



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diagnosis de un sistema de alcantarillado tradicional e implantación de SUDS y equipamientos de laminación. Planes de gestión de riesgos del sistema de saneamiento (PIGSS)

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

José Francisco Bedmar del Peral

Dirigido por:

Dra. Dña. María José Rodríguez Largacha

Don Pedro Gerardo Blázquez García

Madrid, 2025

AGRADECIMIENTOS

Siempre quise ser Ingeniero de Caminos. Hasta donde me alcanza la memoria recuerdo querer ejercer esta profesión. Desde bien pequeño me fijaba en las extrañas formas de la carretera y todos los elementos que la componían, en los materiales que quedaban vistos al atravesar las montañas, o cómo las viejas nacionales se iban transformando en modernas autovías. Me preguntaba cómo podían sustentarse esos puentes que cruzaban o incluso el comportamiento que seguía el agua de los ríos que discurrían bajo estos.

Mis padres siempre apoyaron esa “rara afición” que tenía por las carreteras y cómo se construían. Años después mi abuelo Antonio me contó que había sido Peón Caminero, y cómo de orgulloso estaba de haber participado en la mejora de la carretera que llegaba a su pueblo: Cabra del Santo Cristo, en la provincia de Jaén. Yo conozco bien esta carretera, casi podría describir de memoria cada una de sus curvas, las mismas en las que mi abuelo había trabajado décadas atrás.

No sólo tengo que reconocer a mis padres el apoyo económico que me dieron cuando finalmente decidí estudiar la carrera en Valencia, sobre todo quiero agradecerles sus ánimos en esos momentos en los que pensé en abandonar, pero siempre me empujaron a continuar a pesar de las muchas adversidades que tuvieron que superar entonces.

La ilusión por finalizar la carrera siempre ha estado ahí, lo sabían primero mis padres y luego mi mujer. Pero siempre he tenido muy claro que no iba a perder ni un solo segundo de la niñez de mis hijos. Por mucho que te guste una profesión, para mí lo primero siempre ha sido mi familia. A ella le debo prácticamente todo lo conseguido estos años; sin su apoyo hubiera sido imposible retomar los estudios que un día paré, pasar los fines de semana fuera durante 2 años, superar la pérdida de tu casa por la fuerza de esas aguas que tanto siempre me interesaron y poder concluirlos finalmente. Como le digo a ella, este título también es tuyo.

Por último, no quisiera olvidarme de mi hermano, primos y tíos, los mismos que tantos ánimos y apoyo nos han dado estos últimos meses junto a mis amigos. Y gracias igualmente a mis compañeros de máster, a los profesores que he tenido en Madrid y a mis tutores María José y Pedro, todos ellos grandes docentes y profesionales en sus respectivos campos que me han ayudado a volver a querer ser Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RESUMEN DEL TRABAJO

Con este trabajo se aborda la problemática de las limitaciones que presentan los sistemas de alcantarillado tradicionales frente a la creciente urbanización y la intensificación de los eventos pluviométricos extremos asociados al cambio climático. Dichos sistemas, diseñados fundamentalmente para evacuar rápidamente el agua residual y pluvial, han demostrado presentar notables limitaciones frente a esta problemática, sobre todo en las últimas décadas.

En este contexto, la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, entre ellos los equipamientos de laminación, resulta fundamental para mejorar la gestión del drenaje urbano, a través de su integración en las redes tradicionales, todo ello dentro del marco normativo de los Planes Integrales de Gestión del Sistema de Saneamiento. Estos sistemas pretenden replicar el comportamiento natural y, con ello, aliviar la presión en el alcantarillado.

Establecidos los objetivos, se realiza un estudio exhaustivo sobre los sistemas de alcantarillado, los diferentes Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible disponibles, la regulación en España y, por último, las principales tendencias internacionales en esta materia, centrado fundamentalmente en las balsas de detención por ser un tipo de infraestructuras que abordan en gran medida la problemática del drenaje urbano, todo ello dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Para comprobar la viabilidad de estos sistemas se propone un enfoque metodológico en 5 etapas, que posteriormente se aplica para 3 casos de estudio y que, en la medida de lo posible, pretenden ser representativos de la implementación de los equipamientos de laminación en los sistemas de alcantarillado tradicional en España. Asimismo, a partir de dichos casos se analiza la bondad de los denominados métodos de dimensionamiento volumétrico, frente al diseño que se obtiene mediante modelos hidrológico-hidráulicos más o menos complejos.

Con todo ello no sólo se establecen unas recomendaciones finales y propuestas de desarrollo en materia de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, sino también la continuación del presente trabajo en diversas líneas de trabajo, en particular, el establecimiento de unos coeficientes de seguridad para el dimensionamiento de los equipamientos de laminación.

Como conclusión se revela cómo estos sistemas de drenaje sostenible, y su integración dentro de los Planes Integrales de Gestión del Sistema de Saneamiento, pueden representar una propuesta integral y complementaria a los sistemas tradicionales, permitiendo transformar y mejorar la gestión y control del drenaje en las ciudades, favoreciendo un modelo urbano más sostenible, resiliente al cambio climático y, en definitiva, habitable para sus residentes.

Índice de contenidos

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN DEL TRABAJO	2
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Contexto y justificación del trabajo	9
1.2. El ciclo hidrológico o ciclo de agua. La problemática del drenaje urbano	11
1.3. Los planes integrales de gestión del sistema de saneamiento	15
1.4. Los SUDS y los Objetivos de Desarrollo Sostenible	17
1.5. Metodología de desarrollo. Introducción	19
2. ANTECEDENTES. ESTADO DEL ARTE	20
2.1. Nacimiento y desarrollo de los sistemas de alcantarillado	20
2.2. Características fundamentales de los sistemas de alcantarillado tradicionales	21
2.3. Breve historia de los SUDS	24
2.4. Clasificación y tipología de SUDS	25
2.5. Criterios para la elección de la tipología de SUDS	38
2.6. Gestión de la calidad del agua: métodos de diseño	41
2.7. Depósitos o balsas de detención (e infiltración)	43
2.8. Regulación en España de los VDSS. Los PIGSS	69
2.9. El futuro de los SUDS en España y Europa	75
2.10. Tendencias internacionales	79
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO	82
4. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD	84
5. PROPUESTA METODOLÓGICA	86
6. CASOS DE ESTUDIO. DESARROLLO	91
6.1. Red de drenaje del Sector residencial 6 “Marxadella” de Torrent (Valencia)	92
6.2. Red de drenaje del Sector industrial SUR-3 “Carrascales” de Candeleda (Ávila)	106
6.3. Red de drenaje del Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida (Valencia)	120
7. RESULTADOS	133
7.1. Presentación de los resultados	133
7.2. Discusión de los resultados obtenidos	136
7.3. Recomendaciones para futuras mejoras del sistema	141

8. CONCLUSIONES. RECOMENDACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS	144
8.1. Principales conclusiones alcanzadas	144
8.2. Recomendaciones y estudios futuros	146
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	151
DOCUMENTACIÓN ANEXA	157
Red de drenaje del Sector residencial 6 “Marxadella” de Torrent (Valencia)	157
Red de drenaje del Sector industrial SUR-3 “Carrascales” de Candeleda (Ávila)	158
Red de drenaje del Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida (Valencia)	159

Lista de figuras

Figura 1. Comportamiento del hidrograma para diferentes tipos de uso del suelo y diferentes enfoques para la gestión de la escorrentía (SUDS y soluciones convencionales de drenaje al final de la tubería; Fuente: 10, p. 57).	14
Figura 2. ODS de la Agenda 2030 (Fuente: Naciones Unidas, link: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/ ; U.A.V: 31/05/2025).	17
Figura 3. Clasificación propuesta de técnicas de drenaje sostenible (Fuente: Rodríguez Hernández, Tesis doctoral 2008).	29
Figura 4. Izquierda: Pavimento permeable en Benicàssim (Castellón). Derecha: Cubierta vegetada sobre un supermercado en Madrid (Fuente: 6, p. 67 y 69).	32
Figura 5. Zanja de infiltración (izquierda) y pozo de infiltración (derecha) (Fuente: 19, p. 304 y 336).	32
Figura 6. Ejemplo de depósito de infiltración en el Parc Central de València (Fuente: 6, p. 35 y 107).	33
Figura 7. Zanja de infiltración en el Vial J de la localidad de Calp (Alicante), actualmente en construcción (Fuente: elaboración propia).	33
Figura 8. Ejemplos de cunetas verdes (Fuente: 19, p. 315).	34
Figura 9. Ejemplos de depósitos superficiales de detención ubicados en Valencia: Alfafar (izquierda) y Paterna (derecha) (Fuente: elaboración propia).	35
Figura 10. Vista general, planta y alzado de depósitos de detención superficiales abiertos vegetados (<i>Detention basins</i>) (Fuente: 19, p. 473 y 474).	36
Figura 11. Ejemplos de tanques de tormenta existentes en Madrid (izquierda) y Alicante (derecha) (Fuente: Manual de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta, p. 19 y 32).	37
Figura 12. Ejemplos de estanques de retención (Fuente: 19, p. 486 y 489).	37
Figura 13. Ejemplos de humedales artificiales (Fuente: 19, p. 487 y 499).	38
Figura 14. Funciones asociadas a los distintos tipos de SUDS (Fuente: adaptación de <i>The SuDS Manual</i> , Ciria C753, 2015).	39
Figura 15. Relación entre usos del suelo y tipos de SUDS (Fuente: adaptación de la Guía de València, 2015).	41
Figura 16. Índices de peligrosidad de contaminación para diferentes usos del suelo (Fuente: Ciria c753, capítulo 26).	42
Figura 17. Índices indicativos de mitigación de SUDS para vertidos a aguas superficiales (Fuente: Ciria c753, capítulo 26, adaptado).	43
Figura 18. División geográfica según climatología y variación de la precipitación. Figura desde mapa de torrencialidad, AEMET (Fuente: 1, p. 41).	48

