodriguez-Hernandez, J., 2013. 'Sustainable drainage practices in Spain, specially focused on pervious pavements.' Water, 5 (1), 67-93.

Chinkulkijniwat, A., Horpibulsuk, S., Bui Van, D., Udomchai, A., Goodary, R., Arulrajah, A., 2017. Influential factors affecting drainage design considerations for mechanical stabilised earth walls using geocomposites. Geosynthetics International, 24 (3), 224-241.

Clapham, H.G., 1981. The TRAMMEL Drainage System. Transport Research Laboratory. American Society of Civil Engineers (ASCE). 24-26 pp.

Coupe, S. J., Sañudo-Fontaneda, L. A., Charlesworth, S. M., Rowlands, E. G. Research on novel highway filter drain designs for the protection of downstream environments. SUDSnet International Conference, Coventry, UK, 2015.

Coupe, S.J., Sañudo-Fontaneda, L.A., McLaughlin, A-M., Charlesworth, S.M., Rowlands, E.G. The retention and in-situ treatment of contaminated sediments in laboratory highway filter drain models. Water Efficiency Network Conference (WATEFCON 2016). Water Frontiers: Strategies for 2020 and beyond. Coventry, UK, September 2016. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga

Desta, M.B., Bruen, M., Higgins, N., and Johnston, P., 2007. Highway runoff quality in Ireland. Journal of Environmental Monitoring, 9, 366-371.

Ellis, J.B., Rowlands, E.G., 2007. Highway filter drain waste arisings: A challenge for urban source control management? Water Science and Technology, 56 (10), 125-131.

House of Commons, 2014. Maintaining strategic infrastructure: roads. Fifteenth Report on Session 2014-2015. Committee of Public Accounts. London: The Stationery Office Limited. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga

Ingold, T.S., 1994. Prefabricated fin drains and their application. Geotextiles and Geomembranes: Manual. Elsevier Advance Technology, UK.

Kearns, R.E., 1992. Long-term performance of geocomposites used as highway edge drains. Geotextiles and Geomembranes, 11(4-6), 513-521.

Koerner, G.R., Koerner, R.M., Wilson-Fahmy, R.F., 1996. Field performance of geosynthetic highway drainage systems. ASTM Special Technical Publication, 1281, 165-180.

MCDH, 2009. Manual of Contract Documents for Highway Works. Volume 1 - Specification for Highway Works. Series 500: Drainage and Service Ducts. Highways Agency, UK.

Mitchell, G., 2015. Clogging of filtration SUDS. Long term performance of trunk road filter drains. SUDSnet International Conference, Coventry, UK, 2015.

Newman, A.P., Pratt, C.J., Coupe, S.J., Cresswell, N., 2002. Oil bio-degradation in permeable pavements by microbial communities. Water Science and Technology, 45(7), 51-56.

Nicodeme, C., Diamandouros, K., Diez, J., Durso, C., Brecx, C., Metushi, S., 2013. European Union Road Federation. European Road Statistics 2012. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga

Portelinha, F.H.M., Zornberg, J.G., 2017. Effect of infiltration on the performance of an unsaturated geotextile-reinforced soil wall. Geotextiles and Geomembranes, 45(3), 211-226.

Raymond, O.P., Bathurst, R.J., Hajek, J., 2000. Evaluation and suggested improvements to highway edge drains incorporating geotextiles. Geotextiles and Geomembranes, 18(1), 23-45.

Sañudo-Fontaneda, L.A., Jato-Espino, D., Lashford, C., Coupe, S.J., 2016. Investigation of the design considerations for Highway Filter Drains through the comparison of stormwater management tools with laboratory simulation experiments. 9th International Conference NOVATECH. Planning & Technologies for Sustainable Urban Water Management. Lyon, France.

Sañudo Fontaneda, L.A., Blanco-Fernández, E., Coupe, S.J., Carpio Garcia, J., Newman, A.P., Castro-Fresno, D., 2016. Use of Geosynthetics for Sustainable Drainage. Book chapter in "Sustainable Surface Water Management: A Handbook for SUDS" pp. 142-155. Ed. Wiley, U.S.A., ISBN: 978-1-118-89770-6.

Sañudo-Fontaneda, L.A., Jato-Espino, D., Lashford, C., Coupe, S.J., 2017. Simulation of the hydraulic performance of highway filter drains through laboratory models and stormwater management tools. Environmental Science and Pollution Research, 1-10. Article in Press.

Sañudo-Fontaneda, L. A., Coupe, S. J., Charlesworth, S. M., & Rowlands, E. G. (2018). Exploring the effects of geotextiles in the performance of highway filter drains. Geotextiles and Geomembranes, 46(5), 559-565. doi:10.1016/j.geotexmem.2018.04.006.

Veylon, G., Stoltz, G., Mériaux, P., Faure, Y.-H., Touze-Foltz, N., 2016. Performance of geotextile filters after 18 years' service in drainage trenches. Geotextiles and Geomembranes, 44 (4), pp. 515-533.

Yoo, C., 2016. Hydraulic deterioration of geosynthetic filter drainage system in tunnels – its impact on structural performance of tunnel linings. Geosynthetics International, 23(6), 463-480.

4.6.5.3 Casos de estudio

SUSDRAIN. Filter drains. En: *Case studies*. 2023 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga

4.6.5.4 Referencias a normativas

AENOR, 2001. UNE-EN 13252:2001. Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in drainage systems.

British Standards Institution (BSI), 2006. BS EN 13242: Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. London: BSI.

Bustos, G. and Pérez, E., 2007. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. 5th Edition. Ediciones LITEAM. Madrid, Spain.

DMRB-UK, 1996. Design Manual for Roads and Bridges: Geotechnics and Drainage. Vol. 4, sec. 2, part 3. (HD 33/96). SURFACE AND SUB-SURFACE DRAINAGE SYSTEMS FOR HIGHWAYS. Technical Report, Highways Agency, UK.

DMRB-UK, 1997a. Design Manual for Roads and Bridges: Geotechnics and Drainage. Vol. 4, sec. 2, part 4. (HA 37/97). Hydraulic design of road-edge surface water channels. Technical Report, Highways Agency, UK.

DMRB-UK, 2001. Design Manual for Roads and Bridges: Geotechnics and Drainage. Vol. 4, sec. 2, part 5. (HA 40/01). Determination of pipe and bedding combinations for drainage works. Technical Report, Highways Agency, UK.

DMRB-UK, 2004. Design Manual for Roads and Bridges: Geotechnics and Drainage. Vol. 4, sec. 2, part 1. (HA 106/04). Drainage of runoff from natural catchments. Technical Report, Highways Agency, UK.

4.7 Tanques de almacenamiento

4.7.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Los tanques de almacenamiento o sistemas de almacenamiento de aguas pluviales son SUDS cuyo principal objetivo es el de almacenar el agua de lluvia recogida principalmente en superficies impermeables del tipo cubiertas de edificaciones, sirviendo para su posterior reutilización en usos no potables. Estos sistemas proporcionan un importante ahorro en el uso de agua potable en las edificaciones donde se implantan, destacando especialmente en su uso en viviendas unifamiliares, pudiendo diseñarse con tamaños mayores para dar servicio a centros comerciales y edificios institucionales o de servicios urbanos. En ocasiones, estas técnicas pueden ser utilizadas para mejorar la capacidad de infiltración de un terreno subyacente mediante la instalación de depósitos reticulares bajo capas superficiales de filtro, siendo ideales para la gestión de escorrentía superficial procedente de áreas impermeables adyacentes.

Los tanques de almacenamiento no proporcionan ningún tipo de tratamiento del agua por sí mismos, salvo en aquellos casos en los que se hagan acompañar por una técnica complementaria de eliminación de contaminantes o sean diseñados en conjunto con otras capas superiores que sirvan de filtro previo almacenamiento, lo cual sería recomendable para ser considerados como un SUDS integral que gestione volúmenes de escorrentía y trate sus contaminantes. No obstante, en el caso de no ser diseñados en combinación con dichas técnicas complementarias o capas superiores de filtración, se recomienda que se evite almacenar la primera parte de la lluvia, conocida como primer lavado, desviándola hacia otra estructura de tratamiento, ya que en ese volumen inicial de escorrentía se encontrarán concentrados los contaminantes, especialmente cuando dicho evento de lluvia se da tras un largo periodo seco sin lluvias que permite la acumulación de sedimentos en las cubiertas.

