



Créditos

INICIATIVA Y COORDINACIÓN. AYUNTAMIENTO DE AZUQUECA DE HENARES

Yolanda Rodríguez Valle
Concejala de Innovación Urbana

César Gismera del Amo
Arquitecto Municipal



REDACCIÓN Y DISEÑO. GREEN BLUE MANAGEMENT S.L. (Grupo TYP SA)

Sara Perales Momparler
Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Carlos Ferrando Morales
Ingeniero Técnico de Obras Públicas

Pascual Ferrans Ramírez
Dr. Ingeniero Ambiental



Septiembre 2023

© Ayuntamiento de Azuqueca de Henares

Reservados todos los derechos

Citar esta publicación como:

Perales Momparler, S., Ferrando Morales, C., Ferrans Ramirez, P. (2023) *Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para el término municipal de Azuqueca de Henares.*

Índice

1. Introducción al drenaje sostenible	6
1.1. Introducción	7
1.2. La problemática en las ciudades	7
1.3. Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)	9
1.4. Marco regulatorio de referencia	12
2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)	18
2.1. Filosofía de los SUDS	19
2.2. Beneficios del uso de SUDS	21
2.3. Clasificación de los SUDS	23
2.4. Mantenimiento y monitorización	36
2.5. Certificaciones de sostenibilidad	39
2.6. Información adicional disponible	39
2.7. Ejemplos de SUDS en Azuqueca de Henares	40
2.8. Ejemplos de SUDS que benefician la integración y naturalización del paisaje urbano	42
3. Recomendaciones para el diseño de SUDS	45
3.1. Caracterización del lugar	46
3.2. Objetivos de diseño	53
3.3. Criterios para la elección de SUDS	56
3.4. Diseño y dimensionamiento de SUDS	61
4. Ejemplo de cálculo de SUDS	66
4.1. Introducción	67

4.2. Datos de Partida	67
4.3. Volumen de escorrentía a gestionar	69
4.4. Volumen de almacenamiento del SUDS	70
4.5. Tiempo de vaciado	70
4.6. Cálculo de la estructura de rebose	71
4.7. Gestión de eventos extremos y cumplimiento de las restricciones de vertido	71
4.8. Herramienta de cálculo	71
5. Bibliografía de Referencia	73
5.1. Normativa y Regulación	73
5.2. Manuales de referencia para diseño y mantenimiento	74
5.3. Otros Enlaces de Interés	75

Tablas

Tabla 1: Ventajas de la aplicación de SUDS en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	11
Tabla 2: Beneficios del uso de SUDS	22
Tabla 3: Actividades de operación y mantenimiento claves para SUDS. Fuente: Adaptado de The SuDS Manual, CIRIA (2015)	37
Tabla 4: Permeabilidades asociadas a distintos materiales según Código Técnico de la Edificación. Fuente: CTE (2008)	48
Tabla 5: Percentiles volumétricos de diseño	49
Tabla 6: Intensidad de lluvia para diferentes duraciones de tormenta y períodos de retorno	50
Tabla 7: Valores teóricos de coeficientes de escorrentías	52

Tabla 8: Volumen de infiltración según tipo de proyecto.....	54
Tabla 9: Relación entre tipologías edificatorias y tipos de SUDS.....	57
Tabla 10: Función de los SUDS, según su tipología. Adaptación de The SuDS Manual, CIRIA (2015).....	58
Tabla 11: Índice de mitigación de contaminación por tipología SUDS. Fuente: Guía básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València (2021).	59
Tabla 12: Índice de peligrosidad de contaminación. Fuente: Guía básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València (2021).	60
Tabla 13: Valores de porosidad para materiales drenantes. Fuente: The SuDS Manual, CIRIA (2015).	62
Tabla 14: Duración e intensidad de lluvia a utilizar para el dimensionamiento de estructuras de rebose en pequeñas actuaciones.	64
Tabla 15: Datos de partida ejemplo de diseño.	67
Tabla 16: Índices de mitigación de la balsa de infiltración.	69

Figuras

Figura 1: Cambios en el hidrograma provocados tras la impermeabilización de superficies. Fuente: Perales-Momparler y Valls-Benavides (2013).	8
Figura 2: Inundaciones en Azuqueca de Henares.	8
Figura 3: Comparación del crecimiento urbano dentro del municipio.	9
Figura 4: Gestión del agua mediante SbN. Fuente: ONU para la educación, la Ciencia y la Cultura (2018).	10
Figura 5: Principales ODS a cuya consecución contribuyen los SUDS.	10
Figura 6: Pilares fundamentales de los SUDS.	19

Figura 7: Cuenca natural previo a la urbanización. Fuente: Adaptación de The SuDS Manual, CIRIA (2015).	19
Figura 8: Escorrentía superficial en zona urbanizada. Fuente: Adaptación de The SuDS Manual, CIRIA (2015).	20
Figura 9: Integración de SUDS en las ciudades. Fuente: Adaptación de The SuDS Manual, CIRIA (2015).	20
Figura 10: SUDS implementados en el proyecto Cristóbal de Moura (Barcelona).	21
Figura 11: Ejemplo de tren de tratamiento. Fuente: iAgua (Martínez, s.f.) .	21
Figura 12: Aljibe en Benaguasil (Valencia).	23
Figura 13: Cubierta vegetada en el Centro de ocio de mayores Río Henares (Azuqueca de Henares). Fuente: Abalos+Sentkiewicz AS+.....	24
Figura 14: Alcorques estructurales en Washington DC (EEUU).	24
Figura 15: Cuneta vegetada en Irlanda.	25
Figura 16: Dren filtrante en Madrid.	26
Figura 17: Zanja de infiltración en Quart de Poblet (Valencia).	26
Figura 18: Jardín de lluvia en Bon Pastor (Barcelona).	27
Figura 19: Zona de biorretención en el municipio de Tudela (Navarra).	27
Figura 20: Pavimento permeable en el Centro de ocio de mayores Río Henares (Azuqueca de Henares). Fuente: Abalos+Sentkiewicz AS+.....	28
Figura 21: Franja filtrante. Fuente: The SuDS Manual, CIRIA (2015).	28
Figura 22: Depósito reticular en Azuqueca de Henares.	29
Figura 23: Balsa de detención en Fairfax (EEUU).	30
Figura 24: Estanque en el Parque de la Quebradilla (Azuqueca de Henares).	30
Figura 25: Bordillo intermitente. Entrada hacia un jardín de lluvia en Cincinnati (EEUU).	31
Figura 26: Elemento de entrada hacia un jardín de lluvia en Washington DC (EEUU).	31

Figura 27: Válvula vórtice. Fuente: Drenatura.	32
Figura 28: Elementos de rebose en Barcelona.....	32
Figura 29: Separador hidrodinámico. Fuente: Drenatura.	33
Figura 30: Filtro compacto. Fuente: Hydro International.....	33
Figura 31: Taller dirigido a profesionales.	34
Figura 32: Panel informativo de SUDS en la Universidad Pública de Navarra.	34
Figura 33: Pacto de los Alcaldes.	35
Figura 34: Mantenimiento de cuneta vegetada. Fuente: 4th Corner Landscaping.	35
Figura 35: Mantenimiento en Azuqueca de Henares.	36
Figura 36: Tipos de tareas de mantenimiento.	36
Figura 37: Monitorización de cubierta vegetada en Benaguasil (Valencia). Proyecto E ² STORMED.	38
Figura 38: Otras guías de SUDS disponibles.	39
Figura 39: Proceso constructivo depósitos reticulares en una nave industrial.	40
Figura 40: Proyecto de remodelación del Foro de Azuqueca de Henares. Fuente: ARCO 2000.	41
Figura 41: Proceso constructivo de los depósitos reticulares en el Learning Center.	41
Figura 42: Pavimento permeable y zona de biorretención implementada en la Av. del Greco (Sevilla).	42
Figura 43: Jardines de lluvia en el barrio de Bon Pastor de Barcelona.	43
Figura 44: Panel explicativo del ciclo del agua e implementación de SUDS.	43
Figura 45: Parterres inundables en la Calle Cristóbal de Moura de Barcelona.	44

Figura 46: SUDS de laminación e infiltración (depósitos enterrados) en la Calle Cristóbal de Moura de Barcelona.	44
Figura 47: Proceso de diseño para la incorporación de SUDS en los proyectos.	46
Figura 48: Mapa geológico local del municipio de Azuqueca de Henares. Fuente: IGME (adaptada del Instituto Geológico y Minero de España – 2ª Serie Hoja 535 (20-21) Algete).	47
Figura 49: Localización de los estudios geotécnicos seleccionados.	47
Figura 50: Perfil estratigráfico de ejemplo extraído de uno de los estudios geotécnicos seleccionados. Fuente: Estudio geotécnico Parcela c/Electrónica, LACECON (2021).	47
Figura 51: Mapa de peligrosidad por inundación fluvial T = 100 años. Fuente: SNCZI.	51
Figura 52: Jerarquía de gestión de la escorrentía en Azuqueca de Henares.	51
Figura 53: SUDS verde y multifuncional en la ciudad de Nantes (Francia). Fuente: Le Voyage à Nantes (https://www.levoyageanantes.fr/es/obras-de-arte/feyddball/).	56
Figura 54: Tipo de unidad urbana en el Municipio de Azuqueca de Henares.	57
Figura 55: Pasos para el diseño de un sistema de drenaje con SUDS.	61
Figura 56: Ejemplo de SUDS con capas de diferentes materiales.	62
Figura 57: Zona de actuación seleccionada para ejemplo de cálculo. Fuente: Google Maps.	67
Figura 58: Balsa de infiltración. Can Cortada (Barcelona).	68
Figura 59: Planta de la zona de actuación. Parcela municipal.	68
Figura 60: Herramienta de cálculo para el dimensionamiento de SUDS.	72



1. Introducción al drenaje sostenible

1.1. Introducción

Tradicionalmente, la gestión de aguas pluviales se ha limitado a captar y evacuar la escorrentía superficial, que discurre en las zonas impermeables de las ciudades, de la forma más rápida posible, por regla general a través de sistemas de colectores, para así evitar inundaciones. Sin embargo, el aumento significativo de la impermeabilización en zonas urbanas, derivadas del creciente desarrollo poblacional, genera como consecuencia una alteración del ciclo natural del agua, ocasionando que esta cuente con menor oportunidad de infiltración, produciéndose así un incremento de volumen de escorrentía y caudales pico, conduciendo a la necesidad de colectores cada vez más grandes.

Por otro lado, el agua también sufre alteraciones en su calidad tanto por el incremento de contaminación atmosférica como por la captación de contaminantes presentes en las superficies impermeables.

Otro aspecto desfavorable es el palpable cambio climático, que está afectando el régimen pluviométrico, provocando que los episodios extremos de lluvias sean cada vez más intensos y frecuentes.

Frente a estos importantes desafíos, es esencial implementar soluciones que gestionen el problema en origen, contribuyan a disminuir la superficie impermeable y a mejorar la calidad de la escorrentía, y sean sostenibles en el tiempo. Es aquí en donde las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), como los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), se convierten en una excepcional alternativa para afrontar los desafíos mencionados.

Los SUDS son sistemas de drenaje que imitan el ciclo natural del agua y se emplean con el fin de gestionar la escorrentía de manera sostenible, con especial enfoque en reducir la cantidad y mejorar la calidad de la escorrentía, enriqueciendo la biodiversidad del entorno y reforzando la

idea de integridad paisajística y multifuncional de las actuaciones urbanísticas, proporcionando espacios más amigables y atractivos para los ciudadanos.

En España, la aplicación de SUDS es una realidad que va tomando cada vez más fuerza en las diferentes regiones, y como se indica desde el [Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico](#), son muchos los efectos positivos de la aplicación de SUDS ya que:

“Se reduce la problemática, tanto en volumen como en contaminación, de los vertidos por desbordamientos del sistema de saneamiento en episodios de lluvia.

Al disminuir la aportación de escorrentía pluvial al sistema de saneamiento se mejora el rendimiento de la EDAR asociada al mismo, reduciendo su gasto energético y contribuyendo a la descarbonización del ciclo urbano del agua”.

Esta guía tiene como objetivo promover y facilitar la gestión de aguas pluviales de manera sostenible con el uso de SUDS, tanto en los nuevos desarrollos como en los proyectos de regeneración urbana acometidos dentro del término municipal de Azuqueca de Henares. Para esto describe los principales tipos de SUDS, y proporciona recomendaciones y criterios para su elección, diseño y dimensionamiento.

1.2. La problemática en las ciudades

La creciente impermeabilización de las ciudades, derivada del acelerado desarrollo urbano, trae como consecuencia alteraciones en el ciclo hidrológico natural del territorio, dando lugar a un incremento de volumen de escorrentía y caudales pico, a la vez que una reducción en el tiempo de concentración. Esto ha provocado que los sistemas de drenaje

convencionales existentes no dispongan de la capacidad suficiente para gestionar la escorrentía durante eventos de lluvia significativos.

La Figura 1 muestra la variación del hidrograma que se produce tras la impermeabilización de superficies. Como se puede apreciar, el caudal pico, previo al desarrollo, es significativamente menor y, además, se genera en mayor tiempo; es por este motivo que surge la necesidad de gestionar la cantidad de escorrentía a fin de disminuir el volumen y su caudal punta. Además, se observa que, como consecuencia del desarrollo de las ciudades, el flujo base que llega con el tiempo a los cauces naturales es cada vez menor.

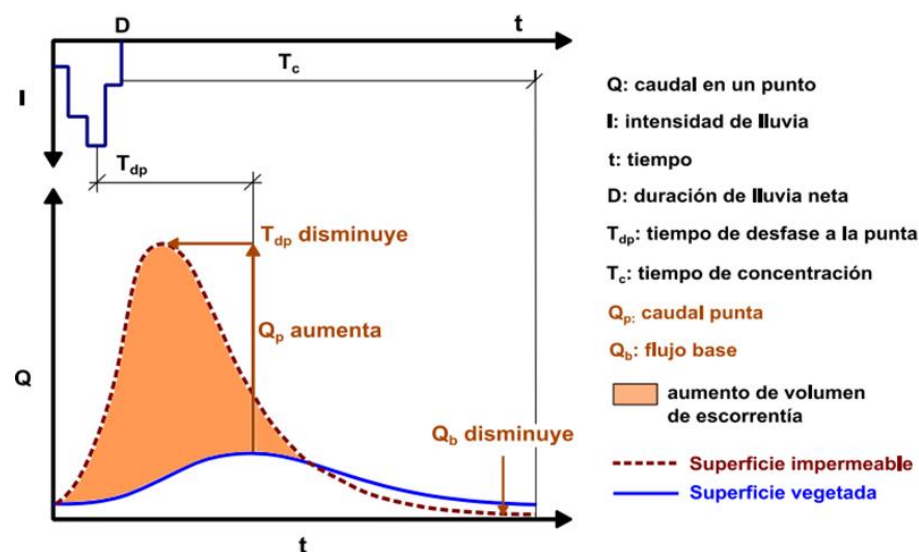


Figura 1: Cambios en el hidrograma provocados tras la impermeabilización de superficies.
 Fuente: Perales-Momparler y Valls-Benavides (2013).

Así, para lograr una disminución del volumen de escorrentía y su caudal punta, se deben implementar sistemas que permitan la infiltración en origen y el almacenamiento de la escorrentía para su posterior descarga controlada hacia el medio receptor.

Con el fin de mitigar los impactos asociados al desarrollo urbano, las ciudades realizan constantes inversiones para mejorar los sistemas convencionales de drenaje, aumentando el diámetro de las tuberías que componen la red de drenaje, construyendo plantas de tratamiento con mayor capacidad, etc.; no obstante, el aumento de eventos de lluvia cada vez más torrenciales y la rápida concentración de agua pluvial, sumado a una inadecuada gestión de la escorrentía superficial, terminan por dejar estas mejoras sin efecto y produciendo pérdidas socioeconómicas cada vez mayores. De aquí se desprende la gran importancia de gestionar correctamente las aguas pluviales urbanas.



Figura 2: Inundaciones en Azuqueca de Henares.

Asimismo, el incremento de la población, sumado al factor de Cambio Climático, al que actualmente se enfrentan todas las ciudades, y el aumento de la contaminación de la escorrentía por los usos del suelo, generan una serie de problemas que afectan directamente a la población.

Para el municipio de Azuqueca de Henares, estos problemas no son una cuestión nueva, puesto que, como ocurre en la mayoría de las ciudades alrededor del mundo, el término municipal ha ido incrementando su desarrollo urbano, acrecentándose los inconvenientes a nivel medioambiental que ello conlleva.

Como se puede evidenciar en la Figura 3, en el año 1986, la superficie de terreno urbanizado en Azuqueca de Henares correspondía a 357 ha, mientras que para el año 2016 esta superficie se ha casi duplicado hasta llegar a 764 ha.

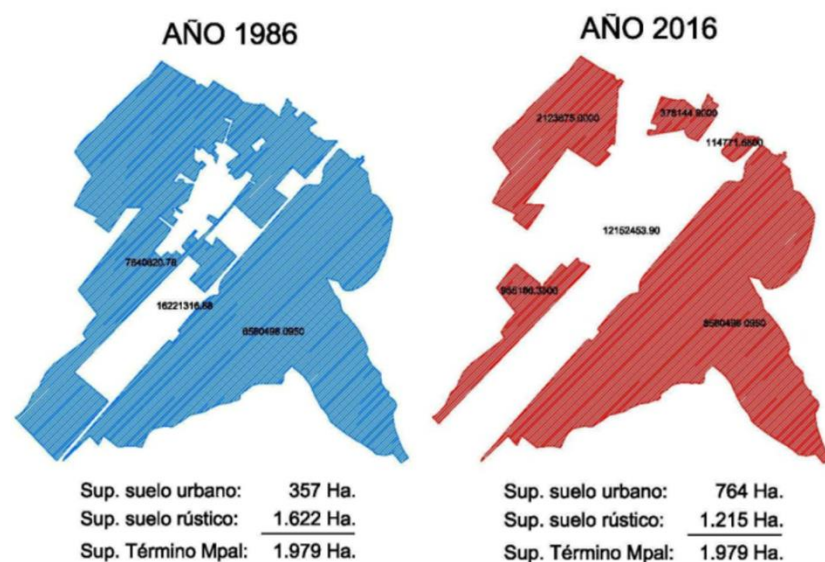


Figura 3: Comparación del crecimiento urbano dentro del municipio.

Como consecuencias de este crecimiento urbano, son varios los problemas, cada vez más patentes, en el municipio:

- Aumento del sellado del suelo mediante pavimentos impermeables, dando lugar a la disminución de superficies de terreno naturales e incrementando el riesgo de inundaciones.
- Disminución de la recarga de acuíferos a causa de la acelerada impermeabilización de los terrenos que reducen la infiltración.
- Mayor concentración de fuentes contaminantes y aumento de la probabilidad de arrastre de contaminantes hacia los medios receptores.
- Vulnerabilidad de los sistemas urbanos por déficit de calidad de agua.
- Aumento del efecto “isla de calor” en el municipio.
- Incremento de los caudales y volúmenes de escorrentía que se conducen hacia la red unitaria pública, lo que conlleva una necesidad de ampliación de las infraestructuras de saneamiento y depuración, con el consiguiente gasto económico en ejecución, operación y mantenimiento de dichas infraestructuras.

Adicionalmente, es importante mencionar que Azuqueca de Henares se encuentra en un territorio tradicional y eminentemente agrícola, que posee unos acuíferos con una capacidad y calidad importantes que es fundamental preservar.

Todos estos factores, junto a los anteriormente mencionados, han impulsado que desde el Ayuntamiento de Azuqueca de Henares se apueste firmemente por el cambio de paradigma del drenaje urbano, a través de la aplicación de sistemas de drenaje sostenibles, tanto a corto como a largo plazo.

1.3. Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)

El proceso de crecimiento y expansión urbana, combinado con el aumento en frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, agravados por el cambio climático, genera variedad de alteraciones e

impactos directos en los sistemas socioecológicos, haciéndose necesarias acciones específicas que minimicen la exposición al riesgo natural.

Como se menciona en el Informe Mundial de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (2018), las tres principales cuestiones que deben ser atendidas en relación al agua son la gestión de la disponibilidad de agua, la gestión de su calidad y la gestión de los riesgos relacionados con el agua (Figura 4).

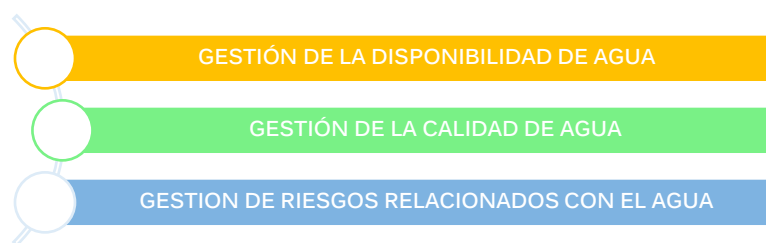


Figura 4: Gestión del agua mediante SbN.
Fuente: ONU para la educación, la Ciencia y la Cultura (2018).

Para atender estas cuestiones, se refuerza el papel de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN); sistemas, procesos o políticas que aprovechan el poder y aprendizaje de la naturaleza para abordar estos desafíos. La Comisión Europea define las SbN como:

“Soluciones inspiradas y respaldadas por la naturaleza, que son rentables, proporcionan simultáneamente beneficios ambientales, sociales y económicos, además de ayudar a crear resiliencia; dichas soluciones aportan más naturaleza así como características y procesos naturales, y con mayor diversidad, a las ciudades y paisajes terrestres y marinos, mediante intervenciones localmente adaptadas, eficientes en el uso de recursos y sistémicas.”

El objetivo fundamental de este tipo de soluciones es crear ambientes más naturales, dentro de las ciudades, imitando los procesos de la naturaleza. Es en este punto donde aparecen los SUDS como una alternativa innovadora para la gestión de las aguas pluviales, que favorecen la retención, laminación, filtración e infiltración de la escorrentía, reduciendo la aportación de agua de lluvia a los colectores y contribuyendo a reproducir el ciclo natural del agua previo al desarrollo urbano. Como ejemplo, el Gobierno del Reino Unido ha comunicado recientemente la entrada en vigor de una nueva [normativa](#) por la que se ordena que todos los nuevos desarrollos residenciales incluyan SUDS y que estos se consideren desde las primeras fases de los proyectos.