Figura 19. Criterios de diseño de SUDS de almacenamiento de agua (Fuente: Tragsatec, extraído de 1, p. 48).	49
Figura 20. Esquema estanque de detención e infiltración (Fuente: 1, p. 48).	50
Figura 21. Esquema de depósito de detención e infiltración (Fuente: 1, p. 49).	51
Figura 22. Resumen de los principales criterios de diseño de los DBDI según la normativa española (Fuente: elaboración propia a partir de las guías).	57
Figura 23. Volúmenes de almacenamiento específico (m^3/Ha neta) mínimos para los tanques de tormenta según el método simplificado de las ITOHG (Fuente: Xunta de Galicia, 2009, extraído de 36, p. 87).	59
Figura 24. Ejemplo de escalonamiento de los laterales según la Guía de Madrid (Fuente: 28, p. 41).	63
Figura 25. Criterios de dimensionamiento por tipología edificatoria en actuaciones a nivel de sector (Fuente: 6, apartado 6.4, p. 77 y 78).	64
Figura 26. Criterios de dimensionamiento por tipología urbana en actuaciones en espacio público (Fuente: 6, apartado 6.4, p. 77 y 78).	64
Figura 27. Criterio volumétrico de acuerdo a la tipología urbana, para oportunidades de regeneración y actuaciones puntuales (Fuente: 29, p. 62, tabla 22).	65
Figura 28. Volumen de infiltración según tipo de proyecto (Fuente: 30, apartado 3.2, p. 54, tabla 8).	66
Figura 29. Valores de porosidad para materiales drenantes (Fuente: <i>The SuDS Manual</i> , CIRIA (2015), apartado 3.4.2 de la Guía 30, tabla 13).	66
Figura 30. Porosidad eficaz por diferentes tipos de suelos (%) (Fuente: Recomendaciones de proyecto de Drenaje: dispositivos de infiltración (Fundación de la Jardinería y el Paisaje, 2014), apartado 11.3 de la Guía 31, p. 50, tabla 6).	67
Figura 31. Cronograma de aplicación del control de la contaminación de los VDSS e implantación de los PIGSS (Fuente: Miteco).	72
Figura 32. Tarifas del sector del agua en varios países europeos [$\text{€}/\text{m}^3$, 2020] (Fuente: 50, p. 33, figura 24).	77
Figura 33. Características fundamentales de los casos de estudio (Fuente: elaboración propia).	92
Figura 34. Ordenación Sector 6 Marxadella (Fuente: Plan parcial).	93
Figura 35. Redes de saneamiento existentes en el Sector 6 Marxadella y su entorno (Fuente: Proyecto de urbanización).	94
Figura 36. Criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales de Torrent (Fuente: Proyecto de urbanización).	95
Figura 37. Parámetros fundamentales del modelo hidrológico e hidráulico empleado en Torrent, sin SUDS, cuenca central (Fuente: elaboración propia).	96
Figura 38. Estimación de la capacidad disponible para la cuenca central del Sector 6 de Torrent en la red de aguas pluviales existente (Fuente: elaboración propia).	97

Figura 39. Redes de saneamiento existentes aguas abajo del Sector 6 Marxadella y trazado del nuevo colector pluvial (en color azul) necesario (Fuente: Elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización e información de AdlH).	98
Figura 40. Ordenación prevista en el entorno donde se ubicará el depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent (Fuente: Proyecto de urbanización).	99
Figura 41. Predimensionamiento del depósito nº1 de Torrent (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización).	100
Figura 42. Volumen necesario del depósito nº 1 de Torrent en función de la duración de la lluvia; izquierda según 5.2-IC y derecha según MRC Valencia (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización).	101
Figura 43. Modelo hidrológico e hidráulico de la cuenca central del Sector 6 de Torrent según la norma 5.2-IC (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto).	102
Figura 44. Modelo hidrológico e hidráulico de la cuenca central del Sector 6 de Torrent según el método MRC de Valencia (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización).	103
Figura 45. Dimensionamiento volumétrico del depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent según la guía de la ciudad de València (Fuente: elaboración propia)	105
Figura 46. Comparación de métodos de diseño en el caso del depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent (predimensionamiento, modelos, volumétrico y DBDI final).	105
Figura 47. Ordenación Sector SUR-3 (Fuente: Proyecto de urbanización).	107
Figura 48. Drenaje natural existente en la zona sur del ámbito, ODT en la carretera CL-501 y continuación hacia el sur (Fuente: elaboración propia).	108
Figura 49. EBAR El Carrascal de Candeleda, infraestructura de saneamiento más próxima del sector SUR-3 (Fuente: elaboración propia).	108
Figura 50. Criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales de Candeleda (Fuente: Proyecto de urbanización).	109
Figura 51. Parámetros fundamentales del modelo hidrológico e hidráulico empleado en la red de pluviales de Candeleda, sin SUDS (Fuente: elaboración propia).	110
Figura 52. Caudal de referencia en el drenaje existente en el entorno del polígono de Candeleda para el periodo de retorno $T = 25$ años (Fuente: elaboración propia).	111
Figura 53. Estimación de la capacidad máxima del nuevo colector exterior preciso para el vertido pluvial polígono de Candeleda (Fuente: elaboración propia).	112
Figura 54. Ordenación en el extremo sur del Sector SUR-3 y espacio reservado para el DBDI en la manzana de equipamientos (Fuente: Proyecto de urbanización).	114
Figura 55. Predimensionamiento DBDI Candeleda (Fuente: elaboración propia).	114
Figura 56. Estimación del volumen de laminación del punto de vertido VERT2 del polígono de Candeleda, según la curva IDF de Témez y el modelo de producción de escorrentía superficial (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto).	116
Figura 57. Predimensionamiento del desbordamiento del polígono de Candeleda según la normativa del PHDHT (Fuente: elaboración propia).	117

Figura 58. Dimensionamiento volumétrico del DBDI del Sector SUR-3 de Candeleda según la guía de Azuqueca de Henares (Fuente: elaboración propia).	119
Figura 59. Comparación de métodos de diseño en el caso del DBDI del Sector SUR-3 de Candeleda (predimensionamientos, modelo, volumétrico y DBDI final).	119
Figura 60. Usos pormenorizados definidos en el Polígono Industrial El Tossalet (Fuente: Plan General de Bèlgida).	120
Figura 61. Mapa de relieves de la zona (Fuente: Proyecto de urbanización).	121
Figura 62. Caminos existentes al norte del sector industrial de Bèlgida, drenajes naturales de la zona (Fuente: Proyecto de urbanización).	123
Figura 63. Criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales de Bèlgida (Fuente: Proyecto de urbanización).	124
Figura 64. Parámetros fundamentales del modelo hidrológico e hidráulico empleado en la red de pluviales de Bèlgida, sin SUDS (Fuente: elaboración propia).	124
Figura 65. Espacios rústicos y agrícolas existentes al norte del sector industrial de Bèlgida (Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth).	126
Figura 66. Ordenación prevista en el extremo norte del polígono de Bèlgida y espacio reservado para el DBDI (Fuente: Proyecto).	126
Figura 67. Predimensionamiento DBDI Bèlgida (Fuente: elaboración propia).	127
Figura 68. Estimación del volumen de laminación del polígono de Bèlgida, según la curva IDF de Témez y el modelo de producción de escorrentía superficial (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización).	129
Figura 69. Dimensionamiento volumétrico del DBDI del Sector 2 “El Tossalet” de Bèlgida según la guía de la ciudad de València (Fuente: elaboración propia).	131
Figura 70. Comparación de métodos de diseño en el caso del DBDI del Sector 2 “El Tossalet” de Bèlgida (predimensionamiento, modelos, volumétrico y DBDI final).	132
Figura 71. Tabla resumen resultados (Fuente: elaboración propia).	134
Figura 72. Tabla resumen resultados económicos (Fuente: elaboración propia).	135
Figura 73. Gráfica comparativa de los métodos de diseño empleados en el caso del depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent (Fuente: elaboración propia).	137
Figura 74. Gráfica comparativa de los métodos de diseño empleados en el caso del DBDI del Sector industrial SUR-3 de Candeleda (Fuente: elaboración propia).	138
Figura 75. Gráfica comparativa de los métodos de diseño empleados en el caso del DBDI del Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida (Fuente: elaboración propia).	139
Figura 76. Gráfica comparativa de los datos de precipitación y el valor de precipitación V_x (l/m ²) estimado en modelos y adoptado en cada caso (Fuente: elaboración propia).	140

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y justificación del trabajo

1.1.1. Diagnóstico de un sistema de alcantarillado tradicional e implantación de SUDS y equipamientos de laminación

Los sistemas de alcantarillado tradicionales basan su funcionamiento en transportar de manera directa el agua (residual y/o pluvial) desde los diferentes puntos de origen hasta la red de alcantarillado, minimizando su recorrido, desaprovechando la capacidad de infiltración del terreno y evitando la posibilidad de reutilización del agua. Cuando hay lluvias importantes las canalizaciones suelen colapsar al no estar diseñadas para esos eventos, provocando inundaciones en los espacios urbanos y problemas en los cursos fluviales. En estos casos el tratamiento final de las aguas se realiza en depuradoras situadas en los extremos de las redes, en general sin sistemas previos de tratamiento o laminación, lo que motiva que las depuradoras vean superada su capacidad máxima de tratamiento en episodios de fuertes lluvias¹.

Estos sistemas tradicionales son fundamentales para la correcta gestión de las aguas residuales y el drenaje de aguas pluviales en entornos urbanos. Sin embargo, el gran crecimiento de las ciudades en el último siglo, aumentando la urbanización en el territorio y el incremento de suelo sellado, así como el creciente impacto del cambio climático, con la consiguiente intensificación de los eventos pluviométricos extremos, han puesto en evidencia las limitaciones que presentan este tipo de infraestructuras de alcantarillado. Problemas como inundaciones frecuentes y de mayor intensidad, contaminación de masas de agua y el deterioro de ecosistemas fluviales, evidencian la necesidad de plantear otras soluciones más adaptadas al medio y resilientes al cambio climático, complementando a los sistemas tradicionales.