Se recomienda el uso de técnicas complementarias cuando se pretenda reutilizar el agua almacenada en usos no potables como limpieza de vehículos, riego, etc., ya que es habitual la presencia de patógenos debido a la alta exposición de las cubiertas a la presencia de aves y otros vectores biológicos que depositan sus residuos orgánicos sobre las superficies de dichas cubiertas.

Existen dos tipologías fundamentales de tanques de almacenamiento (ver variantes tipológicas en el punto 4.7.3), distinguiéndose entre aquellos diseñados de manera aislada como los tanques de almacenamiento utilizados para dar servicio a viviendas

unifamiliares, y los de mayor tamaño dando servicio a grandes superficies impermeables, también llamados depósitos reticulares.

Esta tipología de SUDS presenta una descripción de menor nivel detalle que otras previamente expuestas en este documento, ya que depende en gran medida de las características ofertadas por los diferentes fabricantes de dichos sistemas, recomendándose su estudio en profundidad previa selección del SUDS.



Figura 61. Depósito de recolección y almacenamiento de escorrentía superficial procedente de cubierta de edificio en el Campus de la North Carolina State University. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Los principales mecanismos que se dan en estos sistemas son los de almacenamiento y atenuación, siendo posible incorporar el de infiltración cuando se diseñan los depósitos reticulares con capas superficiales de filtro. El tratamiento de los contaminantes presentes en la escorrentía se puede lograr a través del diseño combinado de estos sistemas con las técnicas complementarias o dispositivos de tratamiento específicos.

4.7.2 Recomendaciones de diseño

Los tanques de almacenamiento pueden diseñarse, en ocasiones, con un doble objetivo, persiguiendo el almacenamiento del agua de escorrentía captada; y, por otra parte, ser diseñados buscando un objetivo de atenuación por lo que deben de conservar una parte de su volumen para la atenuación, siendo la persona proyectista la responsable de encontrar dicho equilibrio entre ambos objetivos. Lo más habitual es que el sistema sea diseñado íntegramente para servir a una de esas dos funcionalidades, no siendo necesaria dicha consideración.

Se recomienda el cálculo del volumen y caudal de escorrentía que llegará al SUDS mediante el uso de la norma 5.2-IC de drenaje superficial, revisando que se cumple con la capacidad hidráulica del sistema, así como con el caudal punta correspondiente a un periodo de retorno de 25 años sin generar problemas de rebose, siendo el periodo de 10 años indispensable como valor mínimo de diseño.

Como en SUDS anteriores, se debe de incluir una estructura de alivio a la red de drenaje convencional o hacia cauce natural según corresponda (siendo necesaria una autorización de vertido en este último caso), de forma que se eviten posibles eventos de inundación del SUDS hacia las áreas adyacentes en el hipotético escenario de verse desbordado por un potencial mal funcionamiento que requiera de labores de mantenimiento.

Los elementos estándar de un tanque de almacenamiento y sus funciones principales son las siguientes, distinguiendo directamente su variante tipológica dada la diversidad de elementos existentes en cada una de ellas, que imposibilita seguir los apartados previamente establecidos para otros SUDS.

- Tanque o cisterna. Tanque construido sobre la superficie, enterrado o parcialmente enterrado que almacena el agua de lluvia recogida en la cubierta de la edificación. Suele construirse con materiales plásticos o metálicos.
- Pantallas de filtración. Elementos insertados en el diseñado para evitar el ingreso al tanque de sedimentos, residuos o escombros, hojas, etc. Se recomienda su inclusión en las canaletas de la cubierta, así como en la entrada al sistema y en su salida hacia la bomba de agua que permite la reutilización del agua de lluvia almacenada, protegiéndola de sedimentos que puedan provocar su colmatación y mal funcionamiento.

- Desviador del flujo del primer lavado. Elemento desviador del flujo más contaminante de la escorrentía superficial hacia elemento de tratamiento específico, evitando su ingreso en el tanque o cisterna.

Además de las capas anteriormente expuestas, se deben añadir los siguientes elementos constructivos complementarios al diseño con sus respectivas funciones asociadas también con la operación, mantenimiento y monitorización del sistema:

- Canaletas y bajantes. Sistemas del drenaje convencional que permiten captar el agua de lluvia de las cubiertas de edificaciones unifamiliares y llevarlas de forma segura hacia el tanque de almacenamiento.
- Elemento o estructura de rebose. Elemento diseñado para gestionar el exceso de lluvia que no puede ser atenuado o almacenado en el tanque.
- Bomba. La bomba se utiliza para bombear un flujo de agua necesario para la reutilización del agua almacenada con usos no potables.
- Sistema secundario de abastecimiento de agua. Sistema para aportar agua al tanque en caso de necesidad por un largo periodo seco.

Las recomendaciones generales y los criterios mínimos de diseño para el dimensionamiento de un tanque de almacenamiento del tipo doméstico se presentan a continuación:

- Dimensionamiento del tanque de almacenamiento. Se recomienda diseñar el tanque para gestionar el volumen de escorrentía superficial generada por la cubierta de la edificación y producida por la lluvia de diseño para la ciudad de Gijón (Ec. 39).

$$V_{tanque} = S_{ph} \times h_p \times F_s \qquad \text{Ec. 39}$$

Donde:

  - V_{tanque} = volumen del tanque de almacenamiento requerido (m^3).
  - S_{ph} = área de la proyección horizontal de la cubierta (m^2).
  - h_p = valor de la lluvia de diseño para la ciudad de Gijón (mm).
  - F_s = factor de seguridad. Se recomienda usar un valor mínimo de $1{,}2 \times 10^{-3}$ (m/mm).

- Volúmenes y ratios de uso. Se recomienda estimar el balance de agua para establecer los niveles de uso del tanque de almacenamiento, aplicando las siguientes recomendaciones técnicas:

  - Vaciado del sistema en un periodo no superior a 2 días en caso de necesidad de vaciado por la venida de un evento de lluvia intenso, en caso de que el sistema esté diseñado también ara actuar como elemento de atenuación.
  - Desvío de una altura de lluvia de hasta 1 mm asociada con el primer lavado.

- Especificaciones generales sobre los tanques. En el escenario de que el tanque se ejecute y construya por encima del nivel del suelo, el color del tanque y el material utilizado en su construcción debe de impedir el acceso de la luz para evitar el crecimiento de algas en el interior del depósito. Además, las canaletas y las bajantes deben de estar diseñadas de forma que puedan dirigir el volumen de agua asociado con la lluvia de diseño.
- Dimensionamiento de tanque con objetivo dual de almacenamiento y atenuación. En el escenario de buscar una funcionalidad dual, habrá que diseñar los elementos del sistema que permitan el vaciado pasivo y la gestión del exceso de lluvia entrando al tanque. Por lo tanto, se recomienda el uso de las siguientes expresiones matemáticas para la determinación del diámetro del tubo de vaciado pasivo (Ec. 40 y Ec. 41).

$$A_o = \frac{2 \times A_{tanque} \times \left[h_0^{1/2} - h_f^{1/2}\right]}{C_d \times t \times [2 \times g]^{1/2}} \qquad \text{Ec. 40}$$

Donde:

  - A_o = Área del orificio de salida del tubo de vaciado pasivo (m²).
  - A_{tanque} = superficie de la sección transversal del tanque de almacenamiento (m²).
  - h_0 y h_f = distancia medida verticalmente desde el punto central del tubo de vaciado hasta la parte inferior del elemento de rebose (m), y altura final del agua tras vaciado medida desde el punto central del tubo de vaciado (habitualmente 0 m), respectivamente.
  - C_d = coeficiente adimensional de valor 0,6.
  - F_s = factor de seguridad. Se recomienda usar un valor mínimo de 1,2 × 10^{-3} (m/mm).
  - g = valor de la gravedad (9,81 m/s²).

$$d = \sqrt{\frac{4 \times A_0}{\pi}}$$ Ec. 41

Donde:

- d = diámetro del orificio (m).
- A_o = área del orificio (m²).