Asimismo, los SUDS se ajustan perfectamente con el programa de la Agenda 2030 de la ONU para el Desarrollo Sostenible, que presenta distintos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para abordar los desafíos mundiales más urgentes. La Figura 5 muestra los principales ODS que pueden ser atendidos con la aplicación de SUDS.



Figura 5: Principales ODS a cuya consecución contribuyen los SUDS.

En la Tabla 1 se indican las principales ventajas que conlleva el uso de SUDS y su relación directa con los ODS.

Tabla 1: Ventajas de la aplicación de SUDS en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

ODS		Ventajas del uso SUDS
Objetivo 3.9	<i>"Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo".</i>	Aplicación de SUDS para mejorar la calidad del agua, implementación de zonas ajardinadas mejorando la calidad del aire, reduciendo la contaminación del suelo.
Objetivo 6.3	<i>"De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial".</i>	Los SUDS permiten mejorar la calidad de la escorrentía en las ciudades y reducir los caudales y volúmenes que llegan a la red de saneamiento.
Objetivo 11.3	<i>"De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países".</i>	La integración de SUDS en la planificación urbana, creando entornos más amigables para la sociedad y el ecosistema.

Objetivo 13.1	<i>"Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países".</i>	Implementación de SUDS para disminuir los volúmenes y caudales de escorrentía, minimizando el riesgo de inundaciones y, además, generando un ahorro energético en bombeos y plantas de tratamiento y reduciendo las emisiones de CO ₂ .
Objetivo 14.1	<i>"De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes".</i>	Los SUDS proporcionan tratamiento a la escorrentía a través de la filtración y biorremediación, reduciendo la contaminación de la escorrentía previo al vertido al medio natural.
Objetivo 15.1	<i>"Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales".</i>	Implementación de normativa, campañas de prevención, información y formación, y coordinación entre gestores, profesionales y agentes de diferentes ámbitos.

Objetivo 17.13	<i>"Mejorar la coherencia de las políticas para el desarrollo sostenible".</i>	El uso de SUDS implica un cambio de paradigma en cuanto al desarrollo urbano de las ciudades. Por ello se requiere de una colaboración eficiente entre los diferentes gestores y la implementación de legislación y normativa que faciliten este cambio.
-----------------------	--	--

Cabe señalar que, en el año 2020, el Ayuntamiento de Azuqueca de Henares aprobó la adhesión de Azuqueca de Henares a la Red de Entidades Locales para el desarrollo de los ODS de la Agenda 2030. Ésta es una Red de la Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP) en la que se integran, voluntariamente, los Gobiernos locales, los cuales se comprometen a implementar los ODS de forma transversal en sus políticas públicas.

Para ampliar la información sobre SbN y ODS se recomienda visitar las siguientes publicaciones:



[Nature based solutions in Europe \(inglés\)](#)



[Soluciones basadas en la naturaleza](#)



[Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities \(inglés\)](#)



[Objetivos de Desarrollo Sostenibles](#)

1.4. Marco regulatorio de referencia

1.4.1. Marco Europeo

En materia de Aguas la normativa europea vigente es la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), que establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, cuyo principal objetivo es gestionar la demanda del agua tanto en calidad como en cantidad y pone de relieve la necesidad de que el agua se trate como un recurso inestimable y no como un residuo.

Esta norma se complementa con la Directiva de Evaluación y Gestión de los riesgos de Inundación (2007/60/CE) que tiene como fundamento minimizar el riesgo producido por las inundaciones y reducir la exposición de las ciudades a estos eventos.

Por otro lado, destacan la Directiva de calidad de aguas de baño (Directiva 2006/7/CE) y la Directiva de la contaminación de acuíferos (Directiva 2006/118/CE), que tienen por objeto la conservación y protección del medio ambiente y ponen de manifiesto los impactos derivados de los vertidos de los sistemas de alcantarillado al medio receptor.

Asimismo, la Directiva del Tratamiento de agua de lluvia urbana (91/271/CEE), establece las medidas necesarias a llevar a cabo por los Estados miembros para garantizar el tratamiento adecuado de las aguas residuales urbanas antes de su vertido. Además, actualmente se ha propuesto un borrador de la Directiva del Parlamento y Consejo Europeo con relación al tratamiento de aguas residuales urbanas 2022/0345 (COD) en el que se indica que las soluciones para reducir la contaminación como consecuencia del vertido de aguas urbanas, se deben definir a nivel local teniendo en cuenta las condiciones locales específicas, con un enfoque preventivo, optimizando la infraestructura existente y priorizando los desarrollos "verdes", proyectando nuevas infraestructuras grises solo

cuando sea absolutamente necesario. Por ello, los Estados Miembros deberán asegurarse de que planes integrados de gestión de aguas residuales urbanas se establezcan a nivel local para municipios de 100.000 habitantes o más y en municipios de entre 10.000 y 100.000 habitantes donde el vertido de escorrentía urbana posea un riesgo para el medio ambiente o salud pública.

Por último, cabe resaltar que en 2019 la Comisión Europea (CE) puso en marcha el Pacto Verde Europeo, que se trata de un paquete de iniciativas políticas con el objetivo de dirigir a la Unión Europea (UE) hacia una transición ecológica que lleve a alcanzar la neutralidad climática antes de 2050. Este pacto le da un papel fundamental a las SbN como medidas de mitigación al Cambio Climático, que proporcionan mayor resiliencia y protección de los ecosistemas.

1.4.2. Marco Estatal

En cuanto a la normativa existente a nivel nacional, la Ley de aguas regula el dominio público hidráulico, con respecto a la protección y planificación de las diferentes cuencas hidrográficas, y el uso del agua. Por su parte, el Real Decreto 903/2010, regula los procedimientos para una evaluación preliminar del riesgo de inundación causada por ríos o aguas intermitentes en zonas costeras o de transición, pero deja sin regular las inundaciones de origen pluvial y el drenaje urbano.

Por su parte, el Real Decreto 1290/2012, el cual modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico RD 849/1986 y el Real Decreto 509/1996, establecen las normas para el tratamiento de aguas residuales urbanas, donde se indica la necesidad de gestionar los desbordamientos de sistemas de saneamiento. En el primero se establece lo siguiente:

[...] a) Los proyectos de nuevos desarrollos urbanos deberán justificar la conveniencia de establecer redes de saneamiento

separativas o unitarias para aguas residuales y de escorrentía, así como plantear medidas que limiten la aportación de aguas de lluvia a los colectores.

b) En las redes de colectores de aguas residuales urbanas no se admitirá la incorporación de aguas de escorrentía procedentes de zonas exteriores a la aglomeración urbana o de otro tipo de aguas que no sean las propias para las que fueron diseñados, salvo en casos debidamente justificados.

c) En tiempo seco no se admitirán vertidos por los aliviaderos.

d) Los aliviaderos del sistema colector de saneamiento y los de entrada a la depuradora deberán dotarse de los elementos, pertinentes en función de su ubicación, antigüedad y el tamaño del área drenada para reducir la evacuación al medio receptor de, al menos, sólidos gruesos y flotantes. Estos elementos no deben reducir la capacidad hidráulica de desagüe de los aliviaderos, tanto en su funcionamiento habitual como en caso de fallo [...].”

Por otro lado, con la entrada en vigor del Real Decreto 638/2016 se ha producido un gran avance hacia el cambio de paradigma en España del drenaje urbano, desde la óptica convencional hacia un sistema que incluya SUDS como solución habitual. Dicha disposición modifica reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales, y establece, para el diseño de las actuaciones en dominio público hidráulico, lo siguiente:

“Las nuevas urbanizaciones, polígonos industriales y desarrollos urbanísticos en general, deberán introducir sistemas de drenaje sostenible, tales como superficies y acabados permeables, de forma que el eventual incremento del riesgo de inundación se

mitigue. A tal efecto, el expediente del desarrollo urbanístico deberá incluir un estudio hidrológico-hidráulico que lo justifique” (Sección 5, Artículo 126.ter, punto 7).

Por último, cabe señalar que el pasado 31 de agosto de 2023 se publicó el Real Decreto 665/2023 por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (849/1986), el Reglamento de la Administración Pública del Agua aprobado por el Real Decreto 927/1988 y el Real Decreto 9/2005 por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

Este nuevo Real Decreto 665/2023 destaca que:

“La actividad urbanizadora es una de las actuaciones antrópicas más impactantes sobre el DPH, puesto que la impermeabilización del terreno y las actividades urbanas, entre otras presiones, tienen un relevante impacto sobre el ciclo hidrológico, de forma que el agua de lluvia en los entornos urbanos que llega al terreno debe protegerse, evitando su contaminación [...]”.

Por ello, el nuevo artículo 259 quinquies, del nuevo Real Decreto 665/2023, indica que las siguientes aglomeraciones urbanas deberán elaborar un Plan integral de gestión del sistema de saneamiento:

“a) Vertidos procedentes de aglomeraciones urbanas de más de 50.000 o más habitantes equivalentes.

b) Vertidos procedentes de aglomeraciones urbanas de 10.000 o más habitantes equivalentes y menos de 50.000 habitantes equivalentes, cuya red de saneamiento disponga de algún punto de desbordamiento que vierta a una masa de agua que pueda poner en riesgo el medio ambiente o la salud de las personas [...]”

El Plan integral de gestión del sistema de saneamiento deberá incluir, entre otros:

“[...] Medidas preventivas destinadas a evitar la entrada de la escorrentía urbana en los sistemas colectores, incluidas las medidas de fomento de la retención natural del agua o de la recogida de aguas pluviales, y las medidas de aumento de los espacios verdes o de limitación de las superficies impermeables en las aglomeraciones [...]”

“[...] Otras medidas adicionales, incluidas, en su caso, la adaptación y mejora de las infraestructuras de recogida, almacenamiento y tratamiento de las aguas residuales urbanas existentes o la creación de nuevas infraestructuras, priorizando los sistemas urbanos de drenaje sostenible, tales como cubiertas ecológicas, jardines verticales, pavimentos permeables, jardines de lluvia, sumideros filtrantes y canales permeables, favoreciendo así la biodiversidad. [...]”

Asimismo, el Anexo XI “Norma técnica básica para el control de los vertidos por desbordamientos de los sistemas unitarios” del nuevo Real Decreto 665/2023 establece:

“[...] unas normas técnicas básicas para el diseño de las instalaciones para la gestión de la escorrentía urbana, de los sistemas de saneamiento y de los vertidos por desbordamientos del sistema de saneamiento, sin perjuicio de que puedan complementarse con metodologías alternativas convenientemente justificadas por los titulares u otras que establezcan las comunidades autónomas que garanticen el cumplimiento de dichos objetivos [...]”.

Además, en este anexo se indica que:

“Para valorar la eficacia de las medidas implantadas en el sistema de saneamiento asociado a cada aglomeración urbana, a fin de reducir la contaminación por los VDSS en episodios de lluvia, se empleará un control mínimo exigible a través del indicador “rendimiento hidráulico del sistema de saneamiento”, tanto en sistemas unitarios como en sistemas separativos pluviales, pudiéndose definir conceptualmente como la cantidad de lluvia que es capaz de gestionarse adecuadamente en el conjunto de elementos de la aglomeración urbana, considerando además el volumen de las aguas residuales domésticas en tiempo seco, todo ello definido para una precipitación de cálculo o diseño.”

En consecuencia, con este Real Decreto se recalca la importancia de la gestión y tratamiento de la escorrentía pluvial en origen, fomentando el uso de SUDS, a los que define como:

“[...]elementos superficiales, permeables, preferiblemente vegetados, integrantes de la estructura urbana-hidrológica-paisajística y previos al sistema de saneamiento. Están destinados a filtrar, retener, transportar, acumular, reutilizar e infiltrar al terreno el agua de lluvia, de forma que no degraden e incluso restauren la calidad del agua que gestionan”.

Por último, considera el uso de SUDS como una medida adicional que logra:

“[...] entre otras medidas, filtrar e infiltrar al terreno la escorrentía pluvial, reduciendo su volumen y consiguiendo que no se incorpore a la red de alcantarillado”.

1.4.3. Marco Regional

Dentro del ámbito regional, destaca la regulación de vertidos de pluviales que establece la Confederación Hidrográfica del Tago (CHT). Para obtener la solicitud de vertido de éstas, se debe adjuntar documentación técnica como planos en planta, perfiles transversales, planos de detalle y una memoria técnica descriptiva de las obras que incluya:

“Cuantificación de los caudales de vertido en función del periodo de retorno para el que se calcula y justificación del diámetro de tubería adoptado.

Justificación de la solución proyectada para la protección de las márgenes del cauce frente a erosiones localizadas, de modo que no se disminuya la capacidad hidráulica del cauce.

Se deberá justificar que el cauce receptor tenga capacidad para asumir los caudales vertidos, para lo que se deberá portar un estudio hidrológico-hidráulico comparativo del caudal correspondiente al periodo de retorno considerado, en el que se estudie el caudal circulante por el cauce en la situación preoperacional y el que circularía una vez que se incorpora el vertido a través de las obras solicitadas (posoperacional), justificando que el cauce tiene capacidad para evacuarlo y estudiando la afección que la incorporación de este caudal pueda provocar sobre el cauce, así como las posibles afecciones a terrenos colindantes y aguas abajo de dicho punto, prolongándose hasta que la afección causada desaparezca. Para ello se utilizará algún modelo de simulación hidráulica (HEC-RAS o similar). Se deberán aportar en formato digital los cálculos o modelos hidráulicos empleados para la obtención de los calados o las láminas de inundación para cada caudal que sirva para diseñar las actuaciones [...]”.

En el caso de aliviaderos en redes de saneamiento unitarias, se deberá aportar también:

"[...] Justificación técnica del dimensionamiento de la tubería adoptado

Justificación técnica del dimensionamiento de los aliviaderos al objeto de reducir al máximo posible la carga contaminante del vertido, de forma que los alivios en episodios de lluvias alcancen una dilución mínima aceptable para el medio receptor e impidiendo que se realicen vertidos directos al cauce en tiempo seco. [...]"

Además, la Ley 12/2002, de 27 de junio, Reguladora del Ciclo Integral del Agua de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha en su Artículo 21, establece lo siguiente:

"1. Las infraestructuras de depuración de aguas residuales contempladas en el Plan director deberán garantizar la evacuación y tratamiento de las mismas de forma eficaz con el fin de preservar la calidad de las aguas y posibilitar sus más variados usos, en cumplimiento de la legislación vigente.

2. La calidad del agua de los efluentes de las estaciones depuradoras deberá ser la adecuada para dar cumplimiento a la normativa básica sobre depuración de aguas residuales urbanas, sin perjuicio del respeto a los objetivos de calidad establecidos en la planificación hidráulica general. [...]"

1.4.4. Marco Local

En cuanto a normativa local, actualmente sigue vigente el Plan de Ordenación Municipal (P.O.M.) de Azuqueca de Henares, cuyo artículo 12.6 *Contención de aguas pluviales en el interior de la parcela* de la Ordenanza ZU-I, que regula la edificación en las zonas calificadas con uso característico industrial, establece que:

"[...] para absorber avenidas del periodo T500, se dispondrá en el interior de la parcela un sistema de almacenamiento regulador previo al vertido de estas aguas pluviales, que en todo caso se dimensionará con un mínimo volumen de 7,85 l/m² de superficie de parcela de uso industrial.

Dicho almacenamiento podrá ser permeable al terreno siempre que se garantice que las aguas que lleguen a él estén decantadas y libres de grasas.

En cualquier caso, al respecto de lo anterior, se estará a lo dispuesto en el Artículo 259ter del Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, porque se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico."

No obstante, esta ordenanza se considera una medida insuficiente y demasiado generalista, que no responde a los objetivos actuales y que además aplica únicamente a parcelas industriales y no es extrapolable a todo el municipio. Por todo ello, actualmente el ayuntamiento de Azuqueca de Henares está trabajando en la modificación del P.O.M.

Pese a ello, la experiencia de aplicación de esta ordenanza se considera positiva, y ha servido para que desde el Ayuntamiento se tome la iniciativa, con carácter previo a la modificación de la normativa municipal en la que se generalice y regule la implantación de los SUDS a todos los ámbitos del municipio, de redactar esta guía y la [herramienta de cálculo](#) que la

complementa, documentos a los que hará mención la futura modificación del P.O.M.

Por lo tanto, el diseño de redes de drenaje y SUDS para los nuevos desarrollos y proyectos de regeneración urbana acometidos dentro del término municipal de Azuqueca de Henares, deberán tener como objetivo principal el de gestionar la escorrentía superficial tanto en cantidad como en calidad, favoreciendo la retención e infiltración en origen, manteniendo la hidrología natural del ámbito y respetando la siguiente jerarquía de sistemas de gestión de aguas pluviales:

1. Aprovechamiento de escorrentía para usos no potables.
2. Infiltración de la escorrentía al terreno.
3. Descarga controlada a cauce público.
4. Descarga controlada a red de pluviales municipal.
5. Descarga controlada a red unitaria municipal.

Igualmente, se deberán de seguir tanto los criterios de diseño que se presentan más adelante en el Capítulo 3 de esta guía, como las siguientes directrices:

- Se debe fomentar el aprovechamiento de pluviales para usos no potables.
- Se debe promover el uso de SUDS para así limitar las aportaciones de escorrentía urbana a redes de saneamiento y drenaje o cauces públicos, manteniendo, en la medida de lo posible, la hidrología previa a la urbanización y una buena calidad del agua.
- En nuevos desarrollos se debe promover el uso de redes de drenaje separativas con gestión desde el origen.
- Diseñar los sistemas de drenaje con SUDS para que sean capaces de gestionar las lluvias de periodo de retorno de diseño.

- Cuando la infiltración al terreno sea posible, se debe reducir el volumen de escorrentía que se aporta a cauce público y/o red de saneamiento y drenaje municipal.
- Las aportaciones de escorrentía urbana se deberán limitar al caudal natural para el período de retorno de diseño o a una posible restricción mayor proveniente de la correspondiente autoridad competente.
- Cuando se proponga la infiltración al terreno, el aprovechamiento de pluviales y/o vertido final a cauce público, el proyecto de urbanización deberá prever, calcular y disponer de aquellos elementos que proporcionen el tratamiento adecuado de la escorrentía para evitar la contaminación del medio receptor, y, en su caso, conseguir la calidad del agua adecuada según el uso que se le va a dar.
- En desarrollos de gran envergadura, la inundación generada, durante eventos de periodo de retorno superiores al de diseño, deberá ser contenida dentro del ámbito de desarrollo.

Por último, a nivel local también existe la Ordenanza Municipal Reguladora del Vertido de Aguas Residuales, que indica lo siguiente:

“Las aguas pluviales no podrán verterse directamente a la red de alcantarillado si existe red separativa para pluviales. Del mismo modo, las aguas residuales no podrán verterse a la red separativa de pluviales.”



2. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

2.1. Filosofía de los SUDS

Los SUDS engloban diferentes técnicas de drenaje sostenible que imitan los procesos naturales del ciclo hidrológico, y se complementan con el drenaje convencional para gestionar las aguas pluviales. La filosofía de los SUDS va enfocada a potenciar los beneficios de la escorrentía proveniente de aguas pluviales, tratando ésta como un recurso y no como un residuo, minimizando los efectos negativos derivados de esta escorrentía en las zonas urbanas.

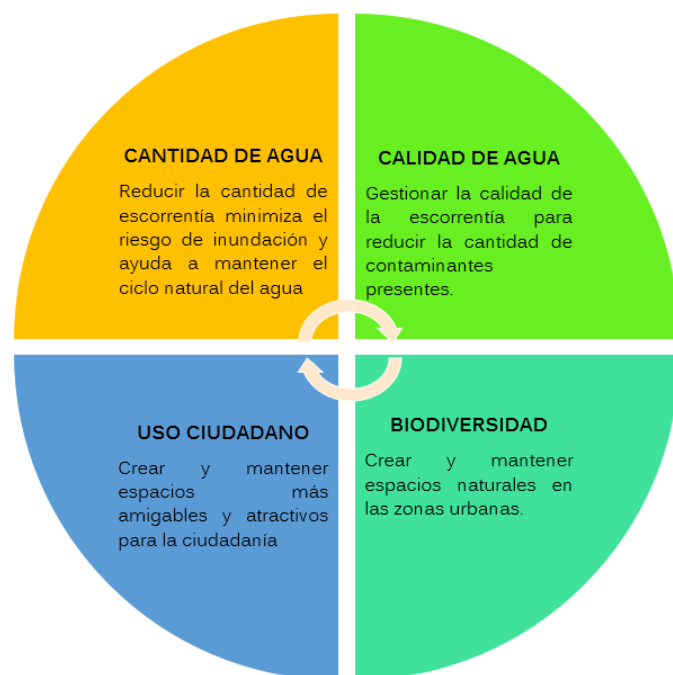


Figura 6: Pilares fundamentales de los SUDS.

El diseño de SUDS debe acometerse atendiendo a los cuatro pilares sobre los que se fundamenta la gestión sostenible de las aguas pluviales (Figura 6) para así gestionar tanto la cantidad como la calidad de la escorrentía,

mejorar la biodiversidad del entorno y reforzar la idea de integración paisajística y multifuncionalidad de las actuaciones urbanísticas, proporcionando con todo ello espacios más amigables y atractivos para los ciudadanos.

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, la impermeabilización del terreno provoca alteraciones al medio natural y por consiguiente afecta directamente a los procesos hidrológicos de las cuencas existentes. La Figura 7 muestra el ciclo hidrológico de una cuenca previa al desarrollo, donde predomina la evapotranspiración, la recarga de acuíferos mediante la infiltración de la escorrentía, y la laminación natural de la escorrentía previamente a su descarga al medio receptor.