En este contexto, los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (en adelante SUDS) han surgido en las últimas décadas como una alternativa preventiva orientada a mitigar los efectos negativos asociados al drenaje urbano, tratando de replicar el comportamiento hidrológico natural mediante estrategias como la infiltración, la retención y el tratamiento descentralizado de las aguas pluviales, promoviendo así un manejo más armónico con el entorno. Su estrategia se basa en dos aspectos básicos [1, p. 24]: reducir la cantidad de agua que llega al punto final de vertido y mejorar la calidad del agua antes de retornarla al medio natural.

¹ NÚÑEZ-COLLADO, Alba, et al. *Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Ministerio para la transición ecológica, 2019, p. 24.

El carácter preventivo de los SUDS se puede combinar actualmente con la capacidad de aprovechamiento de la escorrentía superficial para diversos usos, fundamentalmente para riego de zonas verdes y baldeo de viales, y con su utilización como elemento paisajístico y para la mejora medioambiental del entorno urbano.

1.1.2. Planes integrales de gestión del sistema de saneamiento

La aprobación del Real Decreto 665/2023², conlleva la necesidad de elaborar Planes integrales de gestión del sistema de saneamiento (en adelante PIGSS), determinando los plazos para realizarlos y los calendarios de ejecución de las actuaciones, todo ello en línea con la Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas presentada por la Comisión Europea en fecha 20/10/2022.

Estos PIGSS son la base para una buena gestión de los sistemas de saneamiento, minimizando el impacto sobre el medio ambiente y, a su vez, permiten que se identifiquen las partes responsables e implicadas en la gestión de estos vertidos y la coordinación necesaria en el caso de que existan varios titulares de las infraestructuras, instalaciones o autorizaciones de vertidos, medida cada vez más necesaria ante la amplia diversidad de implicados y su falta, en ocasiones, de acuerdo entre ellos.

Los titulares de las autorizaciones de vertido han de elaborar un PIGSS para cada aglomeración urbana. En ese sentido, la Disposición adicional segunda (Inventario de aglomeraciones urbanas que deben elaborar los planes integrales de gestión del sistema de saneamiento) del Reglamento de Dominio Público Hidráulico³ (en adelante RDPH), modificado por el citado Real Decreto 665/2023, establece que *“los órganos competentes, de acuerdo con el artículo 254 bis.3, elaborarán el inventario de aglomeraciones urbanas que deben realizar los planes integrales de gestión del sistema de saneamiento de acuerdo con el artículo 259 quinquies 2.b) y c). Este inventario reflejará igualmente las aglomeraciones urbanas de más de 50.000 habitantes que deben realizar estos planes”*.

² 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. «BOE» núm. 208, de 31/08/2023. Link: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-18806. U.A.V: 06/06/2025.

³ Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. «BOE» núm. 103, de 30/04/1986. Link: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1986-10638>. U.A.V: 06/06/2025.

Tras la tramitación pertinente y su información pública⁴, en septiembre y octubre de 2024 se dictaron las correspondientes resoluciones por parte de Presidencia de los diferentes Organismos de cuenca, aprobando el inventario de las aglomeraciones urbanas que deben elaborar los PIGSS e indicando, en sus tres Anexos, diversa información de cada aglomeración urbana. Este inventario será revisado cada cinco años y se actualizará siguiendo el mismo procedimiento que se ha seguido para su aprobación.

1.2. El ciclo hidrológico o ciclo de agua. La problemática del drenaje urbano

1.2.1. El ciclo hidrológico o ciclo de agua

El ciclo natural del agua, o ciclo hidrológico, es el proceso de circulación del agua (en sus diferentes estados: líquido, sólido y gaseoso) a través de los distintos espacios que componen la hidrosfera (océanos, mares, ríos, lagos y acuíferos) [1, p. 11] y, tal y como detalla el profesor Pedro Gerardo Blázquez García⁵, incluye ocho fases:

1.º Evapotranspiración: el agua se evapora en la superficie oceánica, superficie terrestre y de las plantas. También mediante la sublimación en los casquetes polares (cambio de estado sólido a gaseoso).

2.º Condensación: agua en forma de vapor que forma las nubes.

3.º Precipitación: las gotas de agua de las nubes se enfrían, se condensan, se unen y caen en forma de lluvia.

4.º Infiltración: el agua penetra en el suelo a través de sus poros y pasa a ser subterránea. La infiltración dependerá de la permeabilidad del sustrato, de la pendiente y de la cobertura vegetal.

5.º Escorrentía: el agua líquida se desliza cuesta abajo por la superficie del terreno.

6.º Circulación subterránea: se produce mediante corrientes subterráneas (en rocas karstificadas) y en los acuíferos por la presión intersticial (en rocas permeables).

⁴ Anuncio de la Dirección General del Agua por el que se inicia el periodo de información pública de los Inventarios de aglomeraciones urbanas que deben elaborar los planes integrales de gestión del sistema de saneamiento correspondientes a los ámbitos territoriales gestionados por las Confederaciones Hidrográficas del Miño Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro. «BOE» núm. 154, de 26/06/2024. Link: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-B-2024-23944. U.A.V: 06/06/2025.

⁵ Pedro Gerardo Blázquez García. Universidad Europea de Madrid, Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Asignatura: Sistemas de Depuración, Tratamiento de Aguas y Residuos, Tema 1, p. 3. Curso 2023-2024.

7.º Fusión: se produce cuando la nieve pasa a estado líquido al producirse el deshielo.

8.º Solidificación: disminuye la temperatura de la nube por debajo de 0ºC, produciéndose la nieve o el granizo.

La urbanización, las edificaciones de las zonas urbanas y las infraestructuras construidas en su entorno alteran considerablemente el ciclo natural del agua en sus diferentes fases, sobre todo en las de escorrentía e infiltración. Esta modificación provoca, en particular, que el riesgo de inundación aumente en las zonas urbanas, la difusión de la contaminación sea mayor y que los acuíferos subterráneos sufran una pérdida cualitativa y cuantitativa importante [1, p. 13].

1.2.2. La problemática del drenaje urbano

Tradicionalmente, el drenaje urbano ha estado orientado a evacuar las aguas pluviales lo más rápidamente posible, empleando sistemas de alcantarillado que desembocaran en medios receptores naturales. El crecimiento de las ciudades y, en consecuencia, de las superficies impermeables, ha provocado que las capacidades necesarias en estas redes sean cada vez mayores, lo que, unido al aumento de la frecuencia de los eventos pluviométricos más extremos, está ocasionando complejos problemas técnicos, ambientales y económicos.

En efecto, la expansión acelerada de las ciudades durante las últimas décadas ha causado importantes modificaciones en el ciclo hidrológico natural: por un lado, se ha aumentado la impermeabilidad del suelo, disminuyendo la infiltración del agua pluvial al subsuelo; por otro, los usos urbanos han reducido la densidad de la vegetación y, en consecuencia, la evapotranspiración del agua de lluvia realizada por las plantas. Estos cambios en el régimen natural impactan directamente en la hidrología de las cuencas urbanas, produciendo generalmente las siguientes consecuencias⁶:

- Aumento del volumen de escorrentía.
- Disminución del tiempo de respuesta hidrológica.
- Aumento del caudal pico.
- Disminución de la recarga natural de los acuíferos.
- Disminución del flujo base en cauces naturales.

⁶ DE LA FUENTE GARCÍA, Laura, et al. *Guía básica para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la ciudad de València*. Ajuntament de València, 2021, p. 2.

Habitualmente la calidad de las escorrentías generadas también puede resultar dañina para el medio receptor, ocasionando un problema de calidad de aguas y haciendo necesario un importante gasto económico y energético en la mejora de esa calidad [6, p. 4].

En consecuencia, las ciudades se enfrentan a importantes retos como el riesgo de inundaciones pluviales, el envejecimiento y deterioro de los sistemas de saneamiento, el riesgo asociado a contaminantes tradicionales y emergentes, o la degradación de las aguas superficiales naturales a causa de los desbordamientos de sistemas de saneamiento. A nivel europeo, el coste de reposición de las redes de saneamiento alcanza los 2,5 billones €⁷.

Estos retos se ven agravados por tendencias globales como la creciente urbanización y la crisis climática. Así, se necesitan enormes inversiones para mantener en funcionamiento los sistemas de saneamiento existentes, ya que el aumento de la escorrentía urbana que sobrecarga estos sistemas de drenaje da lugar a una mayor carga de contaminación por desbordamiento de sistemas unitarios, vertidos que aumentan el impacto ecológico en los sistemas acuáticos. Los enfoques tradicionales basados en incrementar la capacidad hidráulica de las redes de saneamiento con más inversión en infraestructura gris, no son aceptables desde un punto de vista de coste-beneficio económico, social y ambiental, y no dan garantías para hacer frente de una manera sólida a los desafíos que se presentan.

1.2.3. La introducción de los SUDS en la problemática del drenaje urbano

En consecuencia, se hace necesario apostar por la innovación e investigación para hacer frente a estos retos, probar y validar nuevos enfoques como los SUDS, emplear nuevas técnicas de gestión basadas en la recolección y tratamiento masivo de datos, incrementar la comprensión de los procesos hidráulicos y de calidad del agua, y demostrar su eficacia y seguridad antes de implementarlos en los sistemas de drenaje existentes⁸.

En ese sentido, los SUDS pueden contribuir a la gestión del riesgo de inundaciones y la calidad del agua, la mitigación de los efectos de islas de calor urbano y también a la mejora de la

⁷ RÖDEL, S.; GÜNTHER, F. W.; BRÜGGEMANN, T. *Investigating the impacts of extraneous water on wastewater treatment plants*. Water Science and Technology, 2017, vol. 75, no 4, p. 847-855.

⁸ ANTA, Jose, et al. *Co-UDlabs: una red europea de grandes instalaciones de investigación en drenaje urbano*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 12-15.

biodiversidad y habitabilidad del paisaje, retornando parcialmente las fases del ciclo del agua a su estado natural⁹.