Para el cálculo de los caudales pico a utilizar en la cuneta vegetada, se deberá de utilizar el punto 8.3.2 de este manual.

4.7.3 Variantes tipológicas

Existen dos tipologías básicas de tanques de almacenamiento, distinguiéndose entre los depósitos domésticos con la doble función de almacenamiento y reutilización, o la triple función de almacenamiento, reutilización y atenuación; y los depósitos reticulares con capas superiores de filtro, los cuales suelen ocupar superficies mayores y dar servicio a áreas impermeables de mayor tamaño que una cubierta de edificio unifamiliar.

4.7.3.1 Depósitos domésticos / tanques de almacenamiento de viviendas unifamiliares – TAN1

Los depósitos domésticos permiten recoger el agua de lluvia de las cubiertas de la vivienda para su posterior reutilización con fines no potables dentro de la unidad familiar. También existe la posibilidad de diseñar tanques / cisternas de mayor volumen (incluso trabajando en serie como en la Figura 62) de forma que puedan dar servicio de agua no potable a edificaciones de servicios urbanos como parques de bomberos, tal y como aparece reflejado en la imagen inferior.



Figura 62. Tanques de almacenamiento para viviendas o edificios de servicios públicos. Fotografía: Carlos Rey Mahía.

4.7.3.2 Depósitos reticulares – TAN2

Los depósitos reticulares son una variante de diseño de los tanques de almacenamiento consistente en la inclusión de estructuras reticulares que permiten el almacenamiento y la infiltración de la escorrentía superficial (si esta última ha sido incluida en el diseño con esa doble función). Estos depósitos permiten aumentar el volumen de agua almacenada, siendo recomendad su implementación dentro de la estructura de algún SUDS en sustitución del material árido utilizado en la capa de almacenamiento.

No obstante, es importante manifestar que el uso de estas estructuras en sí mismas no representa un SUDS, ya que no cumplirían con los pilares de diseño de los SUDS aceptados como el marco conceptual de diseño ingenieril. De ser utilizados en solitario se considerarían técnicas complementarias (ver 4.9).

Estos depósitos también pueden ser diseñados exclusivamente para infiltrar el agua al terreno, en cuyo caso, reciben el nombre de depósitos de infiltración.

4.7.4 Operación, mantenimiento y monitorización

Las labores de operación y mantenimiento recomendadas sobre un tanque de almacenamiento se presentan resumidas en la Tabla 40. Se incluyen dentro de las labores de operación y mantenimiento aquellas relacionadas con las tareas de inspección para comprobar que el SUDS funciona correctamente según el diseño propuesto para su construcción.

Las labores de mantenimiento podrían dividirse entre aquellas planificadas con antelación (preventivas) con el objetivo de detectar reducciones en el comportamiento de algún componente del sistema de manera temprana, y aquellas tomadas tras un fallo del sistema y que requieren medidas correctoras para recuperar la funcionalidad del SUDS (correctoras).

Tabla 40. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un tanque de almacenamiento, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Canaletas, bajantes y pantallas de filtro	Inspección visual y análisis descriptivo del estado de las canaletas y bajantes	Aparición de pérdidas de agua previas a la entrada al tanque / cisterna	Mensual (inspección regular)
	Inspección de las pantallas de filtración	Entrada de residuos en el interior del tanque	Mensual (inspección regular)
	Control de plagas	Presencia de especies animales potencialmente peligrosas o de vectores sanitarios	Bajo necesidad (medida correctora)
	Reparaciones menores por acumulación de sedimentos en canaletas y bajantes	Colmatación de canaletas y bajantes por exceso de sedimentos	Bajo necesidad (medida correctora)
Tanques / cisternas	Vaciado del tanque para realizar labores de mantenimiento mediante válvula	Posible fallo de la válvula de vaciado	Mensual (inspección ocasional)
	Inspección visual de la estructura de la cisterna	Aparición de grietas en la estructura	Bajo necesidad (medida correctora)
	Reemplazo completo del tanque	Fallo catastrófico del sistema por rotura del tanque	Bajo necesidad (medida correctora)
Elementos de desagüe	Inspección de elementos de desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de transporte y vertido	Obstrucción de tuberías a través de la reducción en el flujo de salida del sistema	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tras evento de lluvia	Reducción de los caudales de salida	Quincenal (inspección regular)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las estructuras de monitorización de su funcionamiento y las de rebose	Mantenimiento de los equipos de instrumentación	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento (mantenimiento regular)
	Comprobación del correcto funcionamiento de las estructuras de rebose del sistema	Eventos de desbordamiento del SUDS en episodios de lluvia	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

La monitorización de un tanque de almacenamiento debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal recogido en la cubierta del edificio.
- Registro de la altura de agua en el interior del tanque de almacenamiento.
- Medición del caudal de rebose o saliente del tanque a través del orificio de rebose.
- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.).

Para ello, habría que ejecutar una serie de elementos auxiliares de obra civil que permitan albergar los instrumentos de monitorización, tales como arquetas y casetas de monitorización. En condiciones ideales, se recomienda la instalación de los siguientes instrumentos:

- Instalación de estaciones meteorológicas o de pluviómetros.
- Caudalímetros para el registro de caudales.
- Toma-muestras automáticos de la calidad de aguas en el interior del tanque para asegurarse que el agua de lluvia almacenada cumple con las condiciones mínimas para los diferentes usos no potables.

4.7.5 Referencias especializadas en tanques de almacenamiento

4.7.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 17. Swales*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.7.5.2 Referencias a artículos científicos, conferencias y cursos de extensión

Guo, Y., & Baetz, B. W. (2007). Sizing of rainwater storage units for green building applications. Journal of Hydrologic Engineering, 12(2), 197-205. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(197).

Jones, M. P., & Hunt, W. F. (2010). Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern united states. Resources, Conservation and Recycling, 54(10), 623-629. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.11.002.

Shuster, W. D., Lye, D., De La Cruz, A., Rhea, L. K., O'Connell, K., & Kelty, A. (2013). Assessment of residential rain barrel water quality and use in Cincinnati, Ohio1. Journal of the American Water Resources Association, 49(4), 753-765. doi:10.1111/jawr.12036.

Steffen, J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., & Burian, S. J. (2013). Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U.S. cities. Journal of the American Water Resources Association, 49(4), 810-824. doi: 10.1111/jawr.12038.

Wong, P. (2020). Design and construction of plastic geocellular rain water harvesting / stormwater detention tanks. Australian Geomechanics Journal, 55(3), 75-84.

4.7.5.3 Casos de estudio

SUSDRAIN. Geocellular storage systems. En: *Case studies*. 2023 [acceso 29 enero 2024] Enlace de consulta

U.S. Environmental Protection Agency. *Case Studies Analyzing the Economic Benefits of Low Impact Development and Green Infrastructure Programs*. EPA 841-R-13-004. Agosto, 2013. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.8 Estanques húmedos y humedales

4.8.1 Definición y descripción de su funcionamiento

Los estanques húmedos y los humedales son técnicas SUDS, las cuales pueden ser tanto naturales como artificiales o construidas, que aportan diferentes niveles de biodiversidad y que están diseñados para permitir mantener una altura de lámina de agua permanente. Los estanques son elementos muy efectivos para atrapar sólidos en suspensión.

Su principal función es la de atenuar grandes volúmenes de agua en comparación con las técnicas SUDS anteriormente descritas en este manual técnico. Además, contribuyen a un tratamiento biológico de la escorrentía superficial mediante las especies vegetales existentes en el interior de ambas técnicas, llegando a convertirse en auténticos ecosistemas urbanos, especialmente en el caso de los humedales.