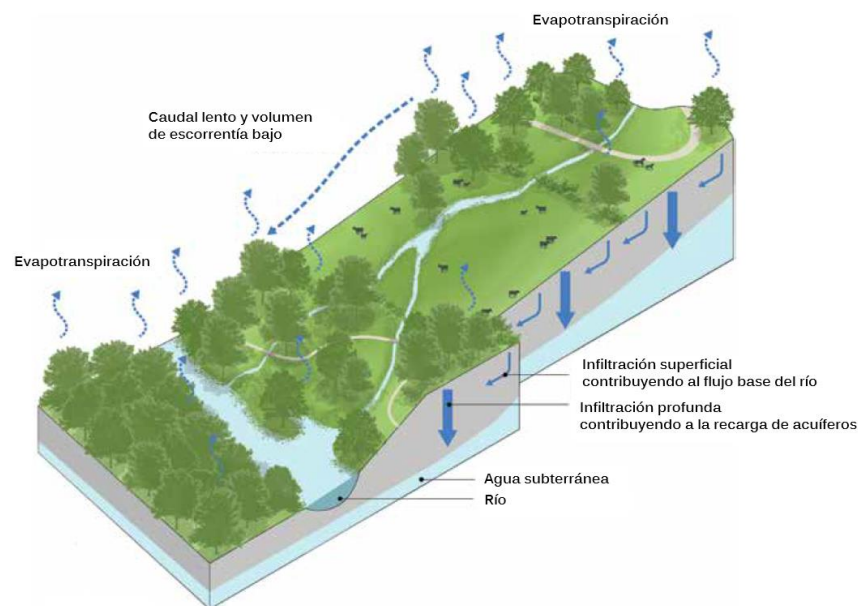


Figura 7: Cuenca natural previo a la urbanización. Fuente: Adaptación de *The SuDS Manual*, CIRIA (2015).

Por el contrario, como consecuencia del desarrollo urbanístico del terreno, generalmente se reducen las zonas vegetadas, disminuyendo así el volumen de infiltración y mermando la capacidad de evapotranspiración, lo que genera un aumento en caudal, volumen y velocidad de la escorrentía superficial, cómo se puede apreciar en la Figura 8.

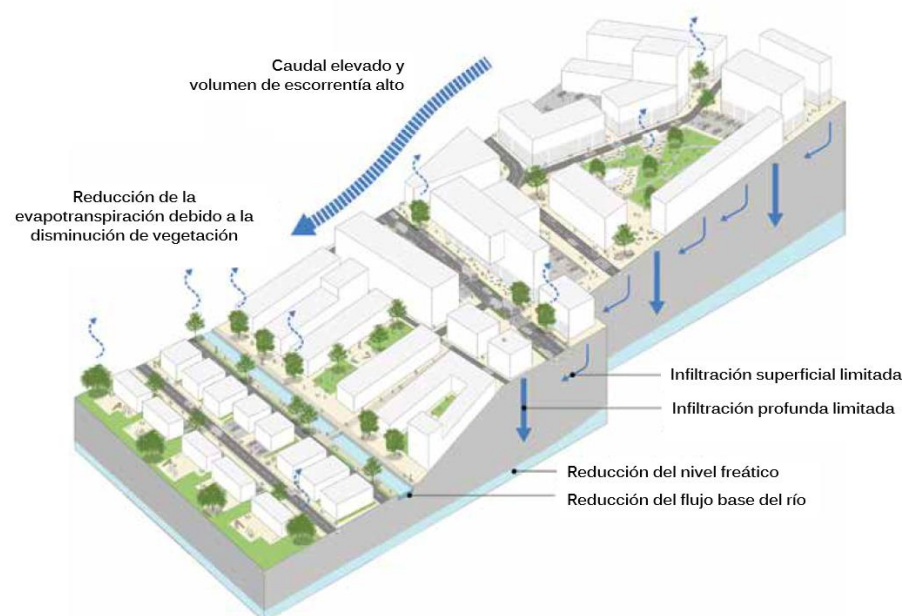


Figura 8: Escorrentía superficial en zona urbanizada.
Fuente: Adaptación de The SuDS Manual, CIRIA (2015).

Con la finalidad de restaurar los procesos hidrológicos naturales, los SUDS aparecen como la alternativa ideal que complementa al drenaje tradicional, para ser implantados en zonas ya urbanizadas, así como en zonas de nuevos desarrollos urbanísticos.

Diseñados e integrados correctamente (Figura 9), los SUDS ofrecen múltiples beneficios que favorecen la restauración del proceso hidrológico natural.

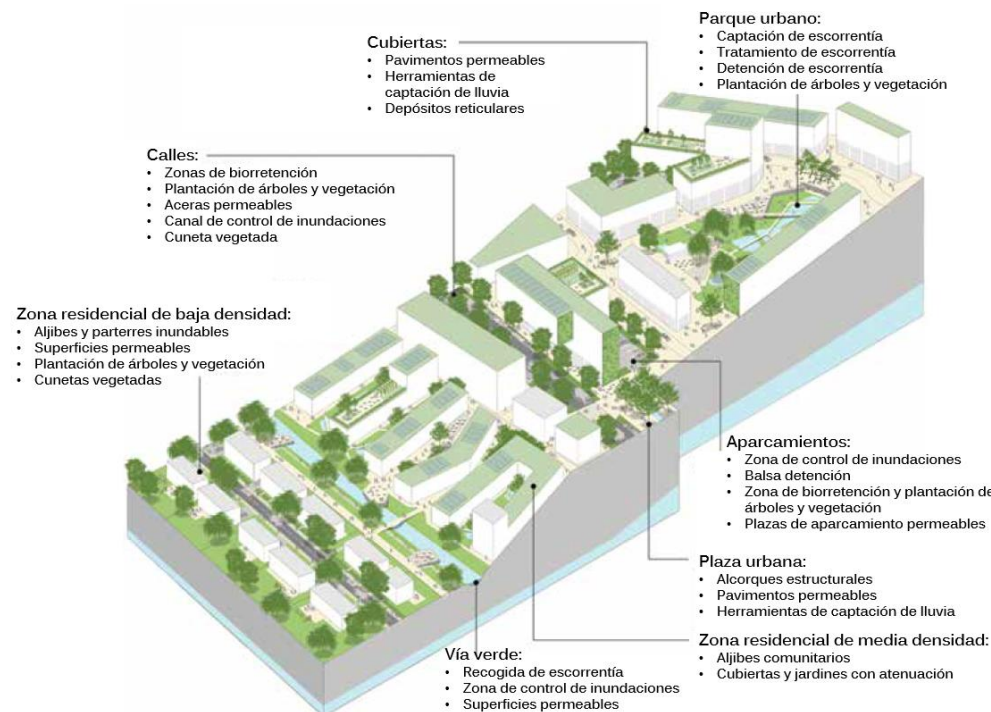


Figura 9: Integración de SUDS en las ciudades.
Fuente: Adaptación de The SuDS Manual, CIRIA (2015).

Los SUDS tratan de reproducir los procesos hidrológicos naturales y pueden realizar las siguientes funciones:

- **Filtración:** se trata de posibilitar el paso de la escorrentía a través de un medio filtrante que ayude con la detención de partículas y contaminantes solubles.

- **Detención:** consiste en almacenar de forma temporal la escorrentía, permitiendo la reducción del caudal pico y favoreciendo procesos como la sedimentación.
- **Retención:** se basa en el almacenamiento de volúmenes de escorrentía, para su evapotranspiración, aprovechamiento para uso no potable y/o posterior descarga laminada al medio receptor.
- **Infiltración:** cuyo objetivo es facilitar la infiltración del agua hacia el subsuelo, para contribuir al flujo base de los ríos y la recarga de acuíferos.
- **Tratamiento:** consiste en procesos que ayudan a la reducción de contaminantes tales como la biodegradación, absorción, etc.



Figura 10: SUDS implementados en el proyecto Cristóbal de Moura (Barcelona).

Adicionalmente, los SUDS pueden estar interconectados entre sí, permitiendo una gestión más eficaz de la escorrentía. A esto se le conoce como tren de tratamiento (Figura 11) y permite una mayor reducción de contaminantes que la que se llevaría a cabo con elementos individuales. Además, los trenes de tratamiento favorecen la laminación de caudales, aumentan el valor ambiental de la zona y contribuyen a la reducción de costes de mantenimiento en ciertos elementos del sistema de drenaje.

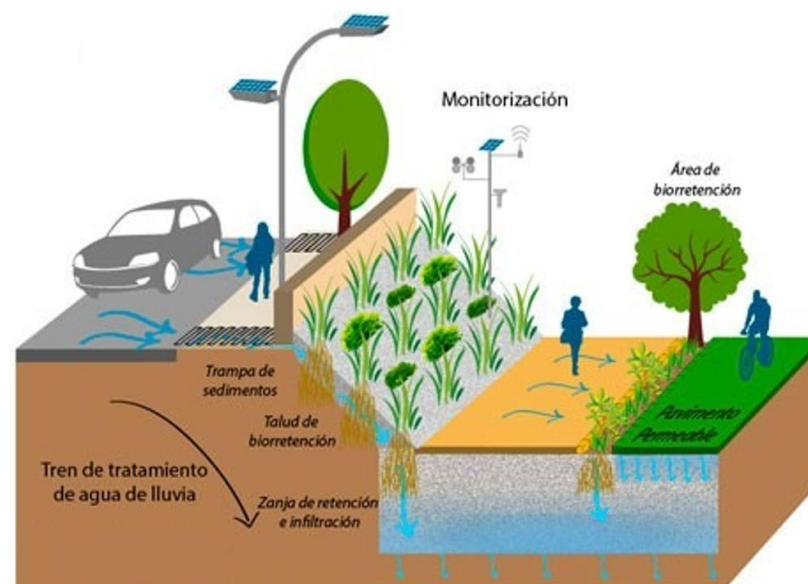


Figura 11: Ejemplo de tren de tratamiento. Fuente: iAgua (Martínez, s.f.)

2.2. Beneficios del uso de SUDS

El diseño adecuado del drenaje de aguas pluviales, con la utilización de SUDS, proporciona una amplia gama de beneficios si lo comparamos con los drenajes convencionales. Los SUDS logran integrarse completamente con el medio urbano, ya sea en una zona de nuevo desarrollo o en un proyecto de regeneración urbana, permitiendo, por ejemplo, la creación de

zonas vegetadas multifuncionales dentro de las ciudades, y ofreciendo diferentes beneficios de sostenibilidad que no serían posibles de obtener a través de sistemas de drenaje tradicionales (Tabla 2).

Tabla 2: Beneficios del uso de SUDS

BENEFICIOS DEL USO DE SUDS	
Calidad y Cantidad de la Escorrentía	
Calidad del agua	Los SUDS contribuyen a reducir la carga contaminante de la escorrentía y el volumen descargado, traduciéndose ambas en una mejora de la calidad en las masas de agua receptoras.
Riesgo de inundación	Los SUDS reducen las puntas de caudal y el volumen total descargado, reduciendo el riesgo de inundación.
Red de suministro y drenaje	Mejoran el funcionamiento de las redes mediante: ○ Colección de escorrentía: aprovechamiento para riego y usos sanitarios. ○ Infiltración: recarga de acuíferos.
Reducción de costes de explotación de redes	Reducción de diámetros en la red de colectores. Reducción de costes en bombeo y depuración, construcción de tanques de detención, etc.
Calidad del Aire	
Contaminación por partículas	Los SUDS reducen las partículas de polvo, químicos y metales suspendidos en el aire mediante absorción y filtrado.
Niebla tóxica ("smog")	Los SUDS vegetados combaten este efecto mediante: ○ Reducción de la temperatura del aire. ○ Reducción de contaminantes.

	○ Reducción asociada a la producción energética.
Mejora de salud y calidad de vida	La implantación de vegetación en zona urbana gracias a los SUDS y la mejora general de la calidad del aire reducen problemas respiratorios y cardíacos.
Cambio Climático	
Incremento de temperaturas	Reducen el efecto de isla de calor mediante la implantación de vegetación y masas de agua.
Mayor frecuencia de precipitaciones torrenciales	Permiten la laminación al interceptar, almacenar e infiltrar la escorrentía y alivian la presión sobre las redes existentes, que en muchos casos no están preparadas para soportar aumentos en la intensidad de lluvia.
Gasto energético	Reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, al existir menor necesidad de bombeo y tratamiento.
Medioambiente y Fauna	
Creación y mejora de hábitats	Crean zonas para el desarrollo de aves, mamíferos, insectos, etc.
Interconexión de hábitats	Facilitan el movimiento de la fauna entre hábitats por lo que da lugar a un intercambio genético entre poblaciones.
Comunidad	
Salud	Sus beneficios son directos gracias a la reducción de contaminantes en el aire y el agua; e indirectos, por la creación de espacios que permiten realizar ejercicio físico.
Creación de espacios recreativos	Permiten la generación de áreas de ocio para la población, dentro del área urbana.
Empleos verdes	Genera empleos en construcción y mantenimiento de infraestructura verde, y nuevos programas de formación.

2.3. Clasificación de los SUDS

Los SUDS pueden clasificarse de diversas maneras, como según su función o su localización en la cuenca. Una de las más habituales es la distinción entre medidas estructurales y no estructurales. Las **medidas estructurales** requieren de elementos constructivos para poder gestionar el agua de lluvia, minimizar su contaminación y/o limitar la generación de escorrentía. Además, existen **elementos auxiliares y/o complementarios** que permiten el correcto funcionamiento de estos SUDS.

Por otro lado, los SUDS también se apoyan en otro tipo de **medidas no estructurales** las cuales favorecen su implementación y funcionamiento, y con ello se contribuye a mejorar la calidad del agua, la reducción de la escorrentía y la mejora del ambiente urbano sin necesidad de medidas constructivas. Estas medidas no estructurales incluyen, entre otros aspectos, actuaciones legislativas, educativas y de gestión.

2.3.1. Tipología de SUDS estructurales

Los SUDS, entendidos como una estrategia innovadora de gestión de pluviales que persigue reproducir los procesos hidrológicos previos al desarrollo urbanístico (potenciando la laminación, filtración, tratamiento e infiltración de la escorrentía) se desarrollan en una variada y rica tipología de soluciones que permite a los proyectistas y gestores de los servicios de saneamiento elegir el tipo más adecuado para cada situación. Los más interesantes para el municipio de Azuqueca de Henares son los que se describen a continuación.

ALJIBES

Son estructuras que almacenan la escorrentía procedente de cubiertas u otras superficies impermeables, para su posterior aprovechamiento en usos no potables, como el riego o el baldeo.

La escorrentía es captada mediante otros elementos de drenaje (canaletas e imbornales, canalones o incluso otras tipologías de SUDS) y es dirigida al volumen de almacenamiento, pudiéndose proporcionar un tratamiento si se requiere. Adicionalmente, los aljibes deben contar con un rebose a la red de drenaje, para cuando se excede su capacidad.

Según su posición respecto a la rasante del terreno pueden clasificarse en aljibes enterrados o en superficie. En cuanto a los materiales los más frecuentes son los de polietileno u hormigón.



Figura 12: Aljibe en Benaguasil (Valencia).

CUBIERTA VEGETADA

Están formadas por un conjunto de capas que, una vez instaladas sobre un tejado, permiten la implementación de vegetación en una cubierta. La vegetación posibilita la evapotranspiración de parte de las escorrentías, así como su tratamiento y retención en la capa de sustrato. Además, suelen incorporar una capa drenante donde las escorrentías se pueden almacenar temporalmente y desde donde el agua se emplea como riego pasivo. Una vez excedida la capacidad de almacenamiento del conjunto de capas, el volumen sobrante se evacúa a través de las bajantes del edificio.



Figura 13: Cubierta vegetada en el Centro de ocio de mayores Río Henares (Azuqueca de Henares).
Fuente: Abalos+Sentkiewicz AS+.

Existen dos tipos de cubiertas vegetadas atendiendo al espesor del sustrato y al tipo de vegetación que se implemente:

Extensivas: incluyen vegetación herbácea o plantas crasas tipo sédum, con espesores de sustrato pequeños, de unos 10 cm. Habitualmente ocupan una gran parte de la superficie del tejado y no suelen ser visitables.

Intensivas: ocupan una parte pequeña de la cubierta y permiten la inclusión de vegetación arbustiva e incluso arbórea, ya que el espesor del sustrato es mayor, en ocasiones superior a los 50 cm.

ALCORQUES ESTRUCTURALES

Se componen de un suelo estructural que proporciona un volumen de tierra para el desarrollo de las raíces del árbol, dotándole de capacidad portante que evite la compactación excesiva.

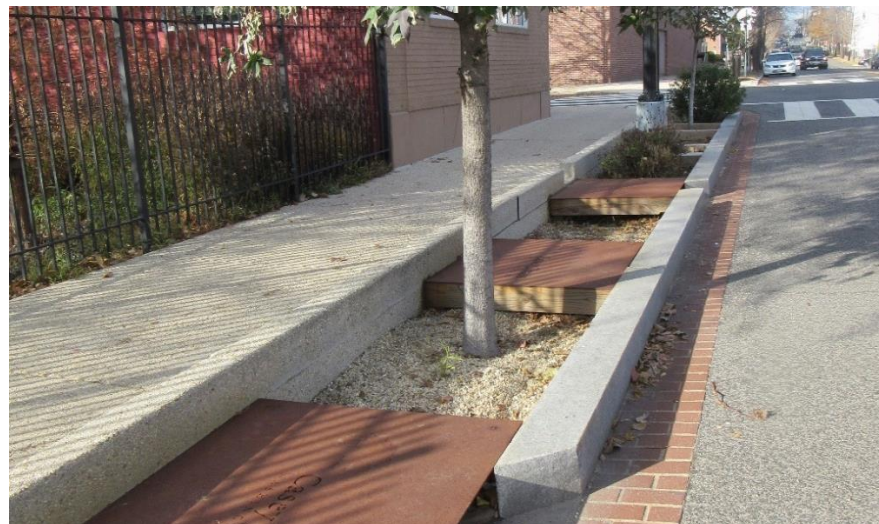


Figura 14: Alcorques estructurales en Washington DC (EEUU).

Esta infraestructura se identifica como una oportunidad para incluir elementos que faciliten la gestión de las pluviales en este volumen de suelo. Las escorrentías procedentes de las zonas próximas pueden entrar al suelo estructurado mediante pavimentos permeables o canaletas perimetrales donde pueden ser aprovechadas por las raíces como riego pasivo, añadirse a la humedad del suelo o infiltrarse al terreno.

Según el tipo de suelo estructural pueden clasificarse en:

Alcorques con material granular: el suelo es una mezcla de material granular y el sustrato vegetal para lograr una capacidad portante adecuada que evite la compactación.

Alcorques con geo-celdas de propileno: se implementa una estructura reticular portante compuesta por celdas de polipropileno que será rellena con el sustrato vegetal para el desarrollo de las raíces.

CUNETA VEGETADA

Son estructuras lineales vegetadas, anchas y de poca profundidad, que reciben las escorrentías de las zonas impermeables adyacentes. Su función principal es el transporte y tratamiento de la escorrentía, permitiendo también su infiltración si las condiciones del terreno fueran favorables. La eliminación de contaminantes mediante sedimentación, filtración y biorremediación se puede dar gracias a la presencia de vegetación.

Cuando la pendiente es pronunciada, o cuando se desea reducir la velocidad de las escorrentías para favorecer la infiltración, pueden incluirse represas transversales que optimicen el almacenamiento y faciliten la infiltración.



Figura 15: Cuneta vegetada en Irlanda.

DRENES FILTRANTES

Son elementos lineales, en forma de zanjas de poca profundidad, rellenos de material granular y que cuentan con un conducto perforado en su base que facilita el reparto y el transporte longitudinal de las aguas.

Generalmente reciben escorrentía de las áreas adyacentes, que entra lateralmente, se filtra a través del material granular y se almacena temporalmente en este, contribuyendo a la laminación de caudales pico.



Figura 16: Dren filtrante en Madrid.

El material filtrante más utilizado para el relleno son las gravas, que deben ir envueltas en un geotextil para evitar la colmatación de finos. Es recomendable incluir un geotextil superficial independiente a poca profundidad, que retenga gran parte de los sedimentos y facilite su mantenimiento.

ZANJA/POZO DE INFILTRACIÓN

Son excavaciones que se rellenan con un material poroso con la finalidad de proporcionar filtración y almacenamiento temporal a la escorrentía, para su posterior infiltración al terreno. Según la forma de la excavación pueden clasificarse en:



Figura 17: Zanja de infiltración en Quart de Poblet (Valencia).

Zanjas: son sistemas lineales poco profundos generalmente rellenos con un material granular.

Pozos: tienen carácter puntual, mayor profundidad y se pueden dar con o sin revestimiento. Los pozos sin revestimiento suelen ir rellenos con material granular, mientras que los pozos con revestimiento pueden presentar un volumen hueco, y se utiliza ladrillo panal o anillos de hormigón perforados.

PARTERRE INUNDABLE

Son zonas vegetadas que se encuentran deprimidas con respecto a las superficies impermeables adyacentes y posibilitan el tratamiento de la escorrentía. También pueden permitir la infiltración del agua al terreno natural, tras ser tratada, o incorporar un drenaje subsuperficial que vierta de manera controlada el volumen almacenado. En función del espesor del medio filtrante, y la calidad de las escorrentías recibidas se dividen en:

Jardines de lluvia: gestionan escorrentías con niveles bajos de contaminación, procedentes de cubiertas o zonas peatonales y presentan un espesor del medio filtrante entre 0,3 y 0,5 m.



Figura 18: Jardín de lluvia en Bon Pastor (Barcelona).

Zonas de biorretención: gestionan la escorrentía con niveles de contaminantes más elevados, procedentes de zonas con tráfico rodado, y el espesor del medio filtrante varía entre 0,75 y 1 m.



Figura 19: Zona de biorretención en el municipio de Tudela (Navarra).

PAVIMENTO PERMEABLE

Son pavimentos que permiten el paso de personas o vehículos y, a su vez, la filtración de la escorrentía hacia la subbase, para su almacenamiento temporal subterráneo. Este volumen de almacenamiento puede proporcionarse mediante gravas, celdas o cajas reticulares, y la escorrentía puede infiltrarse al terreno o descargarse de manera controlada.