El uso de SUDS permite controlar y limitar el volumen de escorrentía máxima posterior al desarrollo a la tasa que habría ocurrido antes de la expansión urbana, tal como se presenta en el hidrograma de la Figura 1¹⁰, en el que también se comprueba que el caudal de escorrentía es resultado directo de las propiedades hidrogeológicas del terreno, desde la superficie hasta las capas verticales del suelo en el área de captación. Por eso, el empleo de estructuras naturales más rugosas y otras estrategias de gestión del agua basadas en el correcto manejo del terreno, como los SUDS, incrementan el almacenamiento del agua y/o su infiltración subterránea, y prolongan el tiempo que precisaría para alcanzar los sistemas de alcantarillado.

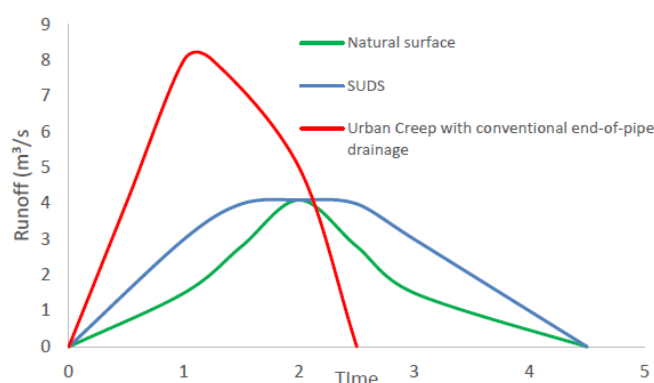


Figura 1. Comportamiento del hidrograma para diferentes tipos de uso del suelo y diferentes enfoques para la gestión de la escorrentía (SUDS y soluciones convencionales de drenaje al final de la tubería; Fuente: 10, p. 57).

Tal y como cita Arnaud et al, 2024, “*el empleo de los sistemas de drenaje basados en la naturaleza, capaces de interceptar el agua de lluvia a través de la vegetación, también aumenta las pérdidas por evapotranspiración, la infiltración y la recarga de aguas subterráneas, apoyando los flujos de base del río local y los sistemas de humedales a través de procesos de infiltración superficial. Además, las estructuras diseñadas para el almacenamiento de mayores volúmenes de agua, como los estanques de retención y detención, permiten la laminación*”

⁹ ANTA, José, et al. *Infraestructura de investigación en drenaje sostenible en la Universidad da Coruña*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 16-19.

¹⁰ Extraído de: ARNAUD, Nicole, et al. *Una nueva metodología para modelar SUDS utilizando SWMM y Giswater: estudio de caso en Montjuic-Girona/España*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 56-57.

del caudal, siendo capaces de controlar volúmenes de agua grandes que son descargados lentamente, y en menores cantidades, a la infraestructura de drenaje y al curso de agua".

El principal beneficio de los SUDS reside en la reducción de los volúmenes de escorrentía, lo que disminuye los riesgos de inundaciones y fomenta la infiltración local del agua. Al fomentar la infiltración local, se favorece de manera indirecta la recarga de los acuíferos (incrementando los volúmenes de reserva de agua para posibles aplicaciones agrarias o urbanas)¹¹.

No hay que pensar, no obstante, que estos sistemas son necesariamente sustitutivos de las redes de saneamiento tradicionales, al contrario, los SUDS las complementan al reducir el impacto de la urbanización en el ciclo hidrológico y aumentar la capacidad de adaptación ante eventos de lluvias extremas en entornos urbanos [11, p. 124].

1.3. Los planes integrales de gestión del sistema de saneamiento

Otra de las consecuencias derivadas de la problemática del drenaje urbano son los vertidos por desbordamientos del sistema de saneamiento en episodios de lluvia (en adelante VDSS), es decir, aquellos vertidos no tratados al dominio público hidráulico en episodios de lluvia que proceden de los sistemas de saneamiento, ya sean unitarios o pluviales.

En efecto, durante las precipitaciones en las zonas urbanas el agua pluvial discurre limpiando las vías públicas y arrastrando los diferentes tipos de residuos que se encuentra para, en última instancia, depositarse en la red de saneamiento, donde se une a las aguas residuales urbanas, en el caso de las redes unitarias, o es transportada (con la contaminación acumulada) hasta el punto de vertido al medio, en el caso de las redes de aguas pluviales. En cualquier de los 2 casos el agua contaminada es vertida puntualmente al medio natural, en el segundo caso directamente, mientras que en el primero el sistema de saneamiento no es capaz de transportar y tratar en las correspondientes estaciones de tratamiento de las aguas residuales (en adelante EDAR) toda el agua que evacúa, tanto la pluvial como la residual, desbordándose finalmente al medio mediante aliviaderos dispuestos en la red.

Como respuesta a lo anterior, el RDPH se ha actualizado en diversas ocasiones para tratar de reducir los VDSS, tanto en volumen vertido como en contaminación al medio. De este modo,

¹¹ BERNAL, Carlota; MÍNGUEZ, Sergio Zubelzu; ESTEVE, Paloma. *Impacto social del sistema de drenaje sostenible (SUDS): revisión sistemática de la literatura y retos de la investigación*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 124-131.

con el Real Decreto 1290/2012¹² se introdujo en el RDPH la obligación de controlar y reducir la contaminación procedente de los VDSS, estableciéndose la necesidad de elaborar las normas técnicas en las que se especificarían y desarrollarían los procedimientos de diseño de las obras e instalaciones para la gestión de las aguas de escorrentía.

Durante los más de diez años que han transcurrido desde la aprobación de dicha regulación se ha avanzado en el conocimiento sobre estos vertidos, así como en el desarrollo tecnológico que permita la adecuada protección de las aguas. Por ello, y ante la creciente preocupación nacional y europea por el impacto de estos vertidos, el reciente Real Decreto 665/2023 ha incorporado al RDPH la práctica totalidad de los requisitos de la Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, presentada por la Comisión Europea en fecha 20/10/2022, dando un notable impulso a la gestión de los sistemas de saneamiento mediante:

- El tratamiento en origen de la escorrentía pluvial, al fomentar el uso de SUDS.
- La regulación normativa de los VDSS, al establecer la obligación de que se incluyan en la autorización de vertido.
- La determinación de las condiciones en las que se podrán autorizar este tipo de vertidos, tales como la exigencia discrecional de tratamiento de las aguas; la implantación de medidas de retención y evacuación a la EDAR de las primeras aguas, etc. Así, se incorpora el *“Anexo XI. Norma técnica básica para el control de los vertidos por desbordamientos de los sistemas de saneamiento”*, donde se especifican criterios para el diseño de las obras e instalaciones para la gestión de las aguas de escorrentía.
- La obligación de retirar los residuos acumulados en el cauce tras un vertido.
- La obligación de disponer de sistemas de monitorización que midan el número de eventos, su tiempo de duración y el volumen asociado a cada evento, además de parámetros de calidad.
- Y, sobre todo, la obligación a que determinadas aglomeraciones urbanas elaboren un PIGSS para sus sistemas de saneamiento.

¹² Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. «BOE» núm. 227, de 20 de septiembre de 2012. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2012-11779>. U.A.V. 29/01/2025.

Tal y como detalla la *Agència Catalana de l'Aigua (ACA)*¹³, “los Planes integrales de gestión de los sistemas de saneamiento (PIGSS) son los documentos que los titulares de los sistemas de saneamiento tienen que redactar para hacer una diagnosis del estado de cada sistema y así determinar las obras y actuaciones necesarias para lograr su buen rendimiento”.

Los titulares de los sistemas correspondientes disponen de un plazo de tres años (desde la aprobación de la norma o desde la aprobación del inventario) para elaborar y presentar al organismo de cuenca los PIGSS, que revisará su contenido, valorará la adecuación de las medidas propuestas a los objetivos ambientales del medio receptor y procederá a su integración en la autorización de vertido asociada.

1.4. Los SUDS y los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Tal y como se desarrollará en el presente trabajo, los SUDS y los PIGSS en los que se integran, se alinean de manera directa con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (en adelante ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, adoptada por la Asamblea General de la ONU el 25 de septiembre de 2015. Se trata fundamentalmente de los siguientes ODS y sus correspondientes metas:



Producido en colaboración con TROLLBACK + COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1212.529.1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: dplcampagna@un.org

Figura 2. ODS de la Agenda 2030 (Fuente: Naciones Unidas, link: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>; U.A.V: 31/05/2025).

¹³ Link: <https://aca.gencat.cat/es/laigua/proteccio-i-conservacio/regulacio-dabocaments/plans-integrals-gestio-sistemes-sanejament/index.html>. U.A.V: 29/01/2025.

ODS 6: Agua limpia y saneamiento

- Meta 6.3. Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación:

Los SUDS filtran, infiltran y laminan las aguas pluviales, reduciendo la carga contaminante que llega a los cursos de agua, ayudando a prevenir vertidos y mejorando la calidad del agua en origen antes de retornarla al medio.

- Meta 6.5. Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos:

El empleo de SUDS y su implementación dentro de los nuevos PIGSS, permite realizar la gestión integrada del saneamiento urbano, promoviendo también un enfoque global del agua urbana, complementario a las redes de alcantarillado tradicionales.

- Meta 6.6. Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua:

Los SUDS mejoran la calidad del agua antes de retornarla al medio, protegiendo este tipo de ecosistemas y minimizando el impacto ambiental asociado al drenaje.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

- Meta 11.4. Proteger y salvaguardar el patrimonio natural del mundo:

La protección de la calidad del agua urbana mediante la implantación de SUDS en los sistemas de alcantarillado salvaguarda el entorno natural, en particular, los cursos de agua y sus recursos asociados.

- Meta 11.5. Reducir el impacto de los desastres:

El drenaje sostenible en las ciudades contribuye a reducir las inundaciones urbanas, a partir de la disminución de las escorrentías y los caudales pico en episodios de lluvia.

- Meta 11.6. Reducción del impacto ambiental de las ciudades:

Con la mejora de la gestión de las escorrentías urbanas se disminuye la sobrecarga en los sistemas de saneamiento y se mejora la calidad ambiental de las ciudades.