El volumen de atenuación se controla a través de la disposición de elementos constructivos de rebose y descarga, permitiendo un almacenamiento temporal de agua entre la altura de lámina permanente y la máxima permitida a través de dichos elementos.



Figura 63. Humedal en el área de la ciudad de Wilmington, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Es importante diseñar estas técnicas considerando su protección frente a la erosión y su potencial conexión con otros humedales naturales de forma que permitan la estabilización del flujo hacia dichos elementos naturales evitando que se vean negativamente afectados. De la misma manera, se considera importante evitar la resuspensión de los sedimentos capturados en el sistema, los cuales deberán de ser monitorizados a lo largo del tiempo para sus posteriores labores de conservación y mantenimiento.

4.8.2 Recomendaciones de diseño

Los estanques y humedales deben de diseñarse como elementos de seguridad frente a lluvias de grandes intensidades, siendo capaces de retener el volumen encerrado entre la lámina de agua permanente y la temporal por un mínimo de 2 a 5 días, de forma que los contaminantes presentes en la escorrentía puedan ser tratados.

Las principales zonas que se distinguen en dicha práctica SUDS son las siguientes:

- Zona de pretratamiento. Área que ocupa entre un 10% y un 25% de la superficie total de la técnica SUDS y diseñada específicamente con el objetivo de servir de elemento de tratamiento inicial de la escorrentía superficial que proviene de la cuenca drenada hacia el sistema.
- Cuenca superficial del estanque / humedal. Área principal del sistema ocupada por las especies vegetales y donde se sitúa la lámina de agua permanente.
- Lámina de agua permanente. Distancia en altura entre la superficie vegetal y la lámina de agua que ha de mantenerse permanente. La profundidad de la lámina es variable en función de la vegetación que se emplee en cada caso, siendo necesarias profundidades de hasta 1 m en algunos casos y otras de más superficiales en torno a los 0,4 m en los márgenes.
- Volumen de atenuación y almacenamiento. La distancia entre la lámina de agua permanente y la temporal determina el volumen de almacenamiento y suele limitarse a 0,5 m en el caso de estanques de pequeño y mediano tamaño, siendo de 0,2 a 0,4 m para humedales de mayor superficie.

Existen varias formulaciones para determinar el volumen de almacenamiento en este tipo de técnicas, siendo la recomendada por el North Carolina State Stormwater Manual la más aconsejable para el caso de diseño que se propone en este manual técnico (Ec. 42).

$$V_a = 0{,}87 \times \frac{t_r}{t_e} \times V_D \qquad \text{Ec. 42}$$

Donde:

- V_a = volumen de almacenamiento proporcionad por el SUDS (m^3).
- t_r = tiempo de residencia hidráulica requerido (días).
- t_e = tiempo entre eventos de lluvia consecutivos (días).
- V_D = volumen de diseño (m^3).

La disposición de los elementos de entrada y salida al sistema debieran de situarse lo más alejados posible entre sí para facilitar el aumento del tiempo de residencia del flujo de escorrentía dentro del SUDS.

Dado su mayor tamaño, en especial en el caso de los humedales, estas técnicas pueden dar respuesta a periodos de retorno que pueden alcanzar los 100 años.

Por otra parte, considerando la alta componente de biodiversidad de estos sistemas y su alta capacidad paisajística, deben de tenerse en cuenta otros elementos de diseño asociados con la amenidad tal y como se expone en el punto 2.1 de este manual.

El diseño de estanques y humedales presenta una elevada complejidad debido a que requieren de un cuidadoso estudio biológico y medioambiental, sugiriéndose la participación de expertos en la temática para la correcta selección de los elementos biológicos.

Uno de los elementos diferenciales con respecto a otras técnicas es el de la planificación paisajística, recomendándose incluir los siguientes elementos:

- Delimitación y diseño de las zonas que llevarán las especies vegetales.
- Lista de especies vegetales, número de plantas requeridas y número mínimo de diferentes especies necesitadas. Cabe recordar en este punto la importancia de incluir varias especies diferenciadas en caso de que alguna de ellas sufra problemas de enfermedades o de crecimiento y no ermita un desarrollo biológico adecuado a las necesidades de tratamiento de la calidad de aguas, además de los objetivos de biodiversidad y paisajísticos.
- Usar especies autóctonas.
- Tamaño mínimo de las especies vegetales.
- Planificar la secuenciación y franja temporal en el desarrollo de la cama del humedal a través de la construcción de suelos técnicos, fertilización, riego y otras labores propias de jardinería en el cuidado del suelo y el crecimiento de las especies vegetales.

- Especificar tipo y número de plantas suplementarias en caso de necesidad de sustituir los implantadas inicialmente por pérdidas o daños.

Además, es importante reseñar que estas técnicas pueden diseñarse con la intención de infiltrar o no al terreno, debiéndose de tener en cuenta por el potencial vertido al terreno en caso de infiltrar. El escenario más común, sobre todo cuando se refiere al caso de los estanques de pequeño y mediano tamaño, es el de impermeabilizar la cuenca del estanque haciendo que éste actúe como un recipiente de almacenamiento del agua de escorrentía, necesitando entonces de los elementos necesarios de evacuación del agua almacenada y el mantenimiento de la altura mínima de la lámina de agua. Para lograr la impermeabilización será necesario el empleo de geosintéticos. En este caso, se recomienda que el geosintético se sitúe 30 cm por debajo de la superficie de la cuenca superficial del estanque o humedal para evitar daños por erosión del mismo. Si la impermeabilización se lleva a cabo a través del uso de materiales arcillosos, éstos debieran de tener una permeabilidad una vez compactados de 1 x 10^{-9} m/s según el manual de SUDS británico (Woods Ballard et al. 2015). De la misma manera, el espesor de dicha capa debería de superar los 50 cm, llegando incluso a 1 m.

La plantación de las especies vegetales debe de quedar establecida en torno a las 6-8 semanas del final de la construcción del sistema SUDS.

4.8.3 Variantes tipológicas

4.8.3.1 Estanques húmedos – HUM1

La tipología de estanque húmedo es una de las más empeladas internacionalmente en áreas de parques y jardines de entornos urbanos por su elevado valor social y su aportación al sostenimiento de la biodiversidad de la zona de aplicación (Figura 64 y Figura 65).



Figura 64. Estanque en el Museo de Arte de Raleigh, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Carlos Rey Mahía.



Figura 65. Estanque o lago artificial en el Parque de Isabel la Católica, Gijón. Fotografía: Luis Manso Ibaseta.

Otro ejemplo de uso de este tipo de estanques pueden encontrarse en la Figura 66, variando su uso desde el ámbito urbano hasta áreas rurales donde se necesita su presencia para el tratamiento de contaminantes en granjas previo vertido a cauce natural.



Figura 66. Estanque gestionando la escorrentía superficial de una granja en Yorkshire, Reino Unido. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

4.8.3.2 Humedales – HUM2

Los humedales son técnicas que presentan una mayor ocupación del territorio que los estanques, compartiendo con ellos muchos elementos de diseño y constructivos.



Figura 67. Desarrollo de estanque hacia un humedal en las afueras de la ciudad de Wilmington, Carolina del Norte, EE. UU. Fotografía: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

Existen también otro tipo de variantes en los humedales en las que se introducen estructuras flotantes que portan especies vegetales especialmente incluidas para el tratamiento de determinados contaminantes (ver Figura 68).



Figura 68. Estructuras flotantes de tratamiento instaladas en estanque y humedales en el Campus de la North Carolina State University, EE. UU. Fotografía: Antonio Menéndez Suárez-Inclán.

En el escenario de implementación de estructuras flotantes, éstas deberán de situarse al menos a unos 3 m de distancia del elemento de entrada de la escorrentía superficial al sistema. Las especies vegetales utilizadas debieran de cubrir un 85% de la superficie del elemento flotante, así como presentar una densidad superficial de 1 planta/0,6m^2. Se debe de diseñar un elemento de anclaje de la estructura flotante que sea capaz de resistir a las condiciones acuáticas del humedal.