Figura 20: Pavimento permeable en el Centro de ocio de mayores Río Henares (Azuqueca de Henares). Fuente: Abalos+Sentkiewicz AS+.

Existen dos tipologías de pavimentos: los **pavimentos porosos** cuya superficie está cubierta por un material poroso (hormigón, asfalto o similar) que permite la filtración de la escorrentía; y, los **pavimentos permeables por junta**, compuestos por unidades impermeables (como los adoquines) cuya instalación permite dejar juntas que facilitan el paso del agua.

Cabe señalar que, en Azuqueca de Henares, únicamente se recomienda el uso de pavimentos permeables en zonas peatonales o de aparcamiento.

FRANJA FILTRANTE

Son franjas vegetadas con taludes suaves que permiten el paso de la escorrentía en superficie, reduciendo su velocidad y facilitando la sedimentación y la filtración. Se pueden considerar como un sistema de pretratamiento de escorrentía (dentro de un tren de SUDS) y van normalmente asociados a elementos longitudinales impermeables, como carreteras, caminos o carriles bici.



Figura 21: Franja filtrante. Fuente: The SuDS Manual, CIRIA (2015).

DEPÓSITO RETICULAR

Son estructuras subterráneas de almacenamiento de escorrentía que permiten su detención y su posterior infiltración al subsuelo o descarga controlada a la red.

Están formados por estructuras reticulares de polipropileno, que brindan un gran volumen de almacenamiento, con índices de huecos superiores al 90 %, además de proporcionar una elevada capacidad portante, adecuada para soportar cargas vehiculares.

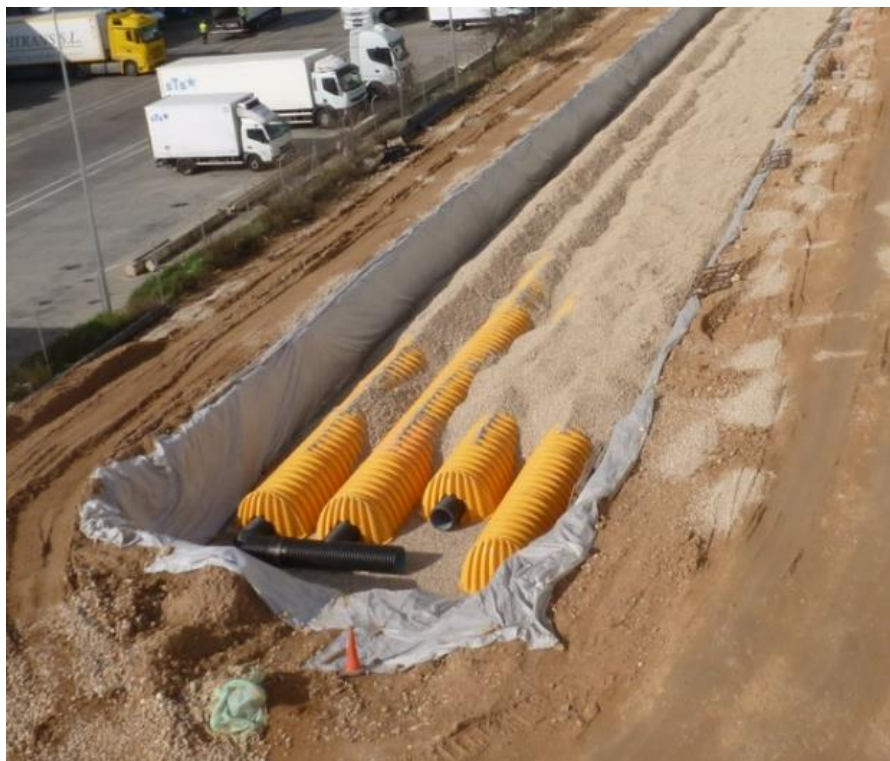


Figura 22: Depósito reticular en Azuqueca de Henares.

Cabe destacar que los depósitos no proporcionan ningún tratamiento a las escorrentías, por lo que es imprescindible que se instalen acompañados de otras tipologías de SUDS o junto a un dispositivo de tratamiento compacto (separadores hidrodinámicos o similares) que traten las escorrentías antes de que estas entren al depósito.

BALSAS DE DETENCIÓN Y/O INFILTRACIÓN

Son depresiones del terreno, habitualmente vegetadas, que permiten el almacenamiento temporal de agua de lluvia, permitiendo laminar y/o infiltrar la escorrentía. La detención de la escorrentía favorece la precipitación de los sedimentos arrastrados contribuyendo al tratamiento de esta.

Debe comprobarse que la mitad de la balsa se vacíe en máximo 24 horas para así asegurar la gestión de un potencial segundo evento consecutivo. Además, el vaciado completo de la balsa no debería exceder las 72 horas para evitar la proliferación de malos olores y/o mosquitos.

Según cómo se efectúe el vaciado de la balsa se clasifican en:

Balsas de detención: el vaciado de la escorrentía se produce de manera controlada mediante el uso de un desagüe.

Balsas de infiltración: posibilitan la infiltración de la escorrentía al subsuelo, por lo que deben ubicarse sobre terrenos permeables.



Figura 23: Balsa de detención en Fairfax (EEUU).

HUMEDALES ARTIFICIALES Y ESTANQUES

Son masas de agua artificiales que permiten la mejora de la calidad de las escorrentías y proporcionan un volumen de laminación. Presentan una lámina de agua permanente que sirve para evitar la re-suspensión de sedimentos y como soporte para la biodiversidad. El calado de esta lámina de agua puede variar, promocionando un volumen adicional que permite almacenar temporalmente las escorrentías. Esta escorrentía es detenida y descargada de manera controlada aguas abajo mediante una estructura de rebose.



Figura 24: Estanque en el Parque de la Quebradilla (Azuqueca de Henares).

En su zona perimetral cuentan con vegetación que contribuye a la sedimentación y a proporcionar un pretratamiento a la escorrentía. Generalmente son utilizados para laminar y tratar caudales que no han sido gestionados en su origen.

Los humedales se usan para mejorar la calidad de las escorrentías, mientras que los estanques son usados para controlar grandes volúmenes de escorrentía. Los humedales normalmente disponen de mayor cobertura vegetal, pero menor profundidad que los estanques.

2.3.2. Elementos auxiliares y/o complementarios

Adicionalmente a las diversas tipologías de SUDS, existen otros elementos auxiliares que permiten el correcto funcionamiento de éstos.

2.3.2.1. Elementos de entrada de escorrentía

Son elementos que permiten el ingreso de la escorrentía en los SUDS, como pueden ser los bordillos intermitentes, los imbornales o las canaletas. Maximizan el potencial de los SUDS al proporcionar conectividad hidráulica entre estos y las áreas impermeables adyacentes.

En la Figura 25, se muestran como varios de estos elementos se integran de una manera excelente en la urbanización.



Figura 25: Bordillo intermitente. Entrada hacia un jardín de lluvia en Cincinnati (EEUU).



Figura 26: Elemento de entrada hacia un jardín de lluvia en Washington DC (EEUU).

2.3.2.2. Elementos de vertido o rebose controlado

Los aliviaderos o válvulas de vórtice ayudan a un vertido controlado hacia el medio receptor o el siguiente elemento de gestión de escorrentía.

Las válvulas vórtice son dispositivos que permiten la regulación de caudal en función de la lámina de agua, gracias a que trabajan mediante principios hidrodinámicos, y son una buena opción para controlar el almacenamiento y descarga de aguas pluviales. Para más información sobre el funcionamiento de válvulas vórtice se recomienda visitar el siguiente [enlace](#).

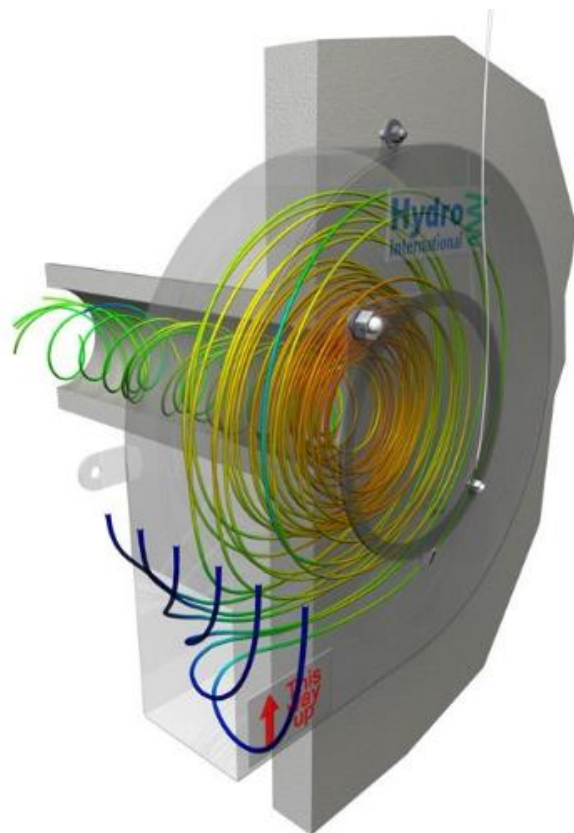


Figura 27: Válvula vórtice. Fuente: Drenatura.

Para sistemas poco profundos, con escaso volumen de almacenamiento, es habitual emplear controles mediante orificios o vertederos de ranura que se ubican en la superficie para que el mantenimiento sea una tarea sencilla.

En la Figura 28 se muestra el uso de algunos de estos elementos auxiliares y su correcta integración con los SUDS.

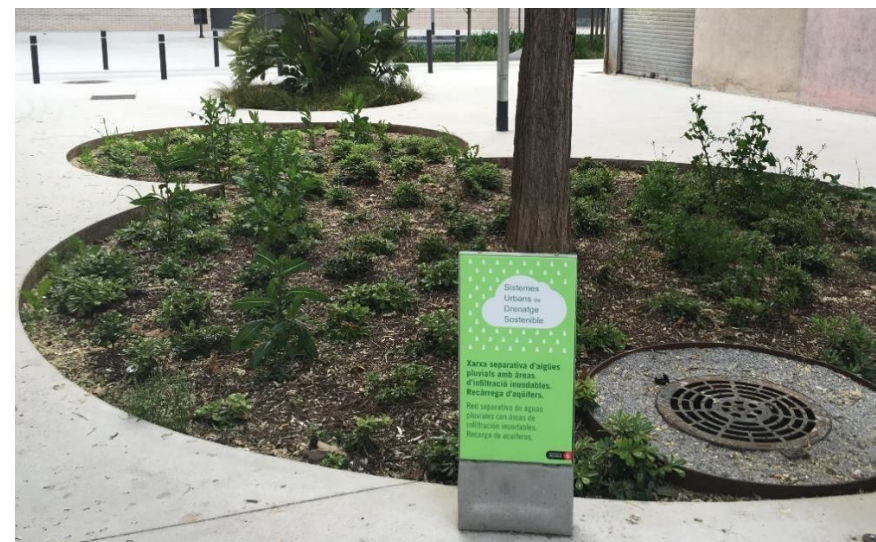


Figura 28: Elementos de rebose en Barcelona.

2.3.2.3. Dispositivos de Tratamiento

Son elementos que contribuyen a la eliminación de los contaminantes, mejorando la calidad de escorrentía. Entre ellos destacan los **separadores hidrodinámicos** (Figura 29) y los **filtros compactos** (Figura 30).

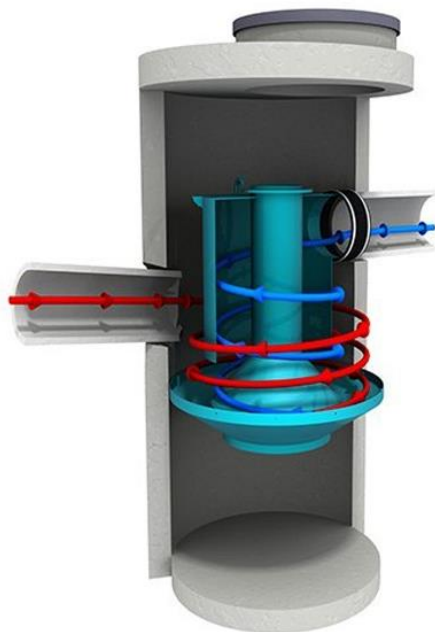


Figura 29: Separador hidrodinámico. Fuente: Drenatura.

En el caso de los separadores hidrodinámicos, la escorrentía entra en el pozo donde se encuentra el dispositivo, el cual genera un flujo rotativo que permite la retención de contaminantes y restos de suciedad, mientras que permiten la salida del agua ya tratada. Para más información sobre el funcionamiento de los separadores hidrodinámicos se recomienda visitar el siguiente [enlace](#).

Por su parte, en los filtros compactos, el agua entra al pozo donde es dirigida hacia el módulo de filtros que permite el tratamiento del agua y donde los contaminantes y restos de suciedad quedan almacenados. Para más información sobre el funcionamiento de los filtros compactos se recomienda visitar el siguiente [enlace](#).

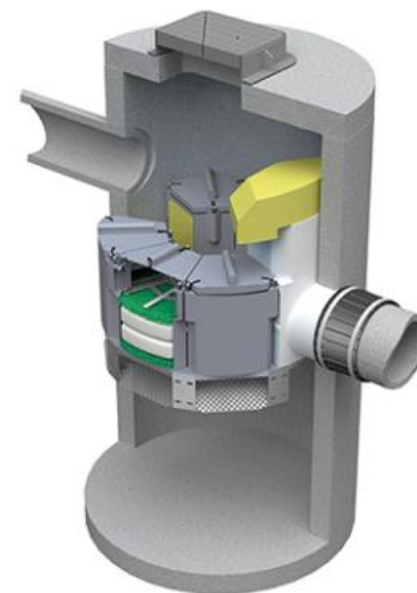


Figura 30: Filtro compacto. Fuente: Hydro International.

Estos sistemas de tratamiento son normalmente recomendados en lugares donde se dispone de espacio limitado y generalmente se utilizan previamente al vertido al medio receptor.

2.3.3. Medidas SUDS no estructurales

Las medidas SUDS no estructurales pueden ser tan diversas como la implantación de normativa, medidas educativas o tareas de mantenimiento, y son un complemento indispensable para optimizar el diseño y aprovechamiento de las medidas estructurales, y concienciar a la ciudadanía acerca de la importancia del drenaje urbano sostenible.

Medidas educativas, pueden ser las campañas de prevención e información, formaciones técnicas, paneles explicativos, etc., los cuales permiten que la ciudadanía, los profesionales y los legisladores, puedan conocer y comprender el funcionamiento de las medidas estructurales implementadas.



Figura 31: Taller dirigido a profesionales.



Figura 32: Panel informativo de SUDS en la Universidad Pública de Navarra.

Legislación y normativas, cuya implantación permite que haya medidas reguladoras que establezcan los criterios y líneas prioritarias a llevar a cabo en los ámbitos de actuación, como es el caso del P.O.M de Azuqueca de Henares y de esta guía.

Otro ejemplo de este tipo de medidas no estructurales es [el Pacto de las alcaldías por el clima \(PACES\)](#). El pasado noviembre de 2021 el Pleno del Ayuntamiento de Azuqueca de Henares acordó la aprobación del Plan de Acción en el Marco del Pacto de los Alcaldes por el Clima y la Energía.

Este plan efectúa una caracterización del municipio y, en base a ella, define un análisis de riesgos y vulnerabilidades consecuencia del cambio climático para, posteriormente, proponer un conjunto de medidas de adaptación a implementar en el horizonte 2030.



Figura 33: Pacto de los Alcaldes.

Entre las medidas recogidas en el PACES para que el municipio de Azuqueca de Henares consiga la adaptación a los riesgos y vulnerabilidad detectados, se encuentra la redacción, tramitación y aprobación de un Plan General del ciclo integral del agua, actualmente en fase de preparación de su contratación. Esta medida tiene como principal objetivo conseguir una mejora de las infraestructuras de conexión, de los colectores municipales, así como el establecimiento de un marco de gestión y normativo que favorezca el ahorro de agua y el aprovechamiento inteligente y sostenible de las masas hídricas, orientado en todo caso al establecimiento de prácticas y usos responsables del agua.

Por último, el **mantenimiento y la coordinación** entre gestores es una pieza fundamental para asegurar el correcto funcionamiento de las medidas estructurales implantadas, garantizando así el éxito de la inversión llevada a cabo. Por ello, más adelante en esta guía (apartado 2.4.1) se desarrollan las medidas de mantenimiento a realizar para los diferentes SUDS.



Figura 34: Mantenimiento de cuneta vegetada. Fuente: 4th Corner Landscaping.

2.4. Mantenimiento y monitorización

2.4.1. Mantenimiento

Independientemente de la tipología de SUDS que se utilice, es necesario llevar a cabo un adecuado mantenimiento de la infraestructura para garantizar el correcto funcionamiento de la misma.

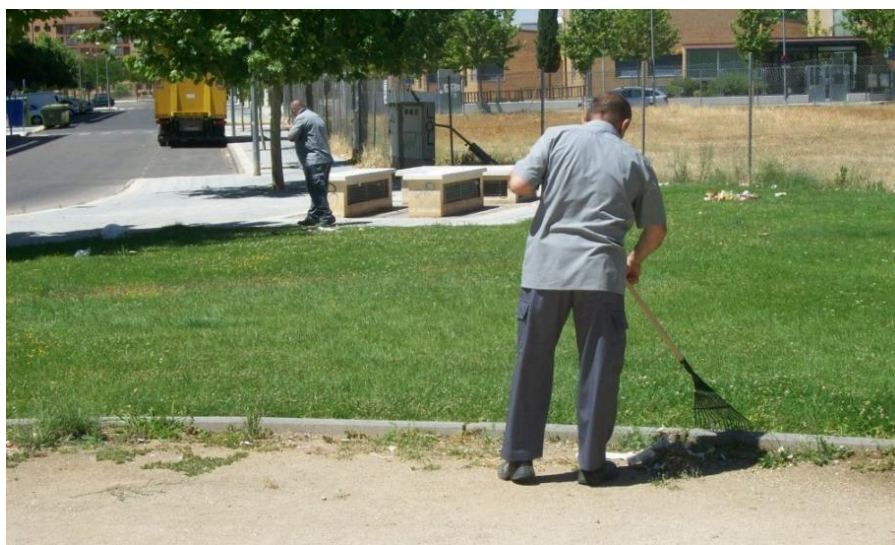


Figura 35: Mantenimiento en Azuqueca de Henares.

Gran parte de los problemas en un sistema de drenaje se pueden prevenir a través de un correcto control y mantenimiento. Por esta razón, es importante que las autoridades locales, propietarios, responsables de empresas de aguas, empresas diseñadoras, etc., trabajen en conjunto, desde la fase de diseño, para asegurar el buen funcionamiento del sistema y favorecer el cumplimiento de la función para la cual fue ideado.

Las tareas de mantenimiento se dividen en tres tipos:



Figura 36: Tipos de tareas de mantenimiento

Por un lado, el **mantenimiento regular** incluye tareas periódicas programadas que se consideran necesarias. Entre ellas se encuentran tareas como las inspecciones regulares, la limpieza o el control de la vegetación.

Por su parte, el **mantenimiento ocasional** incluye tareas que con seguridad serán necesarias, pero se desconoce cuándo lo serán. Un buen ejemplo de estas tareas son la retirada de sedimentos o el reemplazo de la vegetación.

Por último, el **mantenimiento correctivo** comprende aquellas tareas requeridas para corregir fallos asociadas con el sistema, y pueden ser, por ejemplo, reparaciones en la entrada y salida del sistema, reparaciones asociadas a la erosión, rehabilitación de superficies, etc.

La Tabla 3 resume las tareas de mantenimiento más importantes para cada uno de los tipos de SUDS, y se ha creado en base a la información disponible en el [Capítulo 32](#) de *The SuDS Manual* (CIRIA, 2015).

Tabla 3: Actividades de operación y mantenimiento claves para SUDS. Fuente: Adaptado de The SuDS Manual, CIRIA (2015).

Actividad de mantenimiento	Tipología SUDS													
	Aljibe	Cubierta Vegetada	Alcorque Estructural	Cuneta vegetada	Dren Filtrante	Zanja de infiltración	Pozo de infiltración	Parterre inundable	Pavimento Permeable	Franja Filtrante	Depósito Reticular	Balsa de detención	Balsa de infiltración	Estanques y humedales artificiales
Mantenimiento regular														
Inspección	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Limpieza de desechos y escombros	□		■	■	■	■	□	■	■	■	□	■	■	■
Corte de césped				■	■	■	□	■	□	■	□	■	■	■
Control de vegetación invasiva		■			□	□			□	□		□	□	□
Poda de arbustos				□				□	□	□		□	□	□
Gestión de la extensión de vegetación												□		■
Gestión de vegetación acuática												□		■
Mantenimiento ocasional														
Gestión de sedimentos	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Reemplazo de vegetación		■		□				□		□		□	□	□
Barrido y aspirado			■						■					
Mantenimiento correctivo														
Rehabilitación/Reparación estructural	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Reacondicionamiento de la superficie de infiltración			□	□	□	□	□	□	□	□			□	

■ Actividad necesaria

□ Actividad que puede ser necesaria

2.4.2. Monitorización

Uno de los grandes desafíos de la investigación de SUDS en España está siendo cuantificar la mejora que se logra en la gestión de las aguas pluviales mediante su implementación. Para poder asentar el cambio de paradigma del drenaje urbano, se debe continuar apostando por el desarrollo de líneas de investigación y, en particular de la monitorización y seguimiento de las infraestructuras, como se lleva haciendo las últimas décadas, para así confirmar la efectividad de los mismos y aprender de las experiencias realizadas.

La monitorización juega un rol importante dentro de la implementación de SUDS, ya que permite cuantificar el rendimiento de las técnicas SUDS empleadas en cuanto a la reducción de cantidad de escorrentía y la mejora de la calidad, y permite evaluar cómo las condiciones locales pueden afectar a su rendimiento.