ODS 13: Acción por el clima

- Meta 13.1. Aumentar la resiliencia ante riesgos climáticos:

Los SUDS son una herramienta natural para la adaptación de las ciudades frente al cambio climático, ya que permiten amortiguar los efectos derivados de eventos

extremos asociados al cambio climático, no sólo de precipitación, sino también por los efectos isla de calor en las zonas urbanas.

ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres

- Meta 15.1. Conservar los ecosistemas terrestres y de agua dulce:

Tal y como se ha adelantado, los SUDS filtran, infiltran y laminan las aguas pluviales, reduciendo la carga contaminante que llega a los cursos de agua, ayudando a prevenir vertidos y mejorando la calidad del agua en origen antes de retornarla al medio.

ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos

- Meta 17.17. Fomentar alianzas multisectoriales:

La utilización de SUDS y su implementación dentro de los nuevos PIGSS, implica la colaboración entre administraciones, técnicos, ciudadanía y sector privado, promoviendo una gobernanza participativa.

1.5. Metodología de desarrollo. Introducción

La metodología desarrollada en el presente trabajo se basa en un enfoque sistemático completo que permite, en un primer momento, analizar los sistemas de alcantarillado tradicionales y, tras ello, estudiar la integración en dichos sistemas de diferentes tipologías de SUDS que los complementen y mejoren, en concreto, equipamientos de laminación. Se estructura en cinco etapas o fases clave:

- (1) Recolección de datos y análisis preliminar del área de estudio, incluyendo normativas y características del sistema actual.
- (2) Diagnóstico del sistema tradicional mediante modelización hidrológica-hidráulica e identificación de deficiencias.
- (3) Diseño de propuestas de mejora en el sistema con la selección e integración de SUDS y la implementación de PIGSS.
- (4) Evaluación de la implementación de SUDS en el sistema de alcantarillado, análisis de las mejoras logradas y validación de los dimensionamientos volumétricos.
- (5) Conclusiones y recomendaciones para optimizar la gestión del drenaje urbano.

Este enfoque busca garantizar soluciones de drenaje sostenibles y eficientes, adaptadas a diferentes contextos urbanos.

2. ANTECEDENTES. ESTADO DEL ARTE

2.1. Nacimiento y desarrollo de los sistemas de alcantarillado

La primera instalación de saneamiento datada fue un pozo negro encontrado en Babilonia, en el actual Irak, en los comienzos de la Edad Antigua (4000 a.C.), y consistía en una excavación en el suelo donde se depositaban y concentraban los restos fecales. No obstante, el progreso de esta civilización en torno a la gestión del agua que utilizaban de los ríos Tigris y Éufrates, mediante un sistema hidráulico rudimentario para el transporte y consumo de agua, derivó posteriormente en las primeras tuberías de arcilla¹⁴.

El sistema de alcantarillado más antiguo ha sido encontrado en la ciudad sumeria de Nippur, también en el actual Irak, y data del año 3750 a.C.

Más tarde, hacia el año 3000 a.C. aparecieron los primeros edificios con letrinas en el Valle de Indo, situado en Pakistán y el noreste de Afganistán, donde la gente baldeaba el agua sucia hasta las alcantarillas y de ahí al pozo negro o al río Indo. Algunas poblaciones crearon un sistema de alcantarillado completo, con canales rectangulares que conducían el agua de lluvia y canales que conducían también el agua residual, como ocurría en la ciudad de Rakhigarhi.

Por su parte, en la Grecia clásica empezaron a usar las aguas negras como abono para el campo. Así, los precarios sistemas de alcantarillado conducían las aguas residuales a las afueras de las ciudades hacia un vertedero y, desde allí, a los campos de cultivo mediante tuberías. Más adelante, durante el Imperio Romano se construyeron acueductos, termas, aljibes de agua, etc. Pero también construyeron grandes infraestructuras de alcantarillado. Tal y como cita el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017¹⁵,

“las primeras alcantarillas de la antigua Roma fueron construidas por Tarquinius Superbus alrededor del siglo VII a.C. Consistían en un sistema de canales a cielo abierto que drenaba el agua de los pantanos en el fondo de los valles de las siete colinas (tierra inhabitable en ese entonces) y la transportaba al Tíber. Estos sistemas de drenaje evolucionaron lentamente y los romanos finalmente construyeron un complejo sistema de alcantarillas cubierto por piedras, similar a los drenajes modernos. La evacuación de las

¹⁴ MARTÍN BUENO, Manuel Antonio, et al. *Baños y letrinas en el mundo romano: el caso del balneum de la Domus 1 del barrio de las termas de Bilbilis*. 2007.

¹⁵ UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. *“Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales. El recurso desaprovechado”*. 2017.

letrinas se realizaba hacia el sistema de alcantarillado principal y luego, a través de un canal central, al río o arroyo más cercano.

El segmento más sofisticado del sistema de alcantarillado romano fue la Cloaca Máxima cubierta, el colector más grande entre los diversos colectores de aguas residuales. Construido primero como un canal de agua dulce abierto, alrededor de los siglos II y I a.C. se transformó en un monumental túnel subterráneo con paredes de toba y bóvedas”.

Con la caída del Imperio Romano casi todas sus infraestructuras hídricas fueron abandonadas, volviéndose a usar hasta la Edad Media los pozos negros como única vía de saneamiento, depositándose nuevamente las heces en las calles. Las ciudades de toda Europa se fueron llenando de suciedad y heces, contaminando el agua, y con unas prácticas de higiene personal casi inexistentes. La propagación de epidemias y enfermedades causaron un drástico descenso en la esperanza de vida. En cambio, las ciudades de Al-Ándalus desarrollaron unas normas y sistemas de saneamiento para que cada tipo de agua fuera por una conducción diferente: la de lluvia circulaba por canales externos hacía los aljibes, el agua gris doméstica se eliminaba de los patios de las casas a través de desagües subterráneos o tuberías en superficie, mientras que las aguas residuales tenían una tubería independiente hacia los pozos negros.

La llegada del Renacimiento y la Ilustración, con lo que significó de revolución para las artes y la ciencia, no fue de la mano con el saneamiento. Las ciudades europeas continuaban siendo insalubres y las epidemias frecuentes; no fue hasta el "Great Stink" (la gran peste londinense del verano de 1858) cuando se empezó a tomar conciencia real del problema, con las corrientes higienistas. Unos años más tarde, Louis Pasteur demostró que los microorganismos presentes en las aguas fecales eran causantes de enfermedades. Como resultado de ello se comenzó a modificar la legislación en diferentes países de Europa, y el saneamiento pasó a ser un tema central en la política de las ciudades, comenzando a desarrollarse y extenderse los sistemas de alcantarillado que, en muchos casos, todavía siguen en funcionamiento.

Con la mejora de las redes de saneamiento de la segunda mitad del siglo XIX se comienzan a crear, a su vez, los primeros sistemas de depuración, que inicialmente extraían la materia sólida y que se complementaron, posteriormente, con tratamientos biológicos para eliminar la materia orgánica de las aguas residuales antes de su retorno al ciclo hidrológico.

2.2. Características fundamentales de los sistemas de alcantarillado tradicionales

Partiendo del enfoque higienista de la segunda mitad del siglo XIX, los sistemas de alcantarillado se han venido diseñando tradicionalmente para permitir la recolección,

transporte, disposición y tratamiento final de las aguas residuales y pluviales de manera eficiente, principalmente en zonas urbanas, garantizando la salud pública y evitando la contaminación del medio natural, mediante la correcta recolección, gestión y tratamiento final de las aguas provenientes de las actividades humanas y las precipitaciones.

Aunque sus amplias funciones y dimensiones hacen que presenten multitud de características, las principales de los sistemas de alcantarillado tradicionales y sus componentes fundamentales se podrían resumir en:

- Diseño gravitacional: En general aprovechan la pendiente natural del terreno para transportar las aguas hacia los puntos de vertido o las plantas de depuración, precisando puntualmente el uso de estaciones de bombeo y tuberías en presión.
- Tipología de redes por las aguas a transportar¹⁶:
 - Red de alcantarillado de tipo unitaria: circulan juntas aguas blancas y negras.
 - Red de alcantarillado de tipo separativa: las aguas negras y las de lluvia circulan separadas.
 - Redes pseudo-separativas: red separativa en calle, pero unitaria en viviendas.
 - Redes doblemente separativas: conductos separados para las aguas residuales urbanas e industriales.
- Aunque pueden presentar otros componentes, los básicos son los siguientes:
 - Redes de tuberías:
 - Colectores: Recogen y transportan las aguas residuales procedentes de las viviendas, comercios e industrias (espacios privativos), así como las aguas pluviales procedentes fundamentalmente de las vías públicas, así como de los espacios privativos.
 - Emisarios: A partir de los colectores los emisarios se encargan de transportar grandes volúmenes hacia las plantas de tratamiento.
 - Interceptores: Conectan colectores a emisarios principales.

¹⁶ Pedro Gerardo Blázquez García. Universidad Europea de Madrid, Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Asignatura: Sistemas de Depuración, Tratamiento de Aguas y Residuos, Tema 2, p. 5. Curso 2023-2024.

- Arquetas, pozos y arquetones de registro: Elementos para la inspección, monitoreo y mantenimiento de las redes de tuberías.
- Acometidas: Formadas por arquetas de registro y albañales de conexión a las zonas privativas, permiten la descarga de aguas desde dichas zonas hacia los colectores de saneamiento, principalmente en pozos de registro.
- Sumideros o imbornales de aguas pluviales, rejillas de desagüe: Recogen agua de lluvia desde viales públicos, en general, en superficies pavimentadas.
- Estaciones de bombeo: Instalaciones mecánicas y eléctricas utilizadas en áreas con escasa pendiente donde el flujo por gravedad no es siempre viable.
- Aliviaderos: En redes unitarias, son dispositivos que permiten la derivación del caudal que excede de la capacidad de transporte de la red de alcantarillado o de la capacidad de tratamiento de la estación depuradora a otros puntos de la red, al cauce receptor o a instalaciones de almacenamiento temporal [16, p. 28].
- Estaciones de tratamiento de aguas residuales: Plantas donde se procede a la depuración primaria, secundaria y, en ocasiones también terciaria del agua procedente de la red de saneamiento, antes de su retorno al medio natural o reutilización, según las características del sistema.
- Descargas finales: Puntos donde se vierte el agua tratada en las masas de agua.