Por otra parte, se deberán de disponer elementos de seguridad para impedir la presencia de aves en el interior de dichas estructuras, pudiendo dañarlas.

4.8.4 Operación, mantenimiento y monitorización

Las labores de mantenimiento deben de ser propuestas por aquellos departamentos responsables de la gestión de este tipo de infraestructuras en el ayuntamiento, con especial atención a la vertiente biológica del mismo. No obstante, se proponen algunas actividades o tareas de mantenimiento a continuación.

Tabla 41. Labores generales de operación y mantenimiento a realizar en un estanque / humedal, incluyendo inspecciones de comprobación del funcionamiento del SUDS.

Componente del SUDS	Descripción de la labor	Indicador/es	Periodicidad de la labor y tipo de esquema
Cuenca principal del SUDS	Inspección visual y análisis descriptivo del estado de la cuenca	Observación de la sedimentación en el fondo del estanque / humedal	Mensual (inspección regular)
	Control de plagas	Presencia de especies animales potencialmente peligrosas o de vectores sanitarios	Bajo necesidad (medida correctora)
	Aireación del estanque / humedal	Aparición de signos de eutrofización en el sistema	Bajo necesidad (medida correctora)
	Replantado de especies vegetales	Pérdida de plantas en el sistema	Bajo necesidad (medida correctora)
	Corte y poda de especies vegetales para mantener una altura sobre la lámina de agua determinada por diseño	Exceso de altura de la vegetación de estanque / humedal sobre la lámina de agua	Bianual (inspección ocasional)
Elementos de entrada y desagüe del sistema	Inspección de elementos de entrada y desagüe del SUDS para analizar posibles colmataciones o bloqueos de las tuberías de transporte y vertido	Obstrucción de tuberías o vertederos de salida a través de la reducción en el flujo de salida del sistema	Quincenal (inspección regular)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los elementos de desagüe tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en tuberías y vertederos	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Comprobación de los flujos de salida de escorrentía tras evento de lluvia extremo	Reducción de los caudales de salida	Quincenal (inspección regular)
Otros elementos auxiliares del SUDS, incluyendo las estructuras de monitorización de su funcionamiento	Mantenimiento de los equipos de monitorización del sistema	Comprobación de lecturas anómalas	Bajo requerimiento de fabricante para cada instrumento (mantenimiento regular)
	Comprobación del correcto funcionamiento de las estructuras de rebose del sistema	Eventos de desbordamiento del SUDS en episodios de lluvia	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)
	Inspección visual de posibles daños estructurales en los instrumentos y estructuras de monitorización tras eventos extremos de precipitaciones	Aparición de daños estructurales en los elementos de monitorización y roturas de instrumentos de monitorización	Bajo necesidad (medida ocasional tras evento extremo)

La monitorización de un humedal o de un estanque debiera de incluir, al menos, los siguientes elementos:

- Medida del caudal de entrada al sistema.
- Registro de la altura de agua sobre la lámina permanente del SUDS.
- Medición del caudal de rebose y/o desagüe del sistema.

- Registro de las condiciones climatológicas de la zona de estudio (ej.: precipitaciones, temperatura, humedad del suelo, etc.).
- Medida de la altura de sedimentación en el fondo del sistema.

Para ello, habría que ejecutar una serie de elementos auxiliares de obra civil que permitan albergar los instrumentos de monitorización, tales como arquetas y casetas de monitorización. En condiciones ideales, se recomienda la instalación de los siguientes instrumentos:

- Instalación de estaciones meteorológicas o de pluviómetros.
- Caudalímetros para el registro de caudales de entrada y salida del sistema.
- Toma-muestras automáticos de la calidad de aguas en el interior del SUDS para asegurarse que el agua de lluvia almacenada y tratada cumple con las condiciones mínimas de este tipo de sistemas.

Se recomienda que, una vez establecido el humedal, debe de hacerse una visita de monitorización al sistema 24 horas después de eventos de lluvia superiores al de diseño determinado en el presente manual técnico de diseño.

4.8.5 Referencias especializadas en estanques y humedales

4.8.5.1 Referencias a guías y manuales técnicos

California Department of Transportation. *Design Guidance*. En: *Caltrans Storm Water Quality Handbook*. Sacramento, EE. UU.: Septiembre, 2012 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. En: Observatorio Ambiental de Bogotá. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Acueducto de Bogotá. Octubre, 4, 2021 [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

County of Los Angeles Department of Public Works. *Low Impact Development Standards Manual*. Los Angeles, EE. UU.: 2014. Febrero, 1, 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

North Carolina Department of Environmental Quality. *C-3. Wet Pond*. En: *Stormwater Design Manual*. Noviembre, 20, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

North Carolina Department of Environmental Quality. *C-4. Stormwater Wetland*. En: *Stormwater Design Manual*. Noviembre, 20, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. *C. 18. Bioretention systems*. En: *The SUDS Manual*. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

4.8.5.2 Casos de estudio

SUSDRAIN. Retention ponds and wetlands. En: *Case studies*. 2023 [acceso 29 enero 2024] Enlace de consulta

4.9 Técnicas complementarias

Las técnicas complementarias pueden definirse como sistemas o productos especializados de ingeniería principalmente diseñados para el tratamiento y eliminación de determinados contaminantes presentes en la escorrentía superficial urbana. Las técnicas complementarias son empleadas habitualmente en áreas de poca extensión con el objeto de aumentar la capacidad de tratamiento del SUDS al que acompañan, no representado por sí mismos un SUDS. Ejemplos de técnicas complementarias son los separadores hidrodinámicos, los separadores de aceites y las trampas de sedimentos, entre otros. Los mecanismos de tratamiento más destacables son los siguientes: filtración biológica, filtración y adsorción, eliminación física de sedimentos y ciclos de secado y humectación para la degradación de contaminantes.

Siguiendo la filosofía de este documento de no recomendar marcas ni fabricantes, se deja al criterio de la persona proyectista la selección de aquellas técnicas más adecuadas para alcanzar los objetivos de tratamiento marcadas en cada proyecto en función de las características de los contaminantes de la escorrentía superficial presentes en la zona de estudio. No obstante, se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos en la selección de la técnica complementaria a utilizar en combinación con el SUDS:

- Que el producto esté verificado técnica y científicamente en el tratamiento de los contaminantes especificados en su manual de operación. Los criterios recomendados para el estudio de prueba son los siguientes:
    - Tomar muestras de al menos 20 eventos de lluvia independientes durante un año, recomendando llevar a cabo el estudio en campo y en condiciones reales de funcionamiento, no en condiciones de laboratorio mediante modelos a escala.
    - El funcionamiento del producto debe de ser verificado por una tercera parte independiente.
    - La monitorización del funcionamiento de la técnica seleccionada debe de comprobarse siguiendo protocolos estándar asociados con los distintos contaminantes objeto de estudio, tanto aguas arriba, como aguas abajo del sistema.
    - Se pueden aceptar estudios llevado a cabo en condiciones y escenarios equivalentes al de la zona de estudio, siempre y cuando venga debidamente justificado.

- La técnica complementaria debe de tener una trayectoria demostrada de funcionamiento en campo y longevidad garantizada bajo las condiciones específicas del municipio de Gijón.