Como ejemplo de la importancia y trascendencia de la monitorización de los SUDS, en el proyecto AQUAVAL, desarrollado entre 2010 y 2013 en Benaguasil y Xàtiva (Valencia), se monitorizaron durante más de un año hasta siete tipologías de SUDS (aljibes, cubiertas vegetadas, cunetas vegetadas, áreas de biorretención, pavimentos permeables, balsas de detención y balsas de infiltración) y los resultados mostraron (en todos ellos) un desempeño excepcional, tanto en cuanto a la gestión de la cantidad como de la calidad de la escorrentía. Especialmente llamativos fueron los resultados obtenidos en la monitorización de los pavimentos permeables, alcanzándose una reducción de la escorrentía superior al 90 %.

Otro ejemplo es el proyecto E²STORMED, en el que se llevó a cabo la monitorización hidráulica y energética de una cubierta vegetada en Benaguasil (Figura 37). Los resultados mostraron importantes reducciones

en las aguas pluviales vertidas a la red, además de importantes ahorros energéticos motivados por la mejora en el aislamiento térmico del edificio.



Figura 37: Monitorización de cubierta vegetada en Benaguasil (Valencia). Proyecto E²STORMED.

Dada la gran importancia que tiene la monitorización de los SUDS, el Ayuntamiento de Azuqueca de Henares la está fomentando proactivamente y para ello ha apostado para que se lleve a cabo la monitorización de los SUDS implementados como parte del proyecto “Learning Center” del que se aportan más detalles en el apartado 2.7 de esta guía.

2.5. Certificaciones de sostenibilidad

La importancia y necesidad, que se lleva divisando desde los últimos años, de convertir a las ciudades convencionales en ciudades más resilientes y sostenibles, ha ocasionado que muchos de los nuevos desarrollos busquen adherirse voluntariamente a este cambio.

Para fomentar esta transformación, existen diferentes **certificaciones de sostenibilidad** que buscan concienciar a las diferentes partes interesadas sobre los impactos ambientales que intervienen en la cadena de producción con el fin de promover cambios en los patrones de consumo y la consecuente disminución de estos impactos.

Dentro del ámbito del drenaje urbano, estas certificaciones pretenden alcanzar diferentes objetivos que proporcionen beneficios para el medio ambiente y la comunidad, y cada una de ellas establece parámetros de calificación en función del ámbito de aplicación del proyecto. Entre las principales certificaciones de sostenibilidad, en cuanto a drenaje urbano se refiere, encontramos LEED, BREAM y VERDE. Para obtener más información sobre estas certificaciones, y las diferentes ventajas que pueden aportar a los proyectos de urbanización, se recomienda visitar los siguientes enlaces:



[LEED ©](#)

Leadership in Energy and Environmental Design



[BREEM ©](#)

Building Research Establishment Environmental Assessment Method



[VERDE ©](#)

Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios

2.6. Información adicional disponible

Para obtener información adicional sobre las diferentes tipologías de SUDS, criterios de diseño pormenorizados, sus beneficios y limitaciones, y tareas de mantenimiento y monitorización más detalladas, se recomienda revisar las siguientes guías de SUDS disponibles:

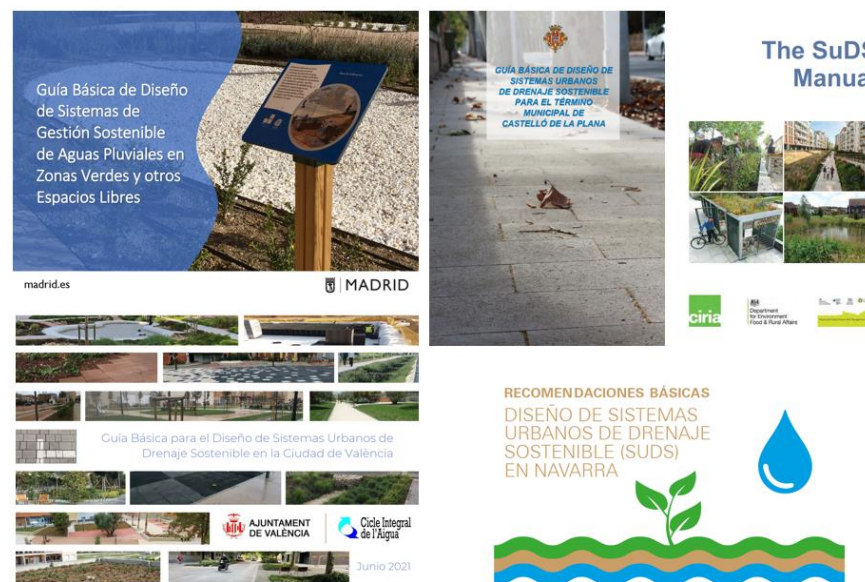


Figura 38: Otras guías de SUDS disponibles.

[The SuDS Manual \(inglés\).](#)

[Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el Término Municipal de Castelló de La Plana.](#)

[Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres.](#)

[Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València.](#)

[Recomendaciones básicas diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible \(SUDS\) en Navarra.](#)

2.7. Ejemplos de SUDS en Azuqueca de Henares

Almacén Logístico en la Avda. de la Construcción nº2 de Azuqueca de Henares

El [proyecto](#) se enclava en la zona oeste del polígono UP-1 (Miralcampo) y se trata de una parcela industrial de aproximadamente 16,3 ha. Durante el desarrollo del proyecto, se persiguió la certificación LEED que, unido a la capacidad limitada de la red de drenaje municipal existente, motivó que la gestión de pluviales se realizase mediante SUDS.

La propuesta de pluviales consistió en la construcción de tres depósitos de infiltración-laminación integrados dentro de un paquete de gravas graníticas (Figura 39). Estos depósitos, con un volumen de almacenamiento aproximado en conjunto de 3.700 m³, reciben la escorrentía de las zonas impermeables y la almacenan para su posterior infiltración al terreno. En caso de que la magnitud del evento exceda la capacidad del depósito, se ha proporcionado un sistema de rebose, que permite una descarga controlada a la red de drenaje municipal.

Para proporcionar un tratamiento apropiado a la escorrentía y así poder infiltrar la escorrentía, se incorporaron separadores hidrodinámicos en las entradas a los depósitos de infiltración, y cámaras de filtración previa a la entrada a la zona principal del depósito.

Por último, y como ya se ha mencionado, este proyecto dio cumplimiento a directrices de certificación de sostenibilidad, que le permitió obtener la calificación de LEED Platinum. En concreto, la estrategia de drenaje se

basó en gestionar en origen el 95 % de los eventos de lluvia en un año tipo, mientras que para eventos más extremos se diseñaron elementos de rebose capaces de trasegar las lluvias de periodo de retorno de 25 años, con la limitación de caudal establecida por la limitada capacidad de la red municipal.



Figura 39: Proceso constructivo depósitos reticulares en una nave industrial.

Reforma integral del espacio exterior del 'Learning Center' (El Foro)

Esta actuación llevada a cabo por el Ayuntamiento de Azuqueca de Henares, y que ha sido parcialmente financiada por Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) ha supuesto la transformación del edificio 'El Foro', el que se ha reconvertido en un 'Learning Center' dedicado a la pedagogía, constituyendo a la vez un parque bioclimático. Para ello se han llevado a cabo obras de reforma enfocadas a la renaturalización y reacondicionamiento de este espacio.



Figura 40: Proyecto de remodelación del Foro de Azuqueca de Henares. Fuente: ARCO 2000.

Para la gestión sostenible de las aguas pluviales, se ha instalado un depósito reticular, cuyo principal objetivo es retener e infiltrar las escorrentías, quedando integrado en la infraestructura urbana.

Además, como parte del proyecto también se han incorporado zonas verdes, transformando este espacio en un espacio más natural, y que asimismo permiten el aumento de las zonas permeables y la infiltración de agua pluvial, ayudando a una gestión más sostenible de la escorrentía.

Por último, cabe mencionar que, como se ha comentado anteriormente, el Ayuntamiento de Azuqueca de Henares está apostando fuertemente para que se lleve a cabo la monitorización de los SUDS implementados como parte de este proyecto.

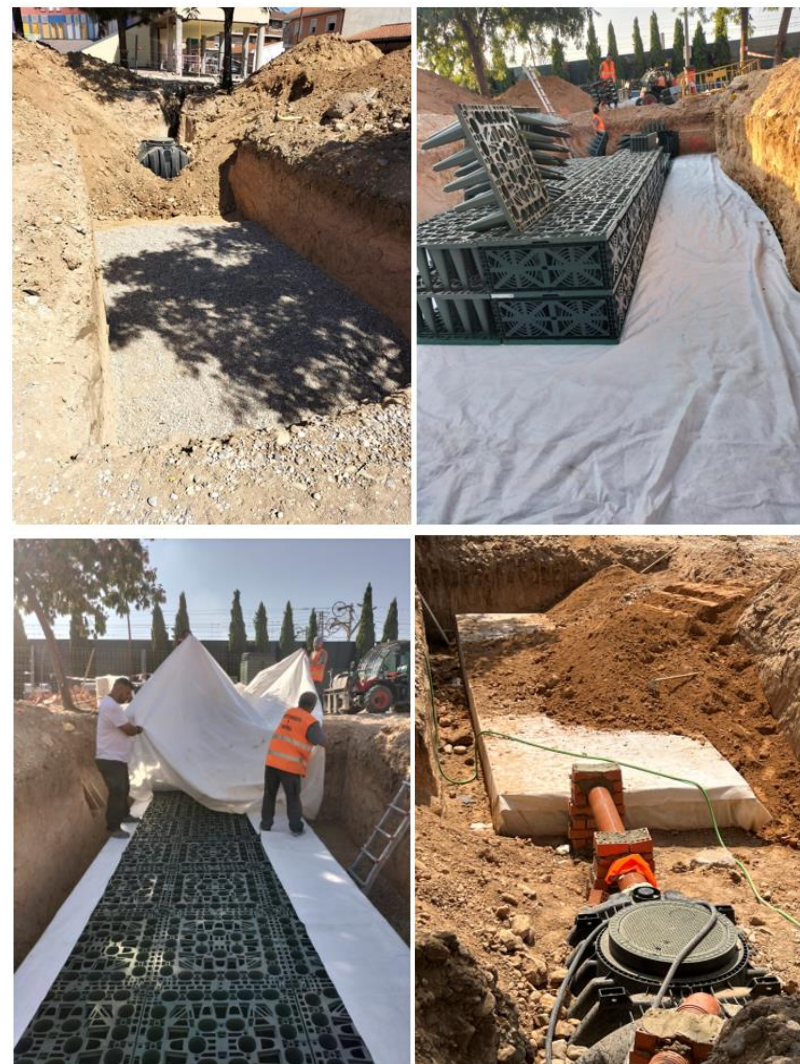


Figura 41: Proceso constructivo de los depósitos reticulares en el Learning Center.

2.8. Ejemplos de SUDS que benefician la integración y naturalización del paisaje urbano

Es cada vez más evidente el trabajo realizado por parte de las autoridades competentes en Azuqueca de Henares, a fin de fomentar la incorporación de SUDS dentro del municipio para gestionar la escorrentía pluvial de una manera más sostenible. Un claro ejemplo de ello es la redacción de esta guía.

La aplicación de técnicas SUDS en proyectos dentro del municipio, hasta el momento, se ha basado casi exclusivamente en el uso de depósitos reticulares enterrados. A pesar de que estos sistemas favorecen la gestión de la cantidad de escorrentía, se pretende dar un paso más fomentando la utilización de otro tipo de SUDS que favorezcan la idea de integración paisajística y multifuncionalidad que, en el contexto actual de cambio climático, debe presidir cualquier actuación en el medio urbano, coadyuvando con ello a crear entornos más atractivos y amigables para los ciudadanos de Azuqueca de Henares.

Por ello, en este apartado se detallan algunos ejemplos de aplicación de SUDS implementados en España, que han aportado a los cuatro pilares de la filosofía SUDS y se podrían tomar como ejemplo de lo que se pretende hacer en Azuqueca de Henares.

Estos ejemplos que se muestran a continuación pueden guiar a los diseñadores hacia la concepción e implementación de tipologías de SUDS basados en infraestructura verde, que además de brindar control de cantidad y calidad del agua, proporcionen un valor añadido tanto en biodiversidad como en uso ciudadano.

Más ejemplos de aplicación se pueden encontrar en la página web de redSUDS.

Renovación de la Avenida del Greco (Sevilla)

Uno de los proyectos a destacar por la integración de SUDS en el paisaje urbano es la [renovación de La Avenida del Greco](#), situada en el Distrito San Pablo-Santa Justa de Sevilla (Figura 42), cuya filosofía de proyecto fue crear una avenida *“más humana, más verde, más saludable”*.

El sistema de drenaje diseñado pretende captar y filtrar el agua de lluvia, generada en la calzada y las aceras, mediante pavimentos permeables (situados en los carriles bici) y parterres inundables. A continuación, La escorrentía se transporta a través de drenes filtrantes para posteriormente ser almacenada en dos aljibes con una capacidad de 115 m³ de almacenamiento conjunto, para su posterior aprovechamiento para riego.



Figura 42: Pavimento permeable y zona de biorretención implementada en la Av. del Greco (Sevilla).

Como se evidencia en la Figura 42, la implementación de parterres inundables, además de favorecer la gestión de la cantidad y calidad de la escorrentía, también aportan valor a la biodiversidad y un impacto visual muy positivo.

Barrio del Bon Pastor (Barcelona)

Otro proyecto que cabe destacar es el realizado en el barrio del [Bon Pastor](#), ubicado en el Distrito de Sant Andreu de Barcelona. Durante el proyecto de urbanización de las Fases E, F y G se apostó claramente por la incorporación de SUDS que gestionasen en origen la escorrentía y que a su vez se integrasen eficientemente en el paisaje urbano (Figura 43).



Figura 43: Jardines de lluvia en el barrio de Bon Pastor de Barcelona.

Las técnicas SUDS seleccionadas para este proyecto fueron los jardines de lluvia, áreas de biorretención, pavimentos permeables y alcorques estructurales con celdas reticulares.

Asimismo, las medidas no estructurales cobraron en este proyecto una especial relevancia a través de la instalación de carteles informativos para acercar los SUDS a los vecinos e informar a la comunidad sobre el funcionamiento de los sistemas implementados (Figura 44).



Figura 44: Panel explicativo del ciclo del agua e implementación de SUDS.

Calle Cristóbal de Moura (Barcelona)

El proyecto de conversión de la [Calle Cristóbal de Moura](#) en un nuevo eje verde, en Barcelona, es un referente de ingenio e innovación que demuestra que existen otras maneras más sostenibles de gestionar las aguas pluviales.

Se trata de un gran ejemplo de integración urbana de los SUDS, que proporcionan espacios más atractivos para los vecinos y un aumento de la biodiversidad en la ciudad.



Figura 45: Parterres inundables en la Calle Cristóbal de Moura de Barcelona.

Las técnicas SUDS empleadas en este proyecto fueron: áreas de biorretención, pavimentos permeables, jardines de lluvia y depósitos de laminación-infiltración enterrados. Estos SUDS son capaces de captar, tratar, retener e infiltrar al terreno la escorrentía generada en la zona.



Figura 46: SUDS de laminación e infiltración (depósitos enterrados) en la Calle Cristóbal de Moura de Barcelona.



3. Recomendaciones para el diseño de SUDS

Los SUDS aparecen como una alternativa innovadora y sostenible de gestión de pluviales, complementaria a los sistemas de drenaje convencionales, que buscan potenciar los beneficios de las infraestructuras de drenaje que constituyen una oportunidad ideal para crear entornos más agradables y atractivos para la ciudadanía.

Por ello, desde las fases iniciales del planeamiento urbano, es primordial analizar cómo se van a gestionar las aguas pluviales, identificando objetivos de diseño y priorizando la incorporación de SUDS para así asegurarse que su posterior implementación sea más sencilla y obtener un mejor aprovechamiento de coste y beneficio.

Este capítulo proporciona las recomendaciones a llevar a cabo para el diseño de SUDS, y recoge el procedimiento y el flujo de trabajo que facilita la incorporación de estos desde las primeras fases de los proyectos, tal y como se resume en la Figura 47.

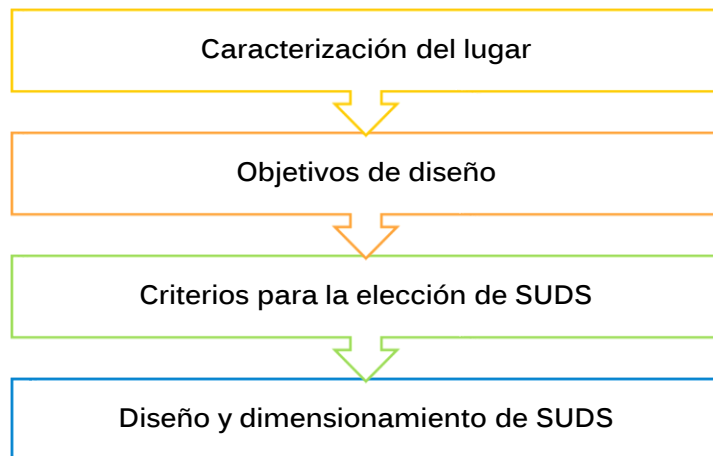


Figura 47: Proceso de diseño para la incorporación de SUDS en los proyectos.

3.1. Caracterización del lugar

Una de las principales variables a tener en cuenta para el diseño de SUDS, es el lugar como tal, y por ello es importante conocer ciertas características que son específicas de la zona en la que ha de implantarse el sistema que finalmente se acabe construyendo.

Entre estas características destacan: la topografía de la zona, el tipo de suelo existente y su posible contaminación, la pluviometría local, la hidrología existente la zona, el medio receptor o el área impermeable de la cuenca.

3.1.1. Topografía

La topografía es un factor clave para conocer los patrones naturales de drenaje. Para cada caso en particular, es recomendable realizar un levantamiento topográfico de la zona de influencia, que permita realizar un Modelo Digital del Terreno (MDT). En caso de no disponer de esta información, alternativamente se podría hacer uso de las bases cartográficas y de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) disponibles en el [Centro de Descargas](#) del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Como recomendación general, los SUDS se deben implementar en zonas con pendientes suaves, para conducir la escorrentía a velocidades manejables, dando lugar así a posibles mecanismos de filtración e infiltración. En zonas planas, la gestión en origen de las escorrentías evitará gastos de bombeo innecesarios.

Cuando las pendientes son muy altas, para evitar la posible erosión del terreno o arrastre de sedimentos, se recomienda el uso de SUDS que dispongan de elementos transversales que frenen el flujo y de disipadores de energía.

3.1.2. Geología, Geotecnia e Hidrogeología

El conocimiento de la geología, geotecnia e hidrogeología local también constituye una pieza fundamental para determinar si la infiltración al terreno sería posible.

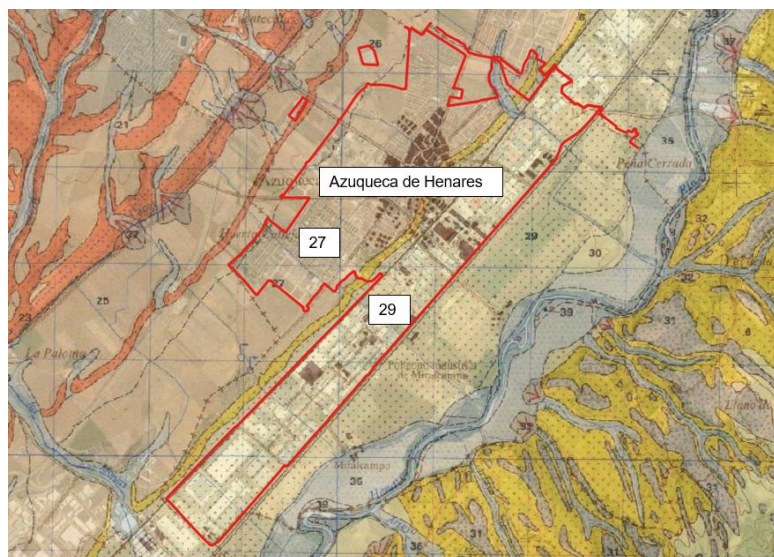


Figura 48: Mapa geológico local del municipio de Azuqueca de Henares. Fuente: IGME (adaptada del Instituto Geológico y Minero de España – 2ª Serie Hoja 535 (20-21) Algete).

A grandes rasgos, el municipio de Azuqueca de Henares se encuentra entre dos unidades cartográficas (27 y 29), como se puede evidenciar en la Figura 48; en donde ambas unidades disponen de la misma descripción: “Gravas y cantos poligénicos con arenas, arcillas arenosas, pseudomicelios, nódulos de carbonatos y costras calizas”. (IGME, 1983)

De entre los diferentes estudios geotécnicos disponibles, realizados dentro del municipio, se han seleccionado los que se muestran en la Figura 49. Éstos indican la existencia de un perfil geológico muy similar a lo largo del

término municipal (Figura 50), donde generalmente se encuentran los siguientes niveles:

- Nivel A – Cobertura vegetal y/o capa de construcción.
- Nivel B – Arenas limo-arcillosas.
- Nivel C – Gravas con arenas y/o arcillas. En este nivel normalmente se detectan los indicios del nivel freático a profundidades variables.
- Nivel D – Arcillas.

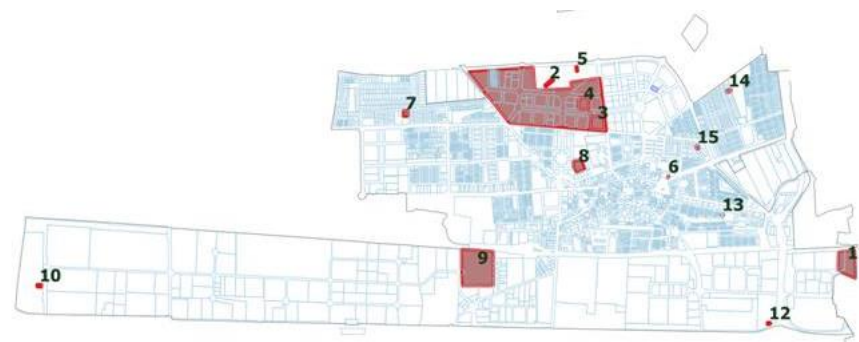


Figura 49: Localización de los estudios geotécnicos seleccionados.