En la actualidad los sistemas de alcantarillado han mejorado notablemente, tanto en lo referente a los materiales de conducción y eficiencia en la construcción de redes, como en los mecanismos de depuración. Sin embargo, aún hoy existen muchas poblaciones, también en España, que no disponen de sistemas adecuados y completos de alcantarillado o que vierten sus aguas residuales directamente sin depurar o las pluviales sin tratar.

Este último problema, como se ha visto anteriormente, se ha acrecentado a partir de la segunda mitad del siglo XX con el notable crecimiento de las ciudades y el consiguiente aumento de las superficies selladas, que ha introducido notables alteraciones en el ciclo natural del agua:

- La impermeabilización del suelo impide la infiltración del agua en el subsuelo y aumenta, por el contrario, su escorrentía superficial, aumentando el volumen de agua a drenar y su caudal pico, que también se produce antes que en condiciones naturales, reduciendo el tiempo de respuesta ante posibles eventos extremos.

- Reducción de la densidad de vegetación y, consecuentemente, también de la evapotranspiración que producen las plantas.
- Aumento de la contaminación de las aguas procedentes de las escorrentías urbanas.
- En el caso de las redes unitarias durante los eventos de precipitación extremos se producen VDSS, lo que constituye un grave problema medioambiental.

Asimismo, tal y como se cita en la Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València [6, p. 8], *“el cambio climático también supone un importante desafío para el drenaje urbano, aumentando la frecuencia de los eventos torrenciales. [...] la ocurrencia y severidad de las inundaciones se ha incrementado”*.

2.3. Breve historia de los SUDS

Los SUDS han pasado de ser una reacción a los problemas de inundaciones y contaminación en áreas urbanas a una estrategia integral para gestionar las aguas pluviales, mejorando el funcionamiento de las infraestructuras urbanas, reduciendo su coste global y beneficiando al medio ambiente. Con el tiempo, estos sistemas se han convertido en una parte fundamental de la planificación urbana sostenible, ayudando a los núcleos a adaptarse a los desafíos del cambio climático y la creciente urbanización del último siglo.

Desde sus inicios en 1960 hasta la actualidad las tendencias en estos sistemas se resumen en:

- Décadas de 1960-1970: Primeras preocupaciones ambientales

Las primeras preocupaciones sobre la gestión del agua de lluvia en áreas urbanas, comenzaron a surgir con el crecimiento acelerado de las ciudades y el inadecuado tratamiento del drenaje con las infraestructuras existentes, con los consiguientes problemas de inundaciones y contaminación del medio.

- Década de 1980: Introducción de enfoques sostenibles

En esta década comenzaron a surgir enfoques más sostenibles dirigidos a la gestión integral de las aguas pluviales en lugar de sólo drenarlas. Se introdujo el concepto de "gestión de aguas pluviales basada en el sitio", que buscaba usar técnicas naturales para reducir la escorrentía y mejorar la calidad del agua.

- Década de 1990: Consolidación de los SUDS y el concepto de "*Low Impact Development*"

En esta década, especialmente en el Reino Unido, se popularizó el concepto de SUDS. La *Environmental Protection Agency* (en adelante EPA) de EE.UU. también comenzó a promover el enfoque *Low Impact Development* (en adelante LID)¹⁷, similar a los SUDS, centrándose en el manejo de las aguas pluviales en el lugar de origen para reducir la escorrentía y promover la infiltración.

- Décadas de 2000-2010: Expansión y adopción global

Durante los primeros años del siglo XXI los SUDS y LID ganaron popularidad a nivel global, especialmente en el contexto de cambio climático y la necesidad de hacer frente a fenómenos meteorológicos extremos y las inundaciones asociadas.

Las ciudades comenzaron a adoptar SUDS como una forma de mitigar el impacto ambiental de la urbanización y mejorar la resiliencia de las infraestructuras urbanas frente a eventos climáticos extremos.

- Actualidad: Normativas y desarrollo tecnológico

Hoy en día los SUDS son una parte integral de las políticas urbanísticas en muchas zonas urbanas de todo el mundo. Las normativas y directrices para su implementación están ampliamente desarrolladas, como las guías de *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA) en el Reino Unido y las guías de la EPA en EE.UU.

A pesar de su despegue generalizado, el uso de los SUDS aún está limitado en Europa y se han logrado avances significativos en las últimas décadas; es en los últimos años que los países del sur de Europa han mejorado su conocimiento y experiencia [9, p.16].

2.4. Clasificación y tipología de SUDS

2.4.1. Introducción a la clasificación de SUDS

A la hora de catalogar las técnicas de drenaje urbano sostenible son múltiples y diversas las clasificaciones que se encuentran en la literatura, no existiendo un consenso universal para establecer unos criterios básicos para su clasificación. A continuación, se presentan algunas de estas clasificaciones¹⁸):

¹⁷ DIETZ, Michael E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, air, and soil pollution*, 2007, vol. 186, p. 351-363.

¹⁸ Basado en: RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Jorge, et al. *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero*. Universidad de Cantabria, 2008.

- Temprano et al. (1996) se refieren a los SUDS como medidas de control de la contaminación, clasificándolas según dos criterios.
 - Según el grado de intervención en la estructura de la red:
 - Medidas no estructurales: no requieren actuación alguna sobre la red.
 - Medidas estructurales: precisan mejoras de la red de drenaje.
 - Según el lugar del sistema de alcantarillado donde se apliquen:
 - Control en origen: se aplican previamente al sistema de drenaje.
 - Control de los vertidos: se aplican a elementos de la red.
- En Estados Unidos, la *National Stormwater BMP Database* (Base de datos nacional de buenas prácticas ambientales) fue creada y comenzó a ser desarrollada por la EPA a partir de 1999 en colaboración con otras organizaciones, como la *American Society of Civil Engineer* (ASCE), organización profesional fundada en 1852 reconocida internacionalmente como una de las principales asociaciones dedicadas al desarrollo y promoción de la ingeniería civil. Dicha clasificación establecía 3 tipos fundamentales de BMPs (*Best Management Practices*):
 - Buenas Prácticas Ambientales estructurales (*structural BMPs*): Sistemas de infiltración, sistemas de detención, sistemas de retención, humedales artificiales, sistemas de filtrado, sistemas vegetados (biofiltros), minimizar las superficies impermeables directamente conectadas, y combinaciones y sistemas proporcionados por los vendedores.
 - Buenas prácticas ambientales no estructurales (*non-structural BMPs*): Educación, reciclado y controles en origen, y prácticas de mantenimiento.
 - Prácticas de Desarrollo de Bajo Impacto (*Low-Impact Development Practices*): minimizar áreas impermeables, crecimiento dirigido, protección de áreas sensibles, preservación de los espacios abiertos, y minimizar las afecciones al suelo y a la vegetación.
- Jiménez (1999) traduce los BMPs utilizados en EE.UU. por MPC (Mejores Prácticas de Control) y propone su clasificación en base al control de la contaminación de la escorrentía superficial urbana.

- La *Environmental Alliance* (2001) propuso también una clasificación de SUDS en el Reino Unido para abordar los problemas asociados al manejo de las aguas pluviales en entornos urbanos.
- CIRIA, organización sin fines de lucro del Reino Unido que trabaja desde 1960 para promover la investigación y el desarrollo en la industria de la construcción, buenas prácticas y brindar orientación técnica en la construcción y el medio ambiente, ha publicado diversas guías clave sobre SUDS, destacando las siguientes:
 - "*Sustainable Drainage Systems (SuDS): Hydraulic, structural and water quality advice*" (C609), 2004, fue la primera guía publicada por CIRIA que, además de incluir una clasificación más detallada de SUDS, proporcionaba asesoramiento detallado sobre su diseño e implementación con énfasis en los aspectos hidráulicos y de calidad del agua.
 - "*Guidance on the construction of SuDS*" (C768), 2017, asesora sobre el diseño, especificación y construcción de SUDS con el objetivo de evitar errores comunes durante su implementación. Esta guía complementa a su manual previo "*The SuDS Manual*" (C753), 2015¹⁹, que aborda aspectos de planificación, diseño, construcción y mantenimiento de SUDS para facilitar su implementación efectiva.

2.4.2. Clasificación en España

Los SUDS comenzaron a introducirse en España a partir del año 2000, sobre todo influenciados por las experiencias y tendencias que se estaban desarrollando en Estados Unidos y Reino Unido durante las décadas previas. La necesidad de adaptar los sistemas de drenaje a los nuevos desafíos ambientales se tradujo inicialmente en publicaciones y directrices que integraran los SUDS en las normas urbanísticas y ambientales.

En 2007, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente publicó una serie de directrices para la gestión de las aguas pluviales en áreas urbanas que promovían la integración de los SUDS en los sistemas de alcantarillado. En este contexto, se clasificaron distintas técnicas y estrategias de drenaje sostenible según su función (infiltración, almacenamiento, filtración, etc.) y su impacto ambiental.

¹⁹ WOODS BALLARD, B., et al. *The SuDS Manual*. Ciria (753). Department for Environment Food & Rural Affairs. CIRIA. Londres 2015.

A partir de entonces, las clasificaciones, regulación y normativa sobre los SUDS en España se establecieron de manera más clara y específica. Con la aprobación de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE)²⁰ en la Unión Europea, España reguló en su legislación estatal en materia de agua la necesidad de gestionar las aguas pluviales urbanas de forma sostenible, sobre todo con el desarrollo y aprobación final del Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre²¹, y del Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, que modificaron parcialmente el RDPH, entre otros, su artículo 126 ter. 7, que establece la obligatoriedad de utilizar SUDS en los nuevos desarrollos urbanísticos.