Referencias

[1]. Abrahams, J., Coupe, S., Sañudo-Fontaneda, L., Schmutz, U. The Brookside Farm Wetland Ecosystem Treatment (WET) System: A Low-Energy Methodology for Sewage Purification, Biomass Production (Yield), Flood Resilience and Biodiversity Enhancement. *Sustainability* 2017, vol. 9, no.1. pp 147. DOI: 10.3390/su9010147 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[2]. Agencia Estatal de Meteorología. Sección OpenData de la AEMET. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[3]. Ahammed, F., Hewa, G. A., & Argue, J. R. (2012). Applying multi-criteria decision analysis to select WSUD and LID technologies. *Water Science and Technology: Water Supply*, *12*(6), 844–853. https://doi.org/10.2166/ws.2012.060

[4]. Alvem, B. -M., and Grönjord, R. *Plant beds in Stockholm city - a handbook*, 3ª ed., Estocolmo, Suecia: City of Stockholm, 2017. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[5]. Alves, P. B. R., Rufino, I. A. A., Feitosa, P. H. C., Djordjević, S., & Javadi, A. (2020). Land-use and legislation-based methodology for the implementation of sustainable drainage systems in the semi-arid region of Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/su12020661

[6]. Andrés-Doménech, I., Anta, J., Perales-Momparler, S., Rodriguez-Hernandez, J. Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis. *Sustainability* 2021, 13, 2791. DOI: 10.3390/su13052791. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[7]. Andrés-Valeri, V.C., Castro-Fresno, D., Sañudo-Fontaneda, L.A., Rodriguez-Hernandez, J. Comparative analysis of the outflow water quality of two sustainable linear drainage systems. *Water Science and Technology* 2014, vol. 70., no. 8. pp 1341–1347. DOI: 10.2166/wst.2014.382.

[8]. Ariza, S. L. J., 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 (Switzerland)*, *11*(8). [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[9]. Avery, L.M. Rural Sustainable Drainage Systems (RSuDS). Londres, Reino Unido: Environmental Agency, 2012, ISBN 9781849112772. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[10]. ASTM F1815-06 *Standard test methods for saturated hydraulic conductivity, water retention, porosity, and bulk density of athletic rootzones*.

[11]. Ávila, H., Amaris, G., & Buelvas, J. (2016). Identifying Potential Areas for SUDS Application in Consolidated Urban Watersheds Based on GIS. *World Environmental And Water Resources Congress 2016: Water, Wastewater, and Stormwater and Urban Watershed Symposium - Papers from Sessions of the Proceedings of the 2016 World Environmental and Water Resources Congress*, (2005), 106–114. https://doi.org/10.1061/9780784479889.012

[12]. Barreto, W., Ramos, N., Castro, K., Torres, J., Torres, R., & Picón, R. (2020). Development of a GIS Tool for Sustainable Urban Drainage Systems Evaluation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *503*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012033

[13]. California Department of Transportation. *Biofiltration swale. Design Guidance*. En: *Caltrans Storm Water Quality Handbook*. Sacramento, EE. UU.: Septiembre, 2012 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[14]. Carballo, G., Chesa, M. J., Higuero, A., Esbrí, Ò., Garriga, J., Gamas, M., Solà, À., de Castro, D. *GUIA TÈCNICA PER AL DISSENY DE SISTEMES DE DRENATGE URBÀ SOSTENIBLE SUDS*. Barcelona: Comissió de Sistemes de Drenatge Urbà Sostenible (SUDS), Medi Ambient i Serveis Urbans. Ecologia Urbana, Ajuntament de Barcelona, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[15]. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. *Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. En: Observatorio Ambiental de Bogotá. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Acueducto de Bogotá. Octubre, 4, 2021 [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

[16]. City of Melbourne. City of Melbourne WSUD Guidelines. Applying the Model WSUD Guidelines. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

[17]. City of Melbourne. Raingarden tree pits. En: Urban Water. Melbourne, Australia. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[18]. City of San Francisco. San Francisco Stormwater Management Requirements and Design Guidelines. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[19]. City of Townsville. Chapter 2 – Swales (incorporating buffer strips). En: WSUD Technical Design Guidelines for the Coastal Dry Tropics. Townsville, Queensland, Australia, 2022. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[20]. COGERSA. Proyectos de I+D+i – RecyBlock Sostenible. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[21]. County of Los Angeles Department of Public Works. *Low Impact Development Standards Manual*. Los Angeles, EE. UU.: 2014. Febrero, 1, 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[22]. Dang, V. T., Wang, J., & Van-Thac Dang, W. (2019). An integrated fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS approach to assess sustainable urban development in an emerging economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(16), 1–20. https://doi.org/10.3390/ijerph16162902

[23]. Davis, A.P. Field performance of bioretention: Water quality. *Environmental Engineering Science*, 2009, vol. 24, no. 8. pp. 1048-1064. DOI: 10.1089/ees.2006.0190.

[24]. Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G., Clar, M. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, vol. 135, no. 3. pp. 109-117. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109).

[25]. Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G. (2022). Green Stormwater Infrastructure. Fundamentals and Design. Editorial Wiley. ISBN: 9781118590195

[26]. De la Fuente García, L., Perales Momparler, S., Rico Cortés, M., Andrés Doménech, I., Marco Segura, J. B. *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*. Valencia: Cicle Integral de l'Aigua. Ajuntament de València, 2021. ISBN 978-84-9089-386-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[27]. de Oliveira Campos, P. C., da Silva Rocha Paz, T., Lenz, L., Qiu, Y., Alves, C. N., Simoni, A. P. R., … Paz, I. (2020). Multi-criteria decision method for sustainable watercourse management in Urban Areas. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(16). https://doi.org/10.3390/su12166493

[28]. Department of Planning and Local Government del Government of South Australia. Technical manual for water sensitive urban design in Greater Adelaide. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[29]. Eagleson. Climate, Soil, and Vegetation 2. The Distribution of Annual Precipitation Derived From Observed Storm Sequences. Water Resources Research 1978, vol. 14, no. 5. pp. 713-721. DOI: 10.1029/WR014i005p00713.

[30]. El Hattab, M. H., Theodoropoulos, G., Rong, X., & Mijic, A. (2020). Applying the

systems approach to decompose the SuDS decision-making process for appropriate hydrologic model selection. *Water (Switzerland)*, *12*(3), 1–15. https://doi.org/10.3390/w12030632

[31]. Ellis, J.B., Revitt, M. and Lundy, L. An impact assessment methodology for urban surface runoff quality following best practice treatment. Science of the Total Environment 2012, vol. 416, pp. 172-179.

[32]. Embrén, B., Alvem, B. -M., Stål, Ö, and Orvesten, A. *Planting Beds in the City of Stockholm, A Handbook*. Estocolmo, Suecia: City of Stockholm, 2009.

[33]. Failache, M., Pons, N., Pejon, O., & Zuquette, L. (2022). *Suitability Zoning for Sustainable Drainage Systems (SuDSs): Application in a Basin in Southern Brazil*. 1–29.

[34]. Fardel, A., Peyneau, P.-E., Béchet, B., Lakel, A., Rodriguez, F. Analysis of swale factors implicated in pollutant removal efficiency using a swale database. *Environmental Science and Pollution Research* 2019, vol. 26. pp 1287–1302. DOI: 10.1007/s11356-018-3522-9.

[35]. Furén, R., Flanagan, K., Winston, R.J., Tirpak, R. A., Dorsey, J. D., Viklander, M., Blecken, G.-T. Occurrence, concentration, and distribution of 38 organic micropollutants in the filter material of 12 stormwater bioretention facilities. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 846, pp. 157372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157372

[36]. Galleto, F.A., Cabatuan, M.K., Africa, A.D.M., Maniquiz-Redillas, M. C., Navaluna, J. M., Herrera, J. C. Q., Ubando, A. T., Culaba, A.B., Redillas, M.C.F.R. Bioretention Systems Optimization and Design Characterization Model Using Fuzzy Rough Set Theory. *Water (Switzerland)*, 2022, vol. 14, no. 13. pp. 2037. DOI: [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[37]. Gavrić, S., Leonhardt, G., Marsalek, J., Viklander, M. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment* 2019, vol. 669, no. 15. pp 431–447. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.072.

[38]. Göbel, P. Dierkes, C. Coldewey, W. G. Storm water runoff concentration matrix for urban areas. Journal of Contaminant Hydrology 2007, vol. 91, pp. 26-42.