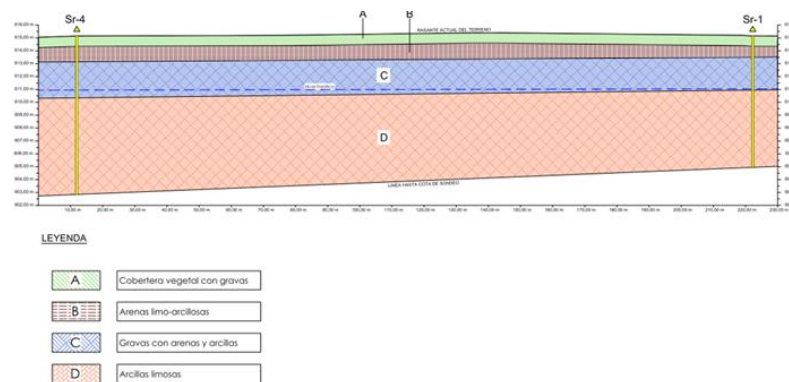


Figura 50: Perfil estratigráfico de ejemplo extraído de uno de los estudios geotécnicos seleccionados. Fuente: Estudio geotécnico Parcela c/Electrónica, LACECON (2021).

Estos estudios indican la presencia de una capa de gravas relativamente somera a lo largo del municipio, y la presencia del nivel freático entre 2 m y 5 m de profundidad. Todo ello, permite la recomendación, con carácter general, de priorizar la utilización de SUDS de infiltración en los proyectos de nueva urbanización, de intervención en la ciudad existente, y de regeneración urbana que se desarrollen dentro del municipio.

Sin embargo, cabe remarcar que cada desarrollo en particular necesitará realizar un estudio hidrogeológico del ámbito de estudio el cual deberá determinar/confirmar, entre otros, la profundidad, espesor y permeabilidad de la capa más permeable o en la que se pretender infiltrar, así como la profundidad a la que se encuentra el nivel freático en la zona de actuación.

Como norma general, para considerar la infiltración al terreno, la permeabilidad de esta capa debería ser mayor a 10^{-6} m/s y la profundidad del nivel freático mayor a 1 m desde la base del SUDS.

Para caracterizar la permeabilidad del suelo en la fase de anteproyecto es posible utilizar los valores que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 4: Permeabilidades asociadas a distintos materiales según Código Técnico de la Edificación.

Fuente: CTE (2008).

Tipo de suelo	Permeabilidad (m/s)
Grava limpia	$>10^{-2}$
Arena limpia o mezcla de grava y arena limpia	$10^{-2}-10^{-5}$
Arena fina, limo, mezcla de arenas, mezcla de limos y arcillas	$10^{-5}-10^{-9}$
Arcillas	$<10^{-9}$

Estos valores de permeabilidad procedentes de la bibliografía solo deben utilizarse para prediseños y estudios de viabilidad, y adicionalmente se recomienda tomar un factor de seguridad (FS) de 10, teniendo así:

$$K_{inicial} = K_{tabla} / FS$$

Dicho esto, cabe recalcar que cualquier proyecto que presente una estrategia de drenaje basada en la infiltración deberá estar apoyado por ensayos de permeabilidad locales, siendo los ensayos de permeabilidad en zanja los que mejor reproducen las condiciones que se darán en los SUDS. Por consiguiente, se recomienda aplicar el **Ensayo de permeabilidad en zanja (BRE Digest 365 Soakaway Design)**. Este ensayo consiste en excavar una zanja de dimensiones conocidas, la cual se llena de agua y se miden los tiempos del descenso de nivel de agua en la zanja, y partir de los mismos se estima el valor de la permeabilidad del terreno en ese punto de estudio.

$$k = \frac{V_{p75-25}}{a_{p50} * t_{p75-25}}$$

Donde:

k : Permeabilidad del terreno ensayado (m/s).

V_{p75-25} : Volumen de almacenamiento entre el 75 % y el 25 % de la profundidad de excavación.

a_{p50} : Superficie mojada del 50 % de la profundidad de la excavación que se llena de agua, incluyendo el agua de base (m^2).

t_{p75-25} : Tiempo de vaciado entre el 75 % al 25 % de la profundidad de la excavación que se llena de agua (s).

El ensayo se debe repetir tres veces en cada zanja y como norma general se deberá coger el valor de permeabilidad más desfavorable en cada localización de ensayo. Como criterio de seguridad adicional, al valor de permeabilidad obtenido en campo se le aplicará un factor de seguridad que tenga en cuenta la posible aminoración de la velocidad de infiltración al terreno, siendo habitual aplicar factores superiores a 1,5. De este modo, el valor de la permeabilidad para el proyecto se obtendrá como:

$$K_{proyecto} = K_{ensayo} / FS$$

Para información más detallada sobre cómo realizar este ensayo, se recomienda revisar el [Anexo nº2](#) de la *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Públicos* del Ayuntamiento de Madrid.

Por último, es importante la detección de la presencia de suelos contaminados en el ámbito de estudio, ya que favorecer la infiltración podría originar la contaminación de los acuíferos. En caso afirmativo, es posible que exista la necesidad de retirar estos suelos contaminados o utilizar otros tipos de SUDS que no favorezcan la infiltración.

3.1.3. Pluviometría

El conocimiento de la pluviometría local constituye una pieza fundamental para poder optimizar los diseños de redes de drenaje y SUDS. Por consiguiente, se ha llevado a cabo un estudio pluviométrico con los datos diarios de lluvia, proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), de las estaciones más cercanas a Azuqueca de Henares.

En este apartado se presentan los parámetros pluviométricos a utilizar para el diseño de sistemas de drenaje y SUDS en el término municipal de Azuqueca de Henares.

3.1.3.1. Percentiles volumétricos

En el diseño de SUDS, es habitual emplear criterios volumétricos para realizar un diseño preliminar empleando los percentiles volumétricos de precipitación. Estos percentiles establecen un umbral de precipitación que no es superado por un determinado porcentaje de los días lluviosos de un año. Por ejemplo, el V_{80} define un volumen de precipitación tal que, por promedio estadístico, no es superado en el 80 % de los días lluviosos de un año tipo.

El objetivo de la utilización de estos valores para el dimensionamiento de SUDS es que los eventos frecuentes sean gestionados completamente por el sistema de SUDS, asegurando de este modo una adecuada reducción de escorrentía, tratamiento, etc.

Los percentiles volumétricos de diseño se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Percentiles volumétricos de diseño.

Percentil V_x	P (mm)
98	28
95	20
90	15
85	13
80	11
60	6

3.1.3.2. Valores de diseño en caso de eventos extremales

A partir de los datos diarios de lluvia proporcionados por la AEMET se ha obtenido la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) que deberá emplearse para el diseño de los sistemas de drenaje y SUDS en condiciones extremales.

Sin embargo, cabe resaltar que el Cambio Climático está afectando al régimen pluviométrico mundial, provocando que los episodios extremos de lluvias sean cada vez más intensos y frecuentes. Es por ello que, cada vez hay más publicaciones que cuestionan la validez de los estudios pluviométricos basados en series históricas y proponen la aplicación de factores correctores que permitan representar escenarios futuros en el actual contexto de cambio. No obstante, se trata de una temática de reciente estudio y que todavía no cuenta con una metodología definida para su consideración a nivel nacional.

Con todo ello, se deberá emplear un factor de corrección por Cambio Climático (CC) que se aplicará sobre la curva IDF como se muestra en la Tabla 6. Cabe señalar que la corrección por CC, a aplicar en Azuqueca de Henares, es del 12% para el período de retorno de 25 años y del 20% para el período de retorno de 100 años y se ha definido en base a la información disponible en el informe del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) *Impacto del Cambio Climático en las Precipitaciones Máximas en España* (2021).

Los diseños deberán comprobarse empleando lluvias rectangulares para todas las diferentes duraciones consideradas. Los hietogramas se obtendrán a partir de las intensidades de la curva IDF, siendo esta uniforme para toda la duración del evento.

Tabla 6: Intensidad de lluvia para diferentes duraciones de tormenta y períodos de retorno.

t (min)	T2	T25	T25+CC	T100	T100+CC
	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)	I (mm/h)
10	34,0	66,8	74,8	86,7	104,1
15	27,8	54,6	61,2	70,9	85,0
20	23,9	47,1	52,7	61,1	73,3
30	19,3	37,9	42,5	49,2	59,1
60	13,1	25,7	28,8	33,3	40,0
90	10,3	20,2	22,6	26,2	31,4
120	8,6	16,9	18,9	21,9	26,3
180	6,6	13,0	14,6	16,9	20,3
360	4,2	8,2	9,2	10,6	12,7
720	2,5	5,0	5,6	6,4	7,7
1440	1,5	2,9	3,2	3,8	4,5

3.1.4. Hidrología de la zona

Conocer la hidrología de un lugar es esencial para poder determinar las cuencas drenantes, identificar los puntos de vertido y conocer si existen zonas con riesgo de inundación, establecidas en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). En caso de que exista riesgo de inundación en el ámbito de trabajo, los SUDS deberán diseñarse teniendo en cuenta factores tales como la reducción de su volumen de almacenamiento, la presencia de un nivel freático elevado o posibles problemas de erosión derivados del flujo superficial.

La Figura 51 muestra el mapa de peligrosidad por inundación fluvial en Azuqueca de Henares para el periodo de retorno de 100 años, donde se puede apreciar el transcurso del río Henares por el lado sureste de

Azuqueca de Henares, y el Arroyo de las Mochas y el Arroyo Valmoros que recorren la zona noreste del municipio.

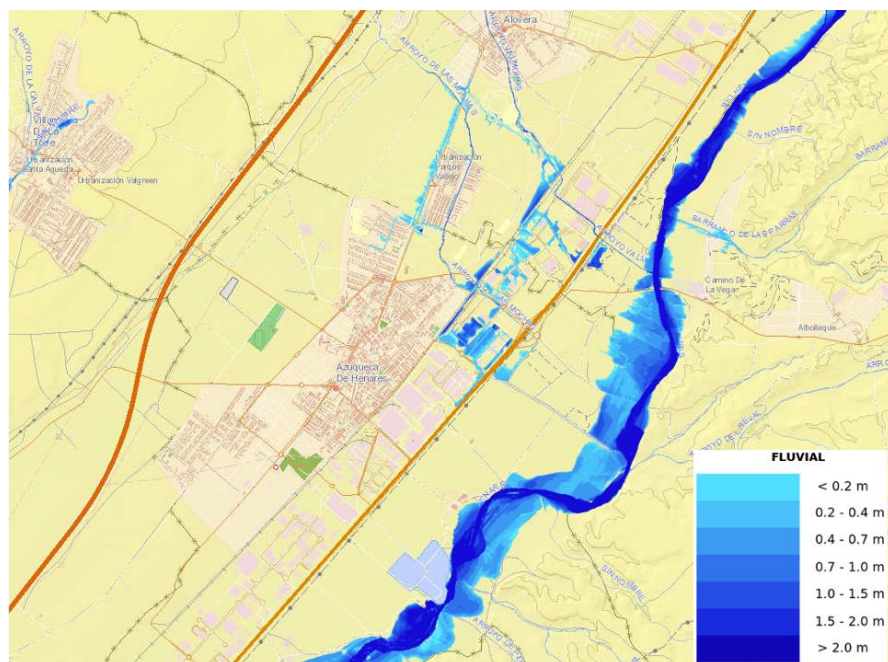


Figura 51: Mapa de peligrosidad por inundación fluvial $T = 100$ años. Fuente: SNCZI.

3.1.5. Medio receptor

El medio receptor, al que se desea verter, es otro elemento fundamental a la hora de definir la estrategia de drenaje de una zona de actuación, ya que influirá de manera decisiva en los requisitos de reducción de caudales, volúmenes o tratamiento de la escorrentía.

Como norma general, el diseño de SUDS se deberá hacer teniendo muy presente y respetando la siguiente jerarquía de gestión de pluviales, que se muestra en la Figura 52.



Figura 52: Jerarquía de gestión de la escorrentía en Azuqueca de Henares.

El posible **aprovechamiento** de pluviales, para usos no potables, siempre primará a la hora de definir la estrategia de drenaje y los SUDS a seleccionar. Asimismo, siempre que sea posible, se deberán elegir sistemas SUDS que permitan la **infiltración** al terreno, lo cual favorecerá la recarga de los acuíferos. La permeabilidad del suelo o la altura del nivel freático en la zona de actuación son algunos de los factores que más condicionarán la posibilidad de infiltración; por lo tanto, cualquier estrategia de drenaje que proponga la infiltración deberá estar apoyada por estudios hidrogeológicos del ámbito de trabajo, los cuales deberán determinar la caracterización geológica del suelo y la permeabilidad del terreno de acuerdo con la metodología BRE Digest 365 Soakaway Design, como se indica en el apartado 3.1.2 de esta guía. Tanto el aprovechamiento de pluviales como la infiltración al terreno ayudarán al objetivo de reducción de volúmenes de escorrentía.

Si la infiltración al terreno no fuese posible, la siguiente opción preferida sería la de conducir y descargar la escorrentía al **cauce público** más cercano de manera controlada y con la calidad del agua adecuada.

En caso de que no existiese un cauce público en las cercanías de la zona de actuación, se buscaría la descarga controlada, en cuanto a cantidad y calidad, a la **red de pluviales municipal**.

Como última opción, se contemplaría la descarga laminada de escorrentía a la **red unitaria municipal**.

3.1.6. Área impermeable de la cuenca

Por último, para un correcto dimensionamiento de los SUDS, es fundamental definir las características principales de la cuenca drenante (superficie, longitud, pendiente, etc.).

No obstante, de manera simplificada, se puede calcular el área impermeable equivalente de la cuenca que se va a gestionar utilizando la siguiente ecuación:

$$A_{IMPERMEABLE} = \sum_{i=1}^n C_i * A_i$$

Donde,

A_i : Área a drenar (m^2).

C_i : Coeficiente de escorrentía superficial.

A falta de valores más específicos de coeficiente de escorrentía superficial urbana (C) para la zona de actuación, se recomienda el uso de los valores dados en la Tabla 7.

Tabla 7: Valores teóricos de coeficientes de escorrentías.

Zona	C
Viales y aceras	0,95
Cubiertas	1,00
Pavimento permeable	0,70
Zonas verdes	0,30

3.2. Objetivos de diseño

A la hora de diseñar SUDS, es importante tener en cuenta el objetivo principal de su implementación, que es crear un sistema de drenaje urbano resiliente, que se integre de una manera eficiente en el paisaje de las ciudades y que proteja al medio receptor entregando caudales laminados y de mejor calidad.

Los SUDS se deben diseñar teniendo muy presente los cuatro pilares básicos en los que se fundamentan (Figura 6); por ello, deberán diseñarse para gestionar la escorrentía en origen, tanto en cantidad como en calidad, y para que al mismo tiempo incluyan beneficios que ayuden a crear entornos más amigables para la sociedad y el ecosistema.

3.2.1. Objetivos según el tipo de desarrollo

Los SUDS persiguen gestionar la escorrentía en origen, replicando el ciclo hidrológico existente y fomentando las zonas permeables y vegetadas en los desarrollos urbanos. La versatilidad de uso que tienen los SUDS permite que este tipo de sistemas se integren tanto en proyectos de regeneración urbana como en nuevos desarrollos. Por ello, para definir los objetivos a lograr a la hora de incorporar SUDS en un área, es importante tener claro a que tipo de proyecto nos enfrentamos como diseñadores.

Por un lado, en proyectos de regeneración urbana, el objetivo principal a la hora de incluir SUDS debe ser aliviar y mejorar el funcionamiento del sistema de drenaje existente. Para ello es fundamental gestionar la escorrentía en origen, reduciendo las zonas impermeables, disminuyendo la cantidad de agua que entra a las redes de drenaje existentes y mejorando la calidad de la escorrentía que se vierte al medio receptor.

Por otro lado, en nuevos desarrollos, los diseños deben estar enfocados al uso de SbN, permitiendo desde un inicio reproducir el ciclo natural del

agua, identificando las zonas de acumulación de escorrentía, zonas de flujo preferente y los puntos infiltración o de vertido al medio receptor.

3.2.2. Objetivos para el control de la cantidad de escorrentía

Uno de los objetivos principales del diseño de SUDS debe ser la gestión de la cantidad de la escorrentía, tanto en volumen como en caudal

3.2.2.1. Reducción de escorrentía

Se propone que, en aquellos emplazamientos donde la infiltración de escorrentía al terreno sea posible, se infiltre en origen un volumen de escorrentía equivalente al percentil V_{80} .

Los parques y jardines suelen presentar mejores espacios de oportunidad para la integración de SUDS, por lo tanto, en estos casos se buscará incrementar este requisito de infiltración hasta un volumen equivalente al V_{95} .

En cambio, en las pequeñas actuaciones de regeneración en áreas densamente urbanizadas puede ser difícil alcanzar un volumen de infiltración importante. Por consiguiente, en estos casos específicos será posible flexibilizar este requisito de infiltración hasta un volumen equivalente al V_{60} .

Tabla 8: Volumen de infiltración según tipo de proyecto.

Tipo de proyecto	Percentil V_x	V (mm)
Parques y jardines	V_{95}	20
Nuevos desarrollos y desarrollos de regeneración urbana	V_{80}	11
Pequeños desarrollos de regeneración urbana en zonas densamente urbanizadas	V_{60}	6

3.2.2.2. Control de caudales

En el caso de pequeños desarrollos de regeneración urbana, menores a 2 ha (y excepcionalmente, cuando así lo determine expresamente y de manera justificada el Ayuntamiento), donde se mejoren las condiciones existentes, se aceptará el dimensionamiento de los SUDS mediante el método los percentiles volumétricos, como se describe más adelante en el apartado 3.4.1., utilizando los valores de la Tabla 8. De esta forma, se consigue que los eventos frecuentes sean gestionados completamente por el sistema de SUDS.

Sin embargo, en nuevos desarrollos, y desarrollos de regeneración urbana de mayor tamaño, los SUDS, además, deberán dimensionarse para disponer de un volumen suficiente que permita limitar los caudales de escorrentía vertidos fuera del ámbito de actuación. Para ello se deberá recurrir al uso de herramientas de modelización hidráulica específicas.

Los vertidos de escorrentía urbana fuera del ámbito se deberán limitar al caudal natural existente en el ámbito, previamente al desarrollo urbano,

para el período de retorno de 25 años (sin corrección por Cambio Climático). De este modo, se estaría evitando que la urbanización del territorio, y la impermeabilización del terreno que trae asociada, pueda incrementar el riesgo de inundación de enclaves situados aguas abajo del ámbito objeto de estudio.

Por lo tanto, el caudal pico generado en el punto de vertido, en su estado post-urbanizado para el período de retorno 25 años, incluyendo una mayoración de las lluvias para recoger los efectos del Cambio Climático, deberá ser menor o igual que en su estado pre-urbanizado para la tormenta crítica para el período de retorno 25 años (sin corrección por Cambio Climático):

$$Q_{max, POST} (T25 + CC) \leq Q_{max, PRE} (T25)$$

Asimismo, cuando la descarga se produzca a un cauce público o a una red de pluviales separativa, además de comprobar que el caudal pico en el punto de vertido no exceda el caudal natural durante episodios de lluvias más extremas, también deberá hacerse esta comprobación para lluvias más frecuentes. De este modo, el caudal pico generado en el punto de vertido, en su estado post-urbanizado para el período de retorno 2 años, deberá ser menor o igual que en su estado pre-urbanizado para la tormenta crítica para el período de retorno 2 años:

$$Q_{max, POST} (T2) \leq Q_{max, PRE} (T2)$$

En cualquier caso, se deberán tener en cuenta posibles restricciones de vertido más restrictivas dispuestas por otras autoridades competentes, como podría ser la CHT.

3.2.2.3. Gestión de eventos extremos

Los sistemas de drenaje se deberán diseñar para que sean capaces de gestionar los eventos de lluvia correspondientes para un periodo de retorno de 25 años + CC (con corrección por Cambio Climático).

Además, en grandes desarrollos urbanos con una superficie mayor a 20 ha, ya sean nuevos proyectos o de regeneración urbana se exigirá que la inundación generada correspondiente para un periodo de retorno de 100 años + CC, incluyendo una mayoración de las lluvias para recoger los efectos del Cambio Climático, se gestione íntegramente dentro del ámbito de desarrollo sin provocar afección a terceros.

3.2.3. Objetivos para el control de calidad de la escorrentía

La gestión de la calidad de la escorrentía es otro de los pilares principales del diseño de SUDS. La escorrentía procedente de zonas urbanizadas puede presentar una carga contaminante significativa derivada del arrastre de sedimentos y/o contaminantes presentes en las superficies impermeables. Este fenómeno es más acusado en los primeros milímetros de precipitación, especialmente tras periodos secos, en lo que se denomina primer lavado o *first flush*.

Para asegurar un adecuado tratamiento de las escorrentías, además de seleccionar la tipología de SUDS más conveniente, debe asegurarse un volumen de retención suficiente para poder almacenar y tratar íntegramente los episodios lluviosos más frecuentes, y proporcionar tratamiento a las primeras aguas de todos los episodios lluviosos, que son las que suelen presentar una carga contaminante más elevada.

De acuerdo con la filosofía de la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, y las recomendaciones que están marcando algunas confederaciones en materia de calidad de aguas, se deberá dimensionar

los SUDS para que estos tengan capacidad de tratar íntegramente las escorrentías generadas por el percentil pluviométrico V_{80} (11 mm).

En aquellos casos donde no sea posible el tratamiento de la escorrentía mediante SUDS, se deberá utilizar elementos de tratamiento auxiliares como los separadores hidrodinámicos o los filtros compactos.

3.2.4. Objetivos para el desarrollo de la biodiversidad y uso ciudadano

Como se ha ido enfatizando a lo largo esta guía, uno de los objetivos fundamentales de la implementación de SUDS es crear un sistema de drenaje que, además de gestionar la escorrentía en cuanto a cantidad y calidad, también sea capaz de integrarse eficientemente en el paisaje urbano, proporcionando espacios multifuncionales, más atractivos y amigables para los ciudadanos y el ecosistema.