Una de las primeras y más completas clasificaciones de SUDS en España fue la realizada por Rodríguez Hernández en su tesis doctoral de 2008, que a día de hoy sigue siendo ampliamente aceptada y utilizada en la diferente normativa, legislación, guías y demás regulación española en la materia, motivo por el que va a ser la empleada también en el presente trabajo para introducir, y posteriormente describir, los distintos tipos de SUDS actualmente utilizados en España. En dicha clasificación, tras haber analizado las principales clasificaciones existentes, y como síntesis de las mismas, se propone englobar estos sistemas en las siguientes 12 técnicas de drenaje sostenible, agrupadas, a su vez, en cuatro categorías generales:

²⁰ Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23/10/2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. «DOCE» núm. 327, de 22/12/2000. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524>. U.A.V. 06/06/2025.

²¹ Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el RDPH, 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. «BOE» núm. 314, de 29/12/2016. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-12466>. U.A.V. 06/06/2025.

Categoría dentro del drenaje sostenible		Técnica de drenaje sostenible
A. Medidas preventivas		1. Legislación
		2. Formación
		3. Inversión
Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Medidas estructurales	B. Sistemas de infiltración	4. Superficies permeables
		5. Pozos y zanjas de infiltración
		6. Depósitos de infiltración
	C. Sistemas de captación y transporte	7. Drenes filtrantes o drenes franceses
		8. Cunetas verdes
		9. Franjas filtrantes
	D. Sistemas de almacenamiento y laminación	10. Depósitos de detención
		11. Estanques de retención
		12. Humedales artificiales

Figura 3. Clasificación propuesta de técnicas de drenaje sostenible (Fuente: Rodríguez Hernández, Tesis doctoral 2008).

2.4.3. Tipología de SUDS

A continuación, se recoge una descripción de las categorías y técnicas de los SUDS siguiendo el citado modelo de clasificación propuesto por Rodríguez Hernández (2008).

2.4.3.1. Medidas preventivas (A)

Son aquellas actuaciones previas diseñadas para evitar que se produzcan los problemas asociados a la escorrentía urbana superficial, tratándose de propuestas no estructurales en tanto que no prevén obra alguna, no sistemas de drenaje como tal. Estas medidas pueden resumirse en legislación, formación e inversión.

➤ 1. Legislación

Para fomentar y lograr la consolidación de los SUDS en las ciudades, es necesario desarrollar políticas municipales que integren aspectos medioambientales y de gestión hídrica en la

legislación urbanística, como Planes de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales. Los modos de intervención municipal en el medio ambiente urbano son²²:

- Regulación: ordenanzas sobre medio ambiente.
- Control preventivo: licencias y otros instrumentos de control.
- Sanciones: multas y penalizaciones.
- Información: acceso libre a la información de las administraciones públicas sobre medio ambiente.
- Planeamiento urbano: instrumento básico de protección del medio ambiente urbano.

El desarrollo de legislación adecuada y la generalización de estos sistemas tan sólo es posible mediante la creación de grupos de trabajo (*National SUDS Working Group*, 2003), los cuales generan documentos de síntesis de gran importancia, recogiendo desde los aspectos legales hasta los aspectos técnicos básicos: glosario, descripciones, normas y detalles de diseño, legislación, responsabilidades de mantenimiento, garantías, bibliografía, organizaciones vinculadas, acrónimos y sitios web relacionados (Rodríguez Hernández, 2008).

Según se ha adelantado anteriormente, en España ya se dispone actualmente de un marco regulatorio básico sobre el empleo de los SUDS en los entornos urbanos, tanto en el citado RDPH como en la diferente normativa autonómica y municipal, si bien es preciso profundizar en la normalización y el uso generalizado de estos sistemas para minimizar los diferentes problemas asociados al drenaje urbano.

➤ 2. Formación

En este caso cobra vital importancia la concienciación de la sociedad y los decisores (sobre todo los municipales) a la hora de mantener limpio el entorno urbano, pues unos espacios públicos más limpios implican una mejor calidad del agua de escorrentía. Unos buenos instrumentos para concienciar a la sociedad son las campañas publicitarias, pero de nada sirven sin una adecuada educación y formación.

➤ 3. Inversión

Las administraciones públicas, especialmente las municipales, han de incluir en sus presupuestos anuales una partida de gastos que permita, por un parte, elaborar y hacer

²² GARCÍA GIL, F. J. *Prontuario de protección del medio ambiente estatal, autonómico y municipal*. 2007.

cumplir correctamente las normativas que faciliten la aplicación de los SUDS y, por otra, realizar las campañas de formación y publicidad necesarias para implicar a toda la sociedad en resolver esta problemática, en definitiva, ambiental.

Sin un adecuado nivel de inversión económica por parte de las administraciones públicas, no es posible afrontar la elaboración de normativa en materia de drenaje sostenible, así como tampoco la formación de la ciudadanía, la construcción de los SUDS y, en última instancia, su adecuado mantenimiento para garantizar su correcto funcionamiento.

2.4.3.2. Sistemas de infiltración (B)

Estos sistemas están diseñados para capturar un volumen de escorrentía de aguas pluviales, retenerlo y, en última instancia, infiltrarlo en el subsuelo, disminuyendo la escorrentía superficial procedente del drenaje urbano. Este proceso puede tardar varias horas o incluso días para que la escorrentía no se infiltre en el terreno con demasiada velocidad.

La infiltración supone un impacto para la calidad del agua, eliminando los contaminantes por medio de la filtración del agua a través de las capas del suelo. Pero la infiltración también tiene algunos inconvenientes. En efecto, no es conveniente llevar a cabo ningún sistema de infiltración en zonas donde el agua subterránea es una fuente primaria de agua potable, ya que puede existir riesgo de contaminación. Esto es todavía más restrictivo si se tratan de aguas de escorrentías que provienen de un entorno industrial (EPA, 1999). Además, estos sistemas no deben situarse a menos de 5 metros de distancia de un edificio o carretera para evitar que el agua infiltrada afecte a las cimentaciones de dichas estructuras (Rodríguez Hernández, 2008).

➤ 4. Superficies permeables

Consisten en una variedad de tipos de pavimento, adoquines y otros dispositivos que permiten la infiltración de aguas a través suyo, ofrecen también una función estructural, pudiendo ser resistentes al tráfico o no. Las aplicaciones de las superficies permeables quedan restringidas, en general, a zonas sin vehículos pesados, como aparcamientos, calles residenciales, calles de media densidad de tráfico, cubiertas ajardinadas, aceras, paseos, zonas de recreo, etc.



Figura 4. Izquierda: Pavimento permeable en Benicàssim (Castellón). Derecha: Cubierta vegetada sobre un supermercado en Madrid (Fuente: 6, p. 67 y 69).

➤ 5. Pozos de infiltración y zanjas de infiltración

Consisten en excavaciones rellenas de material granular drenante que permiten almacenar y, sobre todo, la infiltración de un volumen de escorrentía en el suelo que envuelve la excavación.



Figura 5. Zanja de infiltración (izquierda) y pozo de infiltración (derecha) (Fuente: 19, p. 304 y 336).

➤ 6. Depósitos de infiltración

Se diseñan para capturar un volumen de escorrentía, mantenerlo en su interior y, en última instancia, infiltrarlo en el subsuelo durante un periodo de tiempo, en función de la capacidad del depósito y la permeabilidad del terreno, permitiendo gestionar cuencas mayores que las zanjas y pozos de infiltración por su mayor volumen general. Asimismo, pueden aplicarse en las mismas zonas que los pozos y zanjas de infiltración.

Sus principales objetivos son, por una parte, transformar agua superficial en subterránea, disminuyendo así la escorrentía, y por otra, eliminar los contaminantes en la escorrentía.

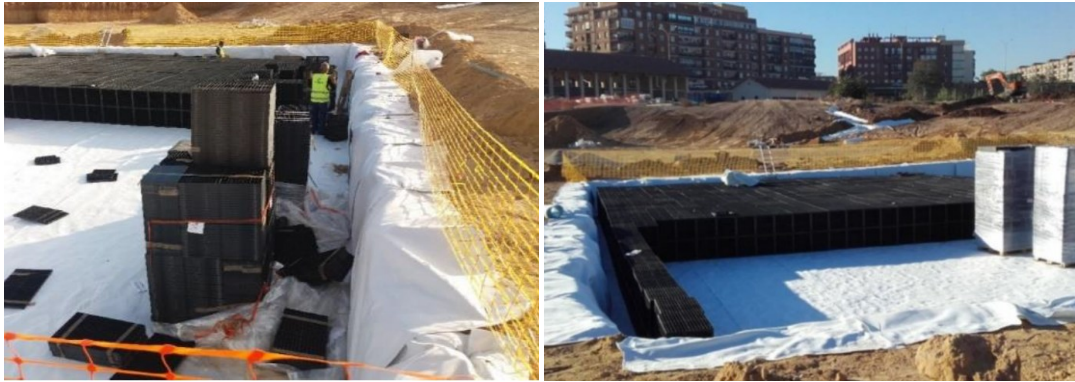


Figura 6. Ejemplo de depósito de infiltración en el Parc Central de València (Fuente: 6, p. 35 y 107).

2.4.3.3. Sistemas de captación y transporte

Actúan como primera etapa del tratamiento de la escorrentía en trenes de tratamiento. Su funcionamiento consiste en conducir las escorrentías de aguas pluviales hacia un punto de vertido/tratamiento y captar los sedimentos más gruesos que se arrastran.

Estos sistemas permiten los procesos naturales de filtración, infiltración, oxigenación, evaporación y almacenamiento. Existen 2 tipos principales: Subterráneos (drenes filtrantes) y Superficiales (cunetas verdes y franjas filtrantes).

➤ 7. Drenes filtrantes o drenes franceses

Son zanjas continuas recubiertas de un geosintético y rellenas de grava que captan y conducen las aguas pluviales. Estas zanjas pueden contar, además, con una tubería permeable embebida en el material granular para facilitar la circulación del agua en su interior. Estos sistemas son usados comúnmente para la captación y drenaje de las aguas pluviales en carreteras (Rodríguez Hernández, 2008).