[39]. Gomes Calixto, K., Wendland, E. C., & Melo, D. de C. D. (2020). Hydrologic performance assessment of regulated and alternative strategies for flood mitigation: a case study in São Paulo, Brazil. *Urban Water Journal*, *17*(5), 481–489. https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1773509

[40]. Goncalves, M. L. R., Zischg, J., Rau, S., Sitzmann, M., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2018). Modeling the effects of introducing low impact development in a tropical city: A case study from Joinville, Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(3). https://doi.org/10.3390/su10030728

[41]. Green Blue Management. Estudio de aprovechamiento de las aguas pluviales mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en la actualización del Plan Técnico para el Aprovechamiento de los Recursos Hídricos Alternativos de Barcelona. Barcelona: Barcelona Cicle de l'Aigua – BCASA. Medi Ambient i Serveis Urbans – Ecologia Urbana, Ajuntament de Barcelona, 2018. [acceso 25 septiembre 2022] Enlace de descarga libre

[42]. Gudiyangada Nachappa, T., Tavakkoli Piralilou, S., Gholamnia, K., Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. Journal of Hydrology, 590(November 2019), 125275. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125275

[43]. Horstmeyer, N., Huber, M., Drewes, J.E., Helmreich, B. Evaluation of site-specific factors influencing heavy metal contents in the topsoil of vegetated infiltration swales. *Science of the Total Environment* 2016, vol. 560–561. pp 19–28. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.051.

[44]. Hunt, W.F., Davis, A.P., Traver, R.G. Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, vol. 138, no. 6. pp. 698-707. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000504.

[45]. Hunt, W. F. *Bioretention design fundamentals + selecting bioretention media: practical cases in the US*. En: Curso internacional introductorio al diseño y planificación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), (Mieres 9-11 de diciembre 2020). Mieres: Universidad de Oviedo, 2020.

[46]. Hussain, C. (eds) Handbook of Environmental Materials Management. Springer, Cham, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-73645-7_46

[47]. Iowa Department of Natural Resources. Chapter 9. Vegetated swales. En: Iowa Storm Water Management Manual, 2009. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[48]. Jato-Espino, D., Charlesworth, S. M., Bayon, J. R., & Warwick, F. (2016). Rainfall-runoff simulations to assess the potential of suds for mitigating flooding in highly urbanized catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *13*(1). https://doi.org/10.3390/ijerph13010149

[49]. Kuller, M., Bach, P. M., Ramirez-lovering, D., & Deletic, A. (2017). Environmental Modelling & Software Framing water sensitive urban design as part of the urban form : A critical review of tools for best planning practice. *Environmental Modelling and Software*, *96*, 265–282. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.003

[50]. Lammers, R.W., Miller, L., Bledsoe, B.P. Effects of Design and Climate on Bioretention Effectiveness for Watershed-Scale Hydrologic Benefits. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 2022, vol. 8, no. 4. pp. 04022011. DOI: 10.1061/JSWBAY.0000993 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[51]. Langemeyer, J., Wedgwood, D., McPhearson, T., Baró, F., Madsen, A. L., & Barton, D. N. (2020). Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Science of the Total Environment*, *707*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135487

[52]. Leroy, M.-C., Portet-Koltalo, F., Legras, M., Lederf, F., Moncond'huy, V., Polaert, I., Marcotte, S. Performance of vegetated swales for improving road runoff quality in a moderate traffic urban area. *Science of the Total Environment* 2016, vol. 566–567. pp 113–121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.027.

[53]. Li, N., Qin, C., & Du, P. (2019). Multicriteria Decision Analysis Applied to Sponge City Construction in China: A Case Study. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *15*(5), 703–713. https://doi.org/10.1002/ieam.4163

[54]. Lisenbee, W., Hathaway, J., Negm, L., Youssef, M., Winston, R. Enhanced bioretention cell modeling with DRAINMOD-Urban: Moving from water balances to hydrograph production. *Journal of Hydrology* 2020, vol. 582. pp 124491. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124491.

[55]. Lisenbee, W.A., Hathaway, J.M., Winston, R.J. Modeling bioretention hydrology: Quantifying the performance of DRAINMOD-Urban and the SWMM LID module. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 612, pp. 128179. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128179.

[56]. Loc, H. H., Huong, L. N. Q., Huong, Q., Tue, N. N., Kusakabe, T., & Shimizu, Y. (2015). *Feasibility Assessment of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Ho Chi Minh city using an Analytic Hierarchy Process (AHP) Approach*. (2), 3–8.

[57]. Luan, B., Yin, R., Xu, P., Wang, X., Yang, X., Zhang, L., & Tang, X. (2019). Evaluating Green Stormwater Infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS. *Journal of Cleaner Production*, *223*, 680–691. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.028

[58]. Martin-Mikle, C. J., de Beurs, K. M., Julian, J. P., & Mayer, P. M. (2015). Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. *Landscape and Urban Planning*, *140*, 29–41. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.002

[59]. Maryland Department of Environment. *Apéndice B.3. Construction specifications for sand filters, bioretention and open channels*. En: Maryland Stormwater Design Manual, Vols. I and II., 2000. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[60]. Mayor of London. SuDS in London – a guide. London: Transport for London, 2016. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[61]. Melbourne Water. Water Sensitive Urban Design Guidelines. South Eastern Councils. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[62]. Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras. NORMA 5.2–IC de la Instrucción de carreteras, Drenaje superficial. Editor: Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2019. NIPO: 161-18-228-0. [acceso 29 enero 2024]. Enlace de descarga libre

[63]. Montgomery County Department of Environmental Protection. Grass Swale Guide. En: Stormwater facilities. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[64]. Muthanna, T. M., Sivertsen, E., Kliewer, D., & Jotta, L. (2018). Coupling field observations and Geographical Information System (GIS)-based analysis for improved Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) performance. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(12), 1–13. https://doi.org/10.3390/su10124683

[65]. New Jersey Department of Environmental Protection. NJ Stormwater Best Management Practices Manual. New Jersey, EE. UU. 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[66]. North Carolina Department of Environmental Quality. *C-2. Bioretention Cell*. En: *Stormwater Design Manual*. Noviembre, 11, 2020. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[67]. Núñez Collado, A., Salgado Cámara, A., Martín Anta, D., Prieto Leache, I., Montoya Rodríguez, J., Ferreriro Gómez, P., Soler Gómez, V. Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Madrid: Ministerior para la Transición Ecológica. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2019. NIPO 638-18-030-2. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[68]. Pappalardo, V., La Rosa, D., Campisano, A., & La Greca, P. (2017). The potential of green infrastructure application in urban runoff control for land use planning:

A preliminary evaluation from a southern Italy case study. *Ecosystem Services*, *26*(April), 345–354. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.04.015

[69]. Perales Momparler, S, Calcerrada Romero, E. *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos*. Madrid: Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad. Ayuntamiento de Madrid. Dirección General de Gestión del Agua y Zonas Verdes, 2018. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[70]. Perales Momparler, S, Calcerrada Romero, E., Badenes Catalán, C., Beltrán Pitarch, I. *Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el término municipal de Castelló de la Plana*. Castelló de la Plana: Ayuntamiento de Castelló de la Plana, 2019. Depósito Legal: CS 1119-2019. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[71]. Philadelphia Water Department. *Downspout planters*. En: *Stormwater*. 2022. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[72]. Port of Portland. Port of Portland Stormwater Deign Standards Manual. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[73]. Puertas, J., Suárez, J., Anta, J. Gestión de Las Aguas Pluviales. Implicaciones en el Diseño de Los Sistemas de Saneamiento y Drenaje Urbano; Monografía; CEDEX: Madrid, España, 2008; ISBN 978-84-7790-475-5.

[74]. Purvis, R.A., Winston, R.J., Hunt, W.F., Lipscomb, B., Narayanaswamy, K., McDaniel, A., Lauffer, M.S., Libes, S. Evaluating the hydrologic benefits of a bioswale in Brunswick County, North Carolina (NC), USA. *Water* 2019, vol. 11, no. 6. pp 1291. DOI: 10.3390/w11061291. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[75]. Radinja, M., Comas, J., Corominas, L., & Atanasova, N. (2019). Assessing stormwater control measures using modelling and a multi-criteria approach. *Journal of Environmental Management*, *243*(April), 257–268. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.102

[76]. Real Decreto 399/2013, de 7 de junio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental. Boletín Oficial del Estado, n. 137, de 8 de junio de 2013.

[77]. Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo,

Guadiana y Ebro. Boletín Oficial del Estado, n. 16, de 19 de enero de 2016.

[78]. Rector, P., Obropta, C., and Brown. J. *Green Infrastructure Practices: Tree Boxes*. En: *Cooperative Extension Fact Sheets FS1209*, Rutgers University, New Jersey, EE. UU.: Agosto, 2013. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[79]. Rey-Mahía, C., Sañudo-Fontaneda, L.A., Andrés-Valeri, V.C., álvarez-Rabanal, F.P., Coupe, S.J., Roces-García, J. Evaluating the thermal performance of wet swales housing ground source heat pump elements through laboratory modelling. *Sustainability* 2019, vol. 11, no. 11. pp 3118. DOI: 10.3390/su11113118. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[80]. Rezazadeh Helmi, N., Verbeiren, B., Mijic, A., van Griensven, A., & Bauwens, W. (2019). Developing a modeling tool to allocate Low Impact Development practices in a cost-optimized method. *Journal of Hydrology*, *573*(March), 98–108. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.017

[81]. Saadat Foomani, M., & Malekmohammadi, B. (2020). Site selection of sustainable urban drainage systems using fuzzy logic and multi-criteria decision-making. *Water and Environment Journal*, *34*(4), 584–599. https://doi.org/10.1111/wej.12487

[82]. Sañudo Fontaneda, L.A. The analysis of rainwater infiltration into permeable pavements, with concrete blocks and porous mixtures, for the source control of flooding. PhD Thesis. University of Cantabria, Spain, 10 June 2014. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[83]. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Calzada-Pérez, M.A.; and Castro-Fresno, D. Infiltration behaviour of Polymer-Modified Porous Concrete and Porous Asphalt surfaces used in SUDS techniques. *Clean –Soil, Air, Water*, 42(2), pp. 139-145. DOI: 10.1002/clen.201300156.

[84]. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Charlesworth, S.M.; Castro-Fresno, D.; Andres-Valeri, V.C.A.; Rodriguez-Hernandez, J. Water quality and quantity assessment of pervious pavements performance in experimental car park areas. *Water Science and Technology* 2014, 69(7), pp. 1526-1533.

[85]. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Andrés-Valeri, V.C.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D. Field study of infiltration capacity reduction of porous mixture surfaces. *Water* (Switzerland) 2014, 6(3), pp. 661-669. DOI: 10.3390/w6030661.

[86]. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Vega-Zamanillo, A.; Castro-Fresno, D. Laboratory analysis of the infiltration capacity of interlocking concrete block pavements in car parks. *Water Science and Technology* 2013 67(3), pp. 675-681. DOI: 10.2166/wst.2012.614.Sañudo-Fontaneda, L.A., Hunt, W.F. Green

Stormwater Infrastructure for Sustainable Urban and Rural Development. Editorial: MDPI. ISBN: 978-3036506104.

[87]. Sañudo-Fontaneda, L.A., Roces-García, J., Coupe, S.J., Barrios-Crespo, E., Rey-Mahía, C., Álvarez-Rabanal, F.P., Lashford, C. Descriptive Analysis of the Performance of a Vegetated Swale through Long-Term Hydrological Monitoring: A Case Study from Coventry, UK. *Water* 2020, vol. 12, no. 10, pp. 2781. DOI: 10.3390/w12102781. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[88]. Shafique, M., Kim, R., Kyung-Ho, K. Evaluating the capability of grass swale for the rainfall runoff reduction from an Urban parking lot, Seoul, Korea. *International Journal of Environmenatal Research and Public Health* 2018, vol. 15., no. 3. pp 537. DOI: 10.3390/ijerph15030537. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[89]. Sheoran, S. K., & Parmar, V. (2020). Identification of alternative landfill site using QGIS in a densely populated metropolitan area. *Quaestiones Geographicae*, 39(3), 47–56. https://doi.org/10.2478/quageo-2020-0022

[90]. Simpson, I. M., Winston, R. J., Brooker, M. R. Effects of land use, climate, and imperviousness on urban stormwater quality: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 2022, vol. 809, pp. 152206.

[91]. Suárez-Inclán, A.M., Allende-Prieto, C., Roces-García, J., Rodríguez-Sánchez, J.P., Sañudo-Fontaneda, L.A., Rey-Mahía, C., Álvarez-Rabanal, F.P. Development of a Multicriteria Scheme for the Identification of Strategic Areas for SUDS Implementation: A Case Study from Gijón, Spain. *Sustainability* 2022, vol. 14, no. 5. pp. 2877. DOI: 10.3390/su14052877. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[92]. Surma, M. (2015). Sustainable urban development through an application of green infrastructure in district scale - A case study of Wrocław (Poland). *Journal of Water and Land Development*, 25(1), 3–12. https://doi.org/10.1515/jwld-2015-0007

[93]. SUSDRAIN. Bioretention. En: Case studies. 2022 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[94]. SUSDRAIN. Swales. En: Case studies. 2022 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[95]. U.S. Environmental Protection Agency. Case Studies Analyzing the Economic Benefits of Low Impact Development and Green Infrastructure Programs. EPA 841-R-13-004. Agosto, 2013. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[96]. U.S. Environmental Protection Agency. Coastal Stormwater Management

through Green Infrastructure. A handbook for municipalities. 2014. EPA 842-R-14-004. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[97]. US Environmental Protection Agency. Stormwater to Street Trees: Engineering Urban Forests for Stormwater Management. EPA 841-B-13-001. Septiembre, 2013 [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[98]. Wang, M., Sweetapple, C., Fu, G., Farmani, R., & Butler, D. (2017). A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. *Journal of Environmental Management*, 201, 145–152. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.034

[99]. Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. C. 18. Bioretention systems. En: The SUDS Manual. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[100]. Woods-Ballard, P., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., and Kellagher, R. C. 19. Trees. En: The SUDS Manual. Londres, Reino Unido: CIRIA, 2015. ISBN 978-0-86017-760-9. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

[101]. Xiong, H., Sun, Y., & Ren, X. (2020). Comprehensive assessment of water sensitive urban design practices based on multi-criteria decision analysis via a case study of the university of melbourne, australia. *Water* (Switzerland), 12(10), 1–37. https://doi.org/10.3390/w12102885

[102]. Yang, W., & Zhang, J. (2021). Assessing the performance of gray and green strategies for sustainable urban drainage system development: A multi-criteria decision-making analysis. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126191. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126191

[103]. Young, B.N., Hathaway, J.M., Lisenbee, W.A., He, Q. Assessing the runoffreduction potential of highway swales and WinSLAMM as a predictive tool. *Sustainability* 2018, vol. 10, no. 8. pp 2871. DOI: 10.3390/su10082871. [acceso 29 enero 2024] Enlace de descarga libre

Este manual técnico tiene el objetivo de servir de orientación e introducción para técnicos e investigadores en la planificación, diseño, dimensionamiento, construcción, operación, monitorización, conservación y mantenimiento de Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SUDS) en el municipio de Gijón, Principado de Asturias, España. El documento pretende acercar al lector a los aspectos más relevantes necesarios para un diseño integral de detalle de las técnicas SUDS, aportando un marco normativo extenso fruto de la recopilación de las normativas históricas que han tenido relación con los SUDS lo largo del tiempo.

La información presentada en este documento técnico incluye todos los cálculos hidrológicos asociados con las condiciones particulares de la ciudad de Gijón, pudiendo ser trasladada su metodología a otras ciudades del mundo, siendo ésta una de las contribuciones más destacadas del manual.

Es importante reseñar que este manual técnico no representa una normativa o una instrucción técnica, no debiéndose tomar como tal. Se recomienda que el usuario del manual se mantenga actualizado, tanto con los nuevos desarrollos de las técnicas SUDS y sus experiencias de implementación, uso de materiales innovadores, nuevos procedimientos de cálculo y modelización, etc., como en lo referente a las normativas que seguirán evolucionando en los próximos tiempos al respecto.



emasa Gijón | Xixón

Universidad de Oviedo