Es por ello que, a la hora de seleccionar SUDS, se debe favorecer el uso de aquellos que sean capaces de integrar los cuatro pilares sobre los que se fundamenta la gestión sostenible de las aguas pluviales (apartado 2.1). Por consiguiente, siempre será preferible el uso de aquellos SUDS basados en infraestructura verde, que sean capaces de incorporarse e integrarse correctamente en el paisaje urbano, dentro de las ciudades, para así favorecer el hábitat y permitir el movimiento de especies.

Además, se debe impulsar la selección de SUDS que sean capaces de crear espacios multifuncionales, dedicados íntegramente a la gestión de pluviales durante eventos de lluvia, pero que tengan una utilidad ciudadana el resto del tiempo.

Un caso tan particular como útil sería la balsa de detención implementada en la ciudad de Nantes (Figura 53), en Francia, que durante la mayoría del

tiempo se utiliza como campo de fútbol con forma de *croissant*, pero que durante época de lluvias sirve para aliviar las redes de drenaje de la ciudad.



Figura 53: SUDS verde y multifuncional en la ciudad de Nantes (Francia).

Fuente: Le Voyage à Nantes (<https://www.levoyageanantes.fr/es/obras-de-arte/teydball/>).

3.3. Criterios para la elección de SUDS

A la hora de seleccionar las técnicas SUDS a utilizar en cada proyecto, es importante tener claro que soluciones se adaptan mejor al espacio disponible, sus principales funciones hidrológicas y su potencial para tratar la escorrentía.

3.3.1. Tipos de parcelas urbanas

Uno de los condicionantes más importantes a la hora de incorporar SUDS es el espacio del que se dispone, ya que ciertos sistemas requerirán un área más extensa para su implementación, mientras otros sistemas se integran con mayor facilidad a la tipología edificatoria existente.

Es por ello importante reconocer la diversidad de los espacios urbanos, y, por lo tanto, las soluciones deberán adaptarse a los espacios de oportunidad disponibles.

Con esta premisa se desprende la necesidad de conocer y aprovechar las oportunidades de implantación, considerando que, además de gestionar la escorrentía en cantidad y calidad, deben ser funcionales y atractivos para la ciudadanía.

Por consiguiente, es importante tener bien diferenciadas las distintas tipologías edificatorias a las que nos enfrentamos, ya que nos facilitará la elección del sistema SUDS más adecuado según el tipo de suelo que se disponga, el espacio disponible, el nivel de tratamiento que debe recibir la escorrentía, etc.

Actualmente, en Azuqueca de Henares, existe una división urbana según el uso de suelo, como muestra en la Figura 54.

De acuerdo con los diferentes tipos de parcelas urbanas que podemos encontrar en Azuqueca de Henares, en la Tabla 9 se hace una recomendación de los SUDS más adecuados a utilizar, donde:

R, uso recomendable.

A, uso adecuado.

P, posible uso.

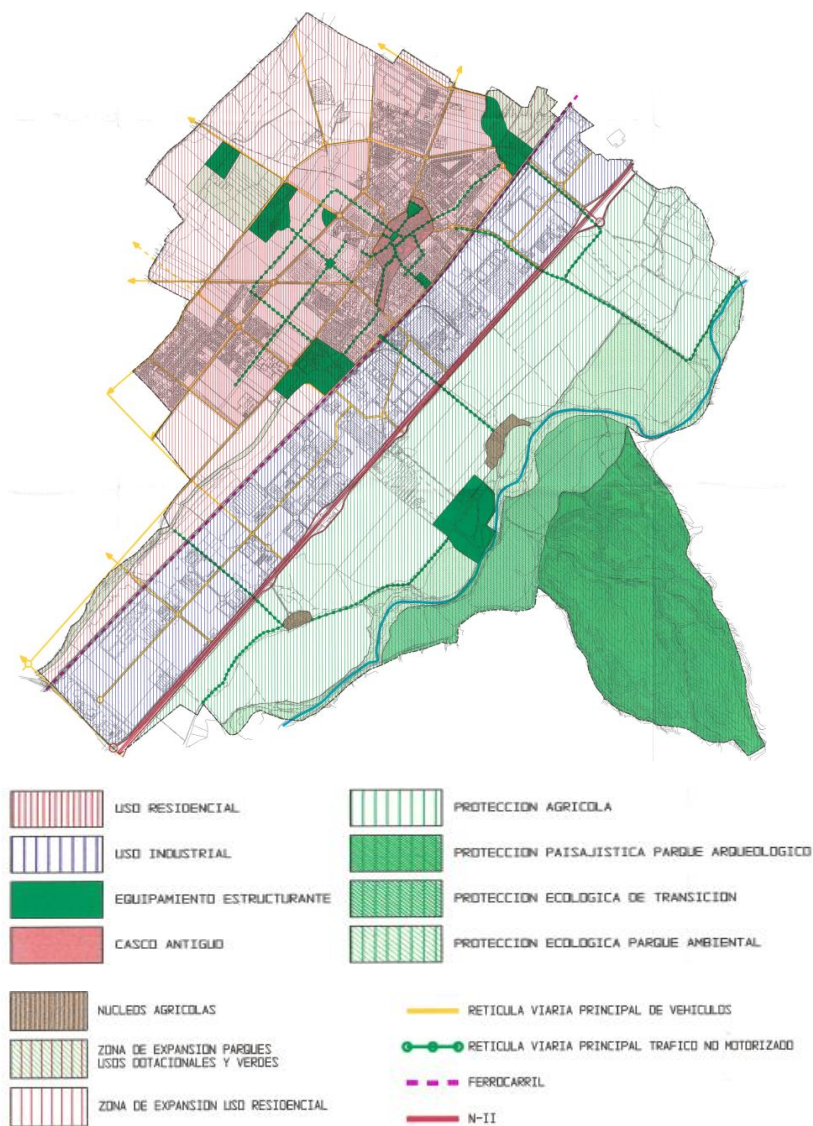


Figura 54: Tipo de unidad urbana en el Municipio de Azuqueca de Henares.

Tabla 9: Relación entre tipologías edificatorias y tipos de SUDS.

Tipología Urbana Tipo SUDS	Urbanización densa	Edificación abierta	Casas unifamiliares	Centros comerciales y sector terciario	Zonas Industriales	Parques y zonas verdes	Red viaria, infraestructura lineal	Aparcamientos
Aljibes	P	P	R	R	A	-	-	-
Cubierta vegetada	P	R	A	R	P	-	-	-
Alcorques estructurales	R	A	P	A	P	-	A	P
Cuneta vegetada	-	P	P	P	A	R	R	P
Drenes filtrantes	P	P	P	P	P	P	A	A
Zanja/pozo de infiltración	P	P	A	P	P	P	P	R
Parterre inundable	A	R	R	P	R	A	R	A
Pavimento permeable	R	A	P	P	P	P	P	R
Franja filtrante	-	-	-	-	P	P	P	P
Depósito reticular	A	P	P	A	R	P	P	P
Balsas de detención y/o infiltración	-	P	-	P	A	R	-	P
Humedales artificiales y estanques	-	-	-	P	P	A	-	-

3.3.2. Función de los SUDS

Como ya se ha mencionado anteriormente, los SUDS tratan de reproducir el ciclo natural del agua y, por lo tanto, para una selección adecuada del tipo de SUDS a utilizar, es importante conocer las funciones hidrológicas que cada tipología cumple (Tabla 10).

Las características de los SUDS permiten que estos tipos de sistemas puedan, además, cumplir con otras funciones adicionales a su función principal.

Tabla 10: Función de los SUDS, según su tipología. Adaptación de *The SuDS Manual*, CIRIA

Tipología de SUDS	Función de los SUDS				
	Filtración	Detención	Tratamiento	Retención	Infiltración
Aljibes		S		P	
Cubiertas vegetadas		S		P	
Parterres inundables			P		S
Balsas de detención e infiltración		P			S
Cunetas vegetadas			P		S
Alcorques estructurales		S			P
Pavimentos permeables	P				S
Drenes filtrantes	P	S			
Franjas filtrantes	P		S		
Zanjas y pozos de infiltración	S				P
Depósitos reticulares		S			P
Humedales artificiales y estanques		S	P		
P – Función Principal					
S – Función Secundaria					

3.3.3. Tratamiento de la escorrentía

El tratamiento de la escorrentía mediante SUDS se lleva a cabo a través de procesos físicos y biológicos como la filtración, la sedimentación o la biorremediación. En este sentido, es fundamental seleccionar y dimensionar las técnicas SUDS considerando que no todos los dispositivos tienen el mismo potencial de tratamiento de las escorrentías, ni toda la escorrentía tiene la misma contaminación. Por ejemplo, la escorrentía proveniente de las zonas verdes o aceras estará más limpia que la de las zonas con tránsito de vehículos.

Por consiguiente, en el diseño de SUDS se debe tener en cuenta el nivel de contaminación de la cuenca y el potencial de tratamiento de cada tipología de SUDS.

Para ello, a continuación, se describe el **Método de los índices** propuesto en *The SuDS Manual* (CIRIA, 2015) el cual determina el riesgo de contaminación de la cuenca en función del uso del suelo (Tabla 12) e indica los índices de mitigación que proporcionaría cada tipología de SUDS (Tabla 11).

Tabla 11: Índice de mitigación de contaminación por tipología SUDS. Fuente: Guía básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València (2021).

Tipología de SUDS	Sólidos suspendidos totales (SST)	Metales	Hidrocarburos
Cubiertas vegetadas	0,4	0,4	0,4
Parterres inundables (Jardín de lluvia)	0,6	0,5	0,6
Parterres inundables (Zona de biorretención)	0,8	0,8	0,8
Balsas de detención	0,5	0,5	0,6
Balsas de infiltración (**)	0,6	0,5	0,6
Cunetas vegetadas	0,5	0,6	0,6
Alcorques estructurales	0,6	0,5	0,6
Pavimentos permeables	0,7	0,6	0,7
Drenes filtrantes	0,5***	0,4	0,4
Zanjas y pozos de infiltración	0,5***	0,4	0,4
Depósitos reticulares	*	*	*
Humedales artificiales y estanques	0,8	0,8	0,8

* Por sí mismos no ofrecen tratamiento, dependen del sistema complementario en la entrada.

** Considerando una capa de vegetación densa sobre un sustrato de 300 mm de profundidad. En caso de no disponer de vegetación, el rendimiento se reduce a 0,4-0,3-0,3 respectivamente.

*** Considerando la existencia de una capa superficial de geotextil.

Tabla 12: Índice de peligrosidad de contaminación. Fuente: Guía básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València (2021).

Uso del suelo	Nivel de riesgo de contaminación	Sólidos suspendidos totales	Metales	Hidrocarburos
Tejados o cubiertas en una atmósfera limpia	Bajo	0,2	0,2	0,05
Tejados o cubiertas en una atmósfera contaminada (Industrial y Terciario)	Medio	0,3	0,2 – 0,8	0,05
Caminos o viales con intensidades de tráfico muy débiles	Bajo	0,5	0,4	0,4
Pistas deportivas				
Zonas impermeables de uso lúdico				
Zonas de aparcamiento residenciales				
Espacios comunes de zonas residenciales de menos de 50 viviendas				
Zonas de estacionamiento con poca renovación				
Mercados al aire libre	Medio	0,7	0,6	0,7
Zonas comerciales peatonales				
Zonas de estacionamiento con renovación media				
Zonas residenciales con poco tráfico				
Zonas industriales sin contaminantes peligrosos				
Viales de capacidad media y baja				
Aeródromos de baja intensidad de tráfico				
Áreas agropecuarias sin uso de sustancias contaminantes				
Zonas peatonales o industriales de alta densidad de tráfico	Alto	0,8	0,8	0,9
Zonas de estacionamiento de alta renovación				
Áreas con alto tráfico de vehículos				
Aeródromos con alta intensidad de tráfico				
Áreas industriales de acopio que manejen sustancias contaminantes				
Áreas vinculadas a EDARs o de tratamiento de RSU				
Áreas de actividad agropecuaria con uso de sustancias contaminantes				

Para garantizar que los SUDS empleados alcancen los niveles adecuados de tratamiento para permitir su posterior descarga al medio y/o infiltración al subsuelo, se deben asegurar que el índice de mitigación de la técnica SUDS propuesta sea mayor o igual al índice de peligrosidad de contaminación de la cuenca.

$$\text{Índice de mitigación de contaminación por tipología de SUDS} \geq \text{Índice de peligrosidad de contaminación}$$

Cuando no se cumpla este criterio con una única técnica SUDS, existe la posibilidad de implementar un tren de SUDS, conectando varios SUDS en serie para así incrementar el nivel de mitigación de contaminación, el cual se estimaría de la siguiente manera:

$$\text{Índice de mitigación de contaminación de la cadena de SUDS} = \text{Índice de mitigación de contaminación del SUDS 1} + 0,5 \times \text{Índice de mitigación de contaminación del SUDS 2}$$

3.4. Diseño y dimensionamiento de SUDS

Una vez se han analizado las características del lugar, se han definido los objetivos de diseño y se han seleccionado los SUDS a incorporar en la zona de actuación, el último paso sería proceder al diseño y dimensionamiento del sistema SUDS seleccionado. La Figura 55 muestra, a modo de resumen, los pasos a seguir para este cometido.

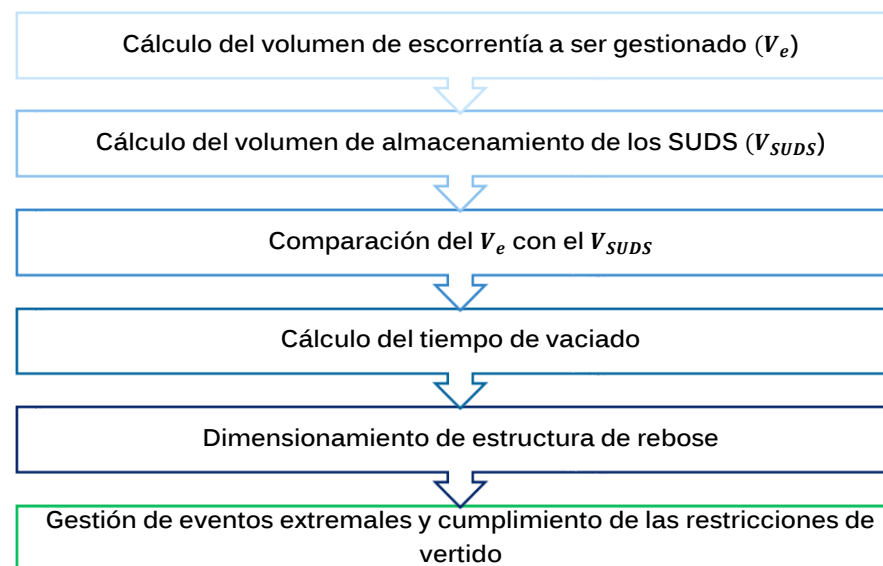


Figura 55: Pasos para el diseño de un sistema de drenaje con SUDS.

Cabe señalar que, como parte de esta guía, se ha desarrollado una herramienta cálculo para facilitar el dimensionamiento de los SUDS, la cual se puede encontrar en el siguiente [enlace](#).

3.4.1. Volumen de escorrentía a ser gestionado

Para conocer las medidas que tendrá cada elemento SUDS se debe primero determinar el volumen de escorrentía a gestionar, el cual se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$V_e = \frac{V_x}{1000} * A_{IMPERMEABLE}$$

Donde,

V_x : Percentil volumétrico (mm).

$A_{IMPERMEABLE}$: Área impermeable (m²).

3.4.2. Volumen de almacenamiento de los SUDS

A continuación, el volumen de almacenamiento de los SUDS se puede calcular mediante la expresión:

$$V_{SUDS} = \sum_{i=1}^n A_i * h_i * n_i$$

Donde,

A_i : Área de SUDS (m^2).

h_i : Altura de capa (m).

n_i : Porosidad.



Figura 56: Ejemplo de SUDS con capas de diferentes materiales.

El factor n de porosidad depende del material que compone cada capa de material propuesto, y como valores teóricos se pueden utilizar los indicados en la Tabla 13. Cuando el sistema consista únicamente en almacenamiento libre, el valor de porosidad será considerado 1.

Tabla 13: Valores de porosidad para materiales drenantes. Fuente: *The SuDS Manual*, CIRIA (2015).

Material	Porosidad (%)	n
Almacenamiento libre	100	1
Sistemas con geo celdas	90 – 95	0,90 - 0,95
Grava uniforme	30 – 40	0,30 – 0,40
Grava o arena graduada	20 – 30	0,20 – 0,30

Una vez determinados los dos volúmenes anteriormente descritos, se procede a verificar que el volumen de diseño dispone de la suficiente capacidad:

$$V_{SUDS} \geq V_e$$

En el caso de que esta condición no se cumpla, se deberá ir incrementando el V_{SUDS} , realizando cambios en su geometría.

3.4.3. Tiempo de vaciado

Posteriormente a la comprobación de capacidad de los SUDS, se determina el tiempo de vaciado del sistema.

Como normal general, se debe asegurar que los SUDS se vacíen, hasta la mitad de su capacidad, en 24 horas para así asegurar la gestión de un potencial segundo evento de lluvia consecutivo. Además, el vaciado completo de los SUDS no debería exceder las 72 horas para evitar la proliferación de malos olores y/o mosquitos.

3.4.3.1. Cuando haya infiltración

El tiempo de semivaciado, cuando haya posibilidad de infiltración, suponiendo que la haya tanto por la base como por los laterales de los SUDS, puede calcularse a través de la siguiente formula de *The SuDS Manual*.

$$t_{sv} = \frac{n * A_b}{k * P} * \log_e \left(\frac{h_{max} + \frac{A_b}{P}}{\frac{h_{max}}{2} + \frac{A_b}{P}} \right)$$

Donde,

t_{sv} : Tiempo de semivaciado (*horas*).

n : Porosidad.

A_b : Área de la base (m^2).

k : Coeficiente de permeabilidad (m/h).

P : Perímetro de la base (m).

h_{max} : Altura máxima de columna de agua desde la base de la infiltración (m).

Para la comprobación del vaciado completo de los SUDS de infiltración, se puede utilizar la siguiente formula simplificada, adaptada de *The SuDS Manual*, donde únicamente se considera la infiltración por la base.

$$t_v = \frac{n * h_{max}}{k}$$

Donde,

t_v : Tiempo de vaciado (*horas*).

n : Porosidad.

k : Coeficiente de permeabilidad (m/h).

3.4.3.2. Cuando se vacíe mediante un conducto a la red de drenaje

Cuando no se produzca infiltración al terreno y se opte por conducir el caudal captado hacia la red de drenaje, el tiempo de vaciado se podrá calcular utilizando la siguiente ecuación de desagüe por orificio:

$$t_v = \sqrt{\frac{2h}{9.81} \left(\frac{A_s^2}{(A_o * C_d)^2} \right) - 1}$$

Donde,

t_v : Tiempo de vaciado (*horas*).

A_o : Área de la sección transversal interna del orificio (m^2).

A_s : Área n planta de la toma de almacenamiento de SUDS (m^2).

C_d : Coeficiente de descarga (m). Un coeficiente habitual a utilizar es 0,6.

h : Distancia desde la superficie de la lámina de agua hasta el centro del orificio (m).

En caso de que el tiempo de vaciado no cumpla con las 72 horas recomendadas, se podrían considerar los siguientes cambios en el diseño, como se indica en la *Guía Tècnica per al disseny de Sistemes de Drenatge Urbà Sostenible SUDS* del Ayuntamiento de Barcelona.:

- Incrementar la superficie del SUDS y disminuir la altura de las capas que componen el sistema.
- Cuando las condiciones lo permitan, se puede optar por la incorporación de sistemas de drenaje enterrados para gestionar el volumen de escorrentía que no se pueda infiltrar en el tiempo deseado.
- Seleccionar otro tipo de SUDS que se adapte mejor a las condiciones del terreno existente.

3.4.4. Dimensionamiento de la estructura de rebose

Los SUDS propuestos deberán garantizar una capacidad suficiente para gestionar íntegramente el volumen del V_x correspondiente, tanto en cantidad como en calidad. Pero, además, los SUDS deben de contar con aliviaderos o vertederos que ayuden a canalizar el exceso de lluvia de forma segura, evitando posibles inundaciones.

El cálculo del elemento de rebose deberá hacerse para que tengan una capacidad suficiente para trasegar los caudales asociados al período de retorno de 25 años + CC sin inundación, obteniéndose estos a partir de los parámetros pluviométricos presentados en el apartado 3.1.3.2.

Para pequeñas actuaciones (en base a lo indicado en el apartado 3.2.2.2), será suficiente con calcular la estructura de rebose utilizando el hietograma de periodo de retorno 25 años + CC, de duración de lluvia e intensidad indicadas en la Tabla 14, ya que eventos de menor duración (y mayor intensidad) producen un volumen de precipitación menor al almacenado en los SUDS (V_x requerido según Tabla 8) y en consecuencia no habría rebose.

Tabla 14: Duración e intensidad de lluvia a utilizar para el dimensionamiento de estructuras de rebose en pequeñas actuaciones.

V_x requerido	Duración lluvia (min)	Intensidad (T25+CC) (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)
V_{95} (20 mm)	30	42,5	21,2
V_{80} (11 mm)	10	74,8	12,5
V_{60} (6 mm)	10	74,8	12,5

El caudal pico de diseño se puede calcular mediante el Método Racional:

$$Q = C * i * A$$

Donde,

Q : Caudal (m^3/s).

C : Coeficiente de escorrentía superficial. A falta de valores específicos de coeficiente de escorrentía superficial, se pueden utilizar los valores de la Tabla 7.

i : intensidad de la lluvia (m/s).

A : Área de la cuenca (m^2).

A continuación, la estructura de rebose se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Q = C_v * b * H^{3/2}$$

Donde,

Q : Caudal (m^3/s).

C_v : Coeficiente de vertido (m), dependiente de la tipología de vertedero y como valores en bibliografía se muestran los siguientes valores.