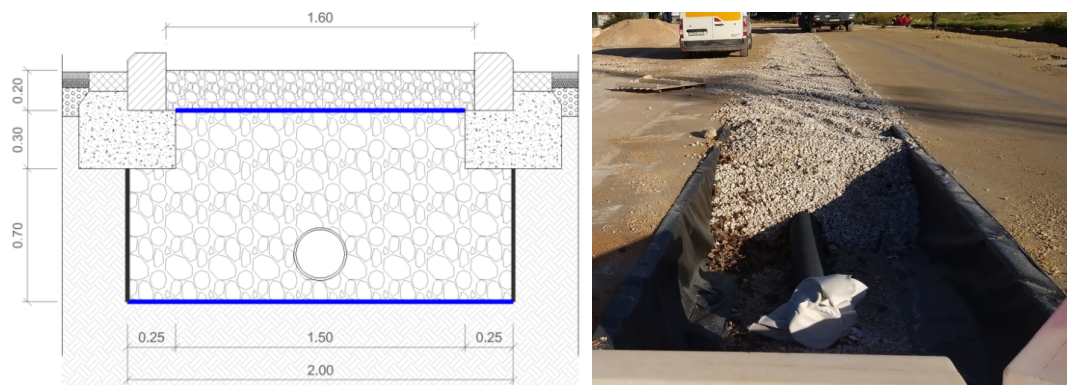


Figura 7. Zanja de infiltración en el Vial J de la localidad de Calp (Alicante), actualmente en construcción (Fuente: elaboración propia).

➤ 8. Cunetas verdes

Consisten en zanjas vegetadas o recubiertas de plantas que filtran, ralentizan y absorben el agua, promoviendo su infiltración en el suelo y reduciendo la carga sobre los sistemas de drenaje convencionales.

Se trata de una solución ecológica y económica que combina funcionalidad y estética, ideal para mitigar los impactos de la urbanización en el ciclo del agua. Sus principales características son:

- **Diseño natural:** Incorporan vegetación que mejora la calidad del agua al filtrar contaminantes como sedimentos, aceites y metales pesados.
- **Sostenibilidad:** Promueven la recarga de acuíferos y reducen la erosión del suelo.
- **Integración paisajística:** Se integran fácilmente en entornos urbanos y rurales como parte de parques, bordes de carreteras o zonas verdes.



Figura 8. Ejemplos de cunetas verdes (Fuente: 19, p. 315).

➤ 9. Franjas filtrantes

Son áreas de suelo ligeramente inclinadas cubiertas con una densa cobertura vegetal para interceptar la escorrentía urbana procedente de aparcamientos, calles y tejados. Están diseñadas para atrapar los sedimentos que arrastra la escorrentía, infiltrarla y, en menor medida, que las cunetas verdes, reducir su velocidad.

2.4.3.4. Sistemas de almacenamiento y laminación

Son los sistemas de tratamiento más empleados en la gestión de las aguas de escorrentía, pues permiten gestionar y laminar grandes cuencas en comparación con las técnicas descritas anteriormente. Por ello, algunos de estos sistemas serán los analizados en el presente trabajo en relación con la mejora de los sistemas de alcantarillado tradicional.

Este tipo de sistemas son comunes del final de línea del tren de tratamiento del drenaje urbano y su uso permite la reducción de caudales punta, la laminación del hidrograma de entrada a la red o infraestructura de saneamiento, el almacenamiento de la escorrentía durante un periodo de tiempo determinado y la mejora de la calidad del agua.

Según la presencia continua de la lámina de agua, estos sistemas de laminación pueden agruparse en (Rodríguez Hernández, 2008):

- Sin lámina permanente de agua: depósitos de detención.
- Con lámina permanente de agua: estanques de retención y humedales artificiales.

➤ 10. Depósitos de detención

En espacios superficiales abiertos estos sistemas se diseñan como una depresión vegetada en el terreno e integrada en el mismo. Se encuentran principalmente vacíos, salvo durante e inmediatamente después de un evento lluvioso. La función principal de estos depósitos es laminar las escorrentías, almacenándolas temporalmente y descargándolas controladamente, actuando como zona inundable y reduciendo los riesgos de inundación; complementariamente también pueden incorporar la función adicional de infiltración al terreno, lo que dependerá en gran medida de su permeabilidad y el nivel freático.



Figura 9. Ejemplos de depósitos superficiales de detención ubicados en Valencia: Alfafar (izquierda) y Paterna (derecha) (Fuente: elaboración propia).

Asimismo, durante los episodios secos estos sistemas se pueden emplear como zonas verdes, espacios de relación y estancia y, en general, infraestructura verde urbana, aunque han de estar convenientemente señalizados sobre el riesgo de inundación.

Para su diseño es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Capacidad de almacenamiento: Dimensionada según los patrones de lluvia y el área de captación. Tiempo de retención: Entre 24 y 48 horas.

- Tasa de descarga: Regulada para evitar sobrecarga en el sistema receptor.
- Pendientes y seguridad: Pendientes suaves para facilitar el acceso y garantizar la seguridad pública.
- Integración paisajística: Uso de plantas autóctonas para combinar función técnica con valor estético y ecológico.
- Tasa de infiltración: Se considera si se combina con técnicas de infiltración para recargar acuíferos.
- Separación de sólidos: Incorporación de áreas de sedimentación para prevenir la obstrucción de las salidas.



Figura 10. Vista general, planta y alzado de depósitos de detención superficiales abiertos vegetados (*Detention basins*) (Fuente: 19, p. 473 y 474).

Como alternativa a los anteriores, en particular, en zonas urbanas donde no se disponen de espacios abiertos para disponer este tipo de SUDS, se pueden disponer depósitos enterrados de detención o tanques de tormenta, en este caso no integrados en el terreno sino situados bajo el mismo, con lo que su función de mejora de la calidad del agua precisa, de forma complementaria, del tratamiento de las aguas recogidas en los fondos de estas infraestructuras en instalaciones de depuración de aguas, pues se trata de las primeras aguas de lluvia que tienen una alta carga de contaminación, en no pocos casos incluso mayor a la contaminación de las aguas residuales.



Figura 11. Ejemplos de tanques de tormenta existentes en Madrid (izquierda) y Alicante (derecha) (Fuente: Manual de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta²³, p. 19 y 32).

➤ 11. Estanques de retención

Son embalses superficiales y someros diseñados para tener una reserva permanente de agua que favorezca el crecimiento de vegetación acuática. La escorrentía que llega es retenida y tratada en una balsa de pretratamiento, hasta que un nuevo evento de lluvia la empuja a la balsa de nivel de agua permanente. En estos sistemas es clave el tiempo de retención en el pretratamiento, ya que suscita la eliminación de los contaminantes mediante la sedimentación y procesos de degradación biológica. Además, es importante que cuente con un mínimo de pendiente y/o corriente de agua, controlando la adecuada calidad del agua, concretamente en espacios residenciales densos.



Figura 12. Ejemplos de estanques de retención (Fuente: 19, p. 486 y 489).

➤ 12. Humedales artificiales

Esta tipología de SUDS incorpora los procesos naturales de filtración, absorción y descomposición de contaminantes que ocurren en los humedales naturales, siendo una

²³ COMÁS, Pau et al. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. *Manual de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta*. Septiembre 2014.

solución sostenible para la gestión del agua, en particular en lo referente a la mejora de su calidad antes de ser devuelta al medio natural, que combina funcionalidad y conservación del medio ambiente. Su diseño se asimila a las zonas pantanosas, con abundante vegetación característica y alternando zonas someras y profundas.



Figura 13. Ejemplos de humedales artificiales (Fuente: 19, p. 487 y 499).

La función principal es tratar las escorrentías de aguas pluviales urbanas, sin embargo, pese a que estos sistemas no están diseñados para proporcionar una laminación significativa, pueden proporcionar un almacenamiento temporal por encima del nivel de agua permanente.

2.5. Criterios para la elección de la tipología de SUDS

2.5.1. Según su función

Tal y como se ha dicho anteriormente, los SUDS se complementan con los sistemas de alcantarillado tradicional para gestionar las aguas pluviales, tratando de reproducir los procesos naturales del ciclo hidrológico mediante el cumplimiento de las siguientes funciones:

- Filtración (F): posibilitar el paso de la escorrentía a través de un medio filtrante que minimice la detención de partículas contaminantes.
- Detención (D): almacenar temporalmente la escorrentía superficial, reduciendo su caudal pico y favoreciendo, de forma complementaria, la sedimentación de partículas.
- Tratamiento (T): procesos para tratar la reducción de contaminantes.
- Retención (R): almacenar volúmenes de escorrentía superficial para su evapotranspiración, reutilización para otros usos (riego, incendio, agua de servicio, etc.) y/o posterior descarga laminada al medio receptor.
- Infiltración (I): del agua hacia el subsuelo para reducir la escorrentía superficial y recargar los acuíferos.

Los diferentes tipos de SUDS, referidos a las medidas estructurales relacionadas y detalladas en apartados anteriores del presente trabajo, cumplen de manera principal (P) y secundaria (S) las siguientes funciones:

TIPOS DE SUDS	FUNCIONES DE LOS SUDS				
	F	D	T	R	I
4. Superficies permeables	P				S
5. Pozos y zanjas de infiltración	S				P
6. Depósitos de infiltración		S			P
7. Drenes filtrantes o drenes franceses	P	S			
8. Cunetas verdes			P		S
9. Franjas filtrantes	P	S			
10. Depósitos de detención		P		S	
11. Estanques de retención		S	P		
12. Humedales artificiales		S	P		

Figura 14. Funciones asociadas a los distintos tipos de SUDS (Fuente: adaptación de *The SuDS Manual*, Ciria C753, 2015).

Como se observa en la tabla anterior, la función principal de los depósitos de detención es, de las 5 anteriores, la de detención, es decir, almacenar temporalmente la escorrentía superficial y reducir su caudal pico, a la par que se retrasa su aparición y se aumenta el tiempo de respuesta frente a inundaciones, mientras que en los depósitos