- Vertederos de pared delgada ($e < 0,67H$): $C_v=1,7-1,9$.
- Vertederos de pared gruesa ($e > 0,67H$): $C_v=1,5-1,7$.

b : Ancho del vertedero (m).

H : Sobreelevación sobre el umbral de vertido (m).

Es importante señalar que, para aquellos proyectos de mayor envergadura, o cuando exista algún tipo de restricción de vertido, o bien cuando el sistema de drenaje concatene más de un elemento SUDS, deberá llevarse a cabo la modelización hidráulica del sistema propuesto para comprobar que el sistema es capaz de proporcionar el nivel de protección para el que se ha diseñado.

3.4.1. Gestión de eventos extremos y cumplimiento de las restricciones de vertido

Por último, una vez dimensionados los SUDS y los elementos de rebose, para aquellos proyectos de tamaño significativo donde se requiera el uso de herramientas de modelización hidráulica (en base a lo indicado en el apartado 3.2.2.2 y el apartado anterior), se deberá corroborar que los SUDS diseñados son capaces de gestionar también los eventos de lluvia extremos (apartado 3.2.2.3) y se comprobará que las aportaciones de escorrentía urbana no superan el caudal natural existente en el ámbito. Por

ello, se debe garantizar que la descarga hacia un cauce natural o sistema de drenaje público no supere los objetivos de control de caudales expuestos en el apartado 3.2.2.2 de esta guía.

A photograph showing a road with a red-paved shoulder and a grassy embankment. In the background, there is a forested hill and a tall electricity pylon. The sky is clear and blue.

4. Ejemplo de cálculo de SUDS

4.1. Introducción

En este apartado se detalla el proceso de diseño y dimensionamiento de un SUDS, tomando como ejemplo de actuación un área determinada en Azuqueca de Henares, que se ha identificado como una oportunidad para la implementación de SUDS.



Figura 57: Zona de actuación seleccionada para ejemplo de cálculo. Fuente: Google Maps.

Para este ejemplo teórico, la zona de actuación seleccionada es el Parque de la Quebradilla, donde actualmente se está redactando un proyecto de ampliación del parque y se propone la colocación de un SUDS en la parte más baja de éste.

Cabe señalar que, a pesar de que la zona de actuación es de un tamaño mayor de 2 ha, el dimensionamiento de SUDS propuesto se realiza únicamente mediante el método de los percentiles volumétricos. Esto es debido a que se trata de un caso desarrollado a efectos didácticos, y al referirse a un proyecto de regeneración urbana donde se mejorarían las

condiciones existentes en la zona de actuación. Aplicando este método se consigue que los eventos más frecuentes sean gestionados completamente por el SUDS propuesto.

No obstante, es importante recalcar que, en proyectos de esta envergadura y/o más complejos, donde se incluyan redes de drenaje y se deba proporcionar elementos de atenuación para gestionar eventos extremos, se deberá recurrir al uso de herramientas de modelización hidráulica para comprobar que el sistema propuesto es capaz de proporcionar el nivel de protección requerido en base a los criterios de diseño establecidos en esta guía.

4.2. Datos de Partida

Para este ejemplo se han considerado los siguientes datos de partida:

Tabla 15: Datos de partida ejemplo de diseño.

DATOS DE PARTIDA		
Topografía	Pendiente < 2,5	%
Geología y Geotecnia	Capa permeable somera (desde superficie hasta 1,5 m de profundidad)	-
Nivel freático	>2 m de profundidad	-
Cuenca drenante	Zonas verdes y espacio reservado para eventos municipales	-
Superficie total	3,404	ha
Superficie permeable	2,835	ha
Superficie impermeable	0,569	ha
Tipo de parcela	ZU-D Uso dotacional	-
Tipo de proyecto	Proyecto de regeneración urbana	-
Índice de peligrosidad de contaminación	Medio – Viario y aparcamiento Bajo – Zona verde	-
Medio receptor	Infiltración al terreno	-

En base a estos datos de partida, se ha seleccionado la incorporación de una balsa de infiltración que, además de proporcionar una solución alternativa a la gestión de pluviales de la zona, también ayudaría a reducir los caudales pico generados en la zona y los volúmenes aportados a la red de drenaje pública, mejoraría la calidad de la escorrentía generada y proporcionaría un espacio público más amigable y atractivo para los ciudadanos de Azuqueca de Henares.



Figura 58: Balsa de infiltración. Can Cortada (Barcelona).

Además, se propone que la balsa propuesta también gestione la escorrentía generada en el aparcamiento existente, que se encuentra situado en la zona noroeste del parque, y parte de la carretera principal, como se puede ver en la Figura 59. No obstante, el índice de mitigación de la balsa propuesta sería insuficiente para tratar el agua proveniente de

estas zonas; por ello, se plantea que la escorrentía del aparcamiento y de la carretera se gestione inicialmente en origen mediante drenes filtrantes y/o zonas de biorretención (con un volumen correspondiente al V_{80} , de acuerdo con el apartado 3.2.3 de esta guía) y que posteriormente el agua se dirija hacia la balsa de infiltración a través de tubos. Alternativamente se podría incluir un separador hidrodinámico o un filtro compacto aguas arriba de la balsa de infiltración.



Figura 59: Planta de la zona de actuación. Parcela municipal.

Con la metodología de los índices de mitigación se comprueba que se cumple la condición de que el índice de mitigación de contaminación de los SUDS propuestos (Tabla 11) es mayor al índice de peligrosidad de contaminación de la cuenca (Tabla 12).

En este caso, se considera que el nivel de riesgo de contaminación asociado a los usos del suelo de la cuenca es medio, por tratarse de una

zona de estacionamiento con renovación media y/o viales de capacidad media y baja. La Tabla 16 muestra los índices de peligrosidad de contaminación correspondientes y los índices de mitigación por contaminación del tren de tratamiento (calculados como se indica en el apartado 3.3.3), considerando la combinación de dren filtrante más balsa de infiltración y zona de biorretención más balsa de infiltración. Como se puede ver, ambas combinaciones proporcionarían el tratamiento adecuado de la escorrentía.

Tabla 16: Índices de mitigación de la balsa de infiltración.

	Índice peligrosidad de contaminación	Índice de mitigación de contaminación	
		Dren filtrante + Balsa de infiltración	Zona biorretención + Balsa de infiltración
SST	0,7	0,80	1
Metales	0,6	0,65	1
Hidrocarburos	0,7	0,70	1

4.3. Volumen de escorrentía a gestionar

En primer lugar, se determina el volumen de escorrentía a gestionar según el criterio volumétrico:

$$V_e = V_X * A_{IMPERMEABLE}$$

Al tratarse de un proyecto de regeneración urbana, mayoritariamente dedicado a zonas verdes y jardines, y para asegurar una reducción de volumen escorrentía mediante infiltración y el tratamiento de los primeros milímetros de escorrentía, se buscará gestionar al menos un volumen de escorrentía equivalente al percentil V_{95} (20 mm).

El cálculo del área impermeable total de la zona de estudio se ha obtenido mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$A_{IMPERMEABLE} = \sum_{i=1}^n C_i * A_i$$

El valor de coeficiente de escorrentía se toma de la Tabla 7. Para pavimentos impermeables se toma un valor de 0,95 mientras que para zonas verdes este valor es de 0,30.

$$A_{IMPERMEABLE} = (0,3 * 28.350 + 0,95 * 5.690)$$

$$A_{IMPERMEABLE} = 13.910,5 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, se deberá gestionar en origen un volumen aproximado de 280 m³ de escorrentía:

$$V_e = V_X * A_{IMPERMEABLE}$$

$$V_e = 0,020 * 13.910,5$$

$$V_e = 278,21 \text{ m}^3$$

Por otro lado, los drenes filtrantes o zonas de biorretención deberán ser capaces de tratar un volumen de escorrentía correspondiente al V_{80} con respecto a su cuenca drenante, que corresponde únicamente al aparcamiento existente y parte de la carretera principal (5.690 m²).

$$A_{IMPERMEABLE} = (0,95 * 5.690)$$

$$A_{IMPERMEABLE} = 5.662 \text{ m}^2$$

$$V_e = V_X * A_{IMPERMEABLE}$$

$$V_e = 0,011 * 5.662$$

$$V_e = 62,28 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, los drenes filtrantes o zonas de biorretención deberán disponer de un volumen de al menos 62,3 m³ para así tratar los primeros milímetros de escorrentía.

4.4. Volumen de almacenamiento del SUDS

Para obtener las dimensiones de almacenamiento de la balsa de infiltración, se ha tomado una profundidad de almacenamiento de $h = 0,30$ m. Por consiguiente, el área necesaria se calcula de la siguiente manera:

$$A_{SUDS} = \frac{V_e}{n \cdot h_{SUDS}}$$
$$A_{SUDS} = \frac{278,21 \text{ m}^3}{1 \cdot 0,30 \text{ m}}$$
$$A_{SUDS} = 927,4 \text{ m}^2$$

Se propone que la balsa de infiltración propuesta disponga de una superficie total de 930 m^2 . Con las dimensiones adoptadas se da cumplimiento a los criterios de diseño para almacenar la escorrentía generada por la lluvia de percentil V_{95} .

4.5. Tiempo de vaciado

Con el fin de que el sistema disponga de capacidad para gestionar un evento consecutivo de lluvia, se debe comprobar que el tiempo de semivaciado sea menor a 24 horas.

Para este ejemplo de diseño se ha asumido un valor de permeabilidad del terreno de $6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$, al que además se le ha aplicado un factor de seguridad de 1,5.

$$K_{diseño} = K_{terreno} / FS$$
$$K_{diseño} = 6 \cdot 10^{-6} / 1,50$$
$$K_{diseño} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$K_{diseño} = 0,0144 \text{ m/h}$$

Una vez estimado el valor de permeabilidad de diseño, se procede a calcular el tiempo de semivaciado del SUDS y se comprueba que es menor a 24 horas:

$$t_{sv} = \frac{n \cdot A_b}{k \cdot P} \cdot \log_e \left(\frac{h_{max} + \frac{A_b}{P}}{\frac{h_{max}}{2} + \frac{A_b}{P}} \right)$$
$$t_{sv} = \frac{1 \cdot 930}{0,0144 \cdot 151} \cdot \log_e \left(\frac{0,3 + \frac{930}{151}}{\frac{0,3}{2} + \frac{930}{151}} \right)$$
$$t_{sv} = 10,05 \text{ horas}$$

Adicionalmente, se debe comprobar que el tiempo de vaciado total del SUDS sea inferior a 72 horas para así evitar la proliferación de malos olores y/o mosquitos.

$$t_v = \frac{n \cdot h_{max}}{k}$$
$$t_v = \frac{1 \cdot 0,3}{0,0144}$$
$$t_v = 20,8 \text{ horas}$$

4.6. Cálculo de la estructura de rebose

Asimismo, la balsa de infiltración propuesta debe de contar con algún sistema de alivio que permita gestionar eventos de lluvia que generen más escorrentía que el criterio volumétrico adoptado en el dimensionamiento, y permitir la canalización del exceso de lluvia hacia un punto de descarga y evitar inundaciones locales.

La estructura de rebose se debe diseñar para que sea capaz de gestionar el caudal pico generado en la cuenca para el periodo de retorno 25 años aplicando la correspondiente corrección por CC. El caudal pico se obtiene mediante el Método Racional utilizando la lluvia de duración 30 minutos (como se indica en la Tabla 14) y cuyo resultado es de 0,164 m³/s.

$$Q = C * i * A$$

$$Q = (0,3 * 28.350 + 0,95 * 5.690) * 1,18 \cdot 10^{-5}$$

$$Q = 0,164 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, se determina el ancho del vertedero según lo establecido en el apartado 3.4.4 de la presente guía. Para ello se toma una altura máxima de cota de agua de 0,10 m y un coeficiente de vertido de 1,7. Como resultado se obtiene un ancho de vertedero de 3,05 m.

$$Q = C_v * b * H^{3/2}$$

$$b = \frac{0,164}{1,7 * 0,10^{3/2}}$$

$$b = 3,05 \text{ m}$$

4.7. Gestión de eventos extremos y cumplimiento de las restricciones de vertido

Este ejemplo de cálculo de SUDS se ha desarrollado como un caso a efectos didácticos. Sin embargo, dado que la superficie total del ámbito de actuación supera las 2 ha, y además habría una concatenación de SUDS, a posteriori se debería realizar una modelación hidráulica (como se indica en los apartados 3.2.2.2 y 3.4.4) para comprobar que el sistema es capaz de gestionar los eventos extremos y que se cumplen las correspondientes restricciones de vertido.

4.8. Herramienta de cálculo

Por último, la Figura 60 muestra los resultados obtenidos con la [herramienta de cálculo](#), desarrollada por el Ayuntamiento de Azuqueca de Henares, para el dimensionamiento de SUDS.

HOJA DE CÁLCULO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)

DATOS DEL PROYECTO			
PROYECTO:	Proyecto de ampliación del Parque de la Quebradilla		
UBICACIÓN:	Parque de la Quebradilla	FECHA:	dd/mm/aaaa



Esta hoja de cálculo se proporciona como parte de la Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para el término municipal de Azuqueca de Henares y sirve únicamente como predimensionamiento de SUDS.

Datos a rellenar
Datos automáticos

CÁLCULO SUPERFICIE IMPERMEABLE (Consultar apartado 3.1.6)							
DATOS	1	2	3	4	5	6	7
Zona de Superficie	Viales y aceras	Zonas verdes					
Coefficiente de escorrentía	0.95	0.3	-	-	-	-	-
Área ámbito de aplicación (m²)	5,690.0	28,350.0					34,040.0
Área impermeable (m²)	5,405.5	8,505.0	-	-	-	-	13,910.5

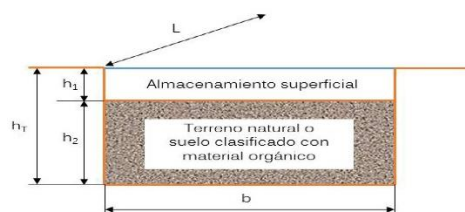
PERMEABILIDAD DEL TERRENO (Consultar apartado 3.1.2)		
Valor de ensayo	6.00E-06	m/s
Factor de seguridad	1.5	
Valor de diseño	0.0144	m/h

TIPO DE DESARROLLO (Consultar apartado 3.2.2.1)		Vx	P	Vol generado
Parques y jardines		95	20	278.21

NOTA: En este caso el valor de porosidad (n) equivale a 1.00.

h2 dependerá del tipo de SUDS a diseñar y el tratamiento a proporcionar. El valor de h2 no se tiene en cuenta para el cálculo del volumen de almacenamiento.

Ancho (b) (m)	h1 (m)	h2 (m)	h1 (m)	Longitud (L) (m)	Vol. Excavación m³	n	Vol. Almacenam. (m³)	Resultado almacenamiento
15.50	0.30	0.00	0.30	60.00	279.00	1.00	279.00	Volumen de almacenamiento adecuado
			-		-	-	-	-
			-		-	-	-	-
			-		-	-	-	-
			-		-	-	-	-



TIEMPO DE SEMIVACIADO (Consultar apartado 3.4.3)							
$t_{sv} = \frac{n \cdot A_b}{k \cdot P} \cdot \log_e \left(\frac{h_{max} + \frac{A_b}{P}}{\frac{h_{max}}{2} + \frac{A_b}{P}} \right) \quad t_v = \frac{n \cdot h_{max}}{k}$							
A _b (m²)	h _{max} (m)	P (m)	n	t _{sv} (h)	t _v (h)	Resultado semivaciado	Resultado vaciado
930.00	0.30	151.00	1.00	10.05	20.83	Tiempo vaciado < 24h	Tiempo vaciado < 72h
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-

t_{sv}, tiempo de semi vaciado

t_v, tiempo de vaciado

n, porosidad

A_b, área de la base (m²)

k, coeficiente de permeabilidad (m/h)

P, perímetro de la base (m)

h_{max}, altura máxima de columna de agua desde la base de la infiltración (m)

Figura 60: Herramienta de cálculo para el dimensionamiento de SUDS.

5. Bibliografía de Referencia

5.1. Normativa y Regulación

5.1.1. Europea

Directiva (UE) 2000/60 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. Diario Oficial de la Unión Europea L 327, 22 de diciembre de 2000 ([enlace](#)).

Directiva (UE) 2006/118 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. Diario Oficial de la Unión Europea L 372 del 27 de diciembre de 2006 ([enlace](#)).

Directiva (UE) 2007/60 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Diario Oficial de la Unión Europea L 288 del 6 de noviembre de 2007 ([enlace](#)).

Consejo de las Comunidades Europeas (91/271/CEE), Directiva del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas ([enlace](#)).

Directiva (UE) 2006/7 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006 relativa a la gestión de la calidad de aguas de baño y por la que se deroga la Directiva 76/160/CEE. Diario Oficial de la Unión Europea L 64 del 4 de marzo de 2006 ([enlace](#)).

Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones (2019). El Pacto Verde Europeo ([enlace](#)).

5.1.2. Estatal

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. Boletín Oficial del Estado 24 de julio de 2001, núm. 176 ([enlace](#)).

Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. Boletín Oficial del Estado 15 de diciembre de 2010, núm. 171 ([enlace](#)).

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 de Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. Boletín Oficial del Estado 20 de septiembre de 2012, núm. 227 ([enlace](#)).

Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, y otros reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales. Boletín Oficial del Estado 29 de diciembre de 2016, núm. 314 ([enlace](#)).

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. Boletín Oficial del Estado 31 de agosto de 2023, núm. 208 ([enlace](#)).

5.1.3. Regional

Ley 12/2002, de 27 de junio, Reguladora del Ciclo Integral del Agua Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha. BOE-A-2002-18101 ([enlace](#)).

Confederación Hidrográfica del Tago – Vertido de pluviales o aliviaderos en redes unitarias de saneamiento ([enlace](#)).

5.1.4. Local

Plan de Ordenación Municipal de Azuqueca de Henares. Normas Urbanísticas Particulares ([enlace](#)).

Ordenanza Municipal Reguladora del Vertido de Aguas Residuales del Ayuntamiento de Azuqueca De Henares ([enlace](#)).

5.2. Manuales de referencia para diseño y mantenimiento

5.2.1. Español

Ajuntament de València (2021). Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València ([enlace](#)).

Ayuntamiento de Castelló de la Plana (2019). Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el término municipal de Castelló de la Plana ([enlace](#)).

Ayuntamiento de Madrid (2018). Guía Básica de Diseño de sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y Otros Espacios Libres Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad ([enlace](#)).

NILSA (2023). Recomendaciones básicas. Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en Navarra ([enlace](#)).

MITECO (2019). Guías de adaptación al riesgo de inundación: sistemas urbanos de drenaje sostenible ([enlace](#)).

5.2.2. Catalán

Ajuntament de Barcelona. (2020). Guia tècnica per al disseny de Sistemes de Drenatge Urbà Sostenible SUDS ([enlace](#)).

5.2.3. Inglés

Bertule, M., James Lloyd, G., & Korsgaard, L. (2014). Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches . United Nations Environment Programme ([enlace](#)).

City of Philadelphia (2014) Green Streets Design Manual ([enlace](#)).

City of San Francisco (2016) Stormwater management requirements and design guidelines ([enlace](#)).

Clean Water Services (2021) Low Impact Development Approaches Handbook ([enlace](#)).

Department of Planning and Local Government (2009) Water Sensitive Urban Design Technical Manual Greater Adelaide Region ([enlace](#)).

EPA (2017). Green Infrastructure in Parks: A Guide to Collaboration, Funding and Community Engagement ([enlace](#)).

NC Environmental Quality (2018) North Carolina Stormwater Control Measure Credit Document ([enlace](#)).

NYC Environmental Protection (2012) Guidelines for the Design and Construction of Stormwater Management Systems ([enlace](#)).

University of Cincinnati (2016) East Campus Stormwater Opportunities Plan. Wilson, S., Bray, B., Neesam, S., Bunn, S., & Flanagan, E. (s.f.)

Sustainable Drainage, Cambridge Design and Adoption Guide. Cambridge: Environment and Planning Cambridge City Council The Guildhall ([enlace](#)).

Woods-Ballard, P, Wilson, S, Udale-Clarke, H, Illman, S, Scott, T, Ashley, R, & Kellagher, R (2015). CIRIA: The SuDS Manual (UK) ([enlace](#)).

5.3. Otros Enlaces de Interés

Alameda County Flood Control & Water Conservation District ([enlace](#)).

Andrés-Domenech, et. al. (2021). Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis ([enlace](#)).

Calcerrada Romero, E.; Montalvo Torró, A.; Rico Cortés, M.; Perales Momparler, S., (2020) Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua de lluvia en un almacén logístico de Azuqueca de Henares (Guadalajara). XI Congreso Ibérico de Gestión y Planificación Del Agua ([enlace](#)).

CEDEX (2021). Impacto del Cambio Climático en las Precipitaciones Máximas en España ([enlace](#)).

CONAMA (2018). Agua y Ciudad. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible ([enlace](#)).

EEA (2021) Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction EEA report N°01/2021 ([enlace](#)).

GOV.UK. Policy paper - Sustainable drainage system review ([enlace](#)).

Hydrostank. Válvulas vortex ([enlace](#)).

Hydro International. Downstream Defender Select ([enlace](#)).

Hydro International. Up-Flo Filter ([enlace](#)).

iAgua ([enlace](#)).

Instituto Geográfico Nacional. Centro de Descargas ([enlace](#)).

Info Barcelona. Primer tramo pacificado de Cristóbal de Moura: 17.000 metros cuadrados de verde y espacios de estancia ([enlace](#)).

MITECO. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) ([enlace](#)).

MITECO. Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables ([enlace](#)).

RedSUDS ([enlace](#)).

Soto-Fernández, R., Perales-Momparler, S. (2017). El camino del agua en el paisaje urbano, barrio de Bon Pastor, Barcelona. V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña ([enlace](#)).

State of Georgia (2009). Appendix C. Coastal Stormwater Management Practice Monitoring Protocol ([enlace](#)).

Universitat Politècnica de València. Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas. Instrumentación y seguimiento de Sistemas de Drenaje Sostenible en Benaguasil (Valencia) para el control de la calidad y la cantidad de escorrentías urbanas ([enlace](#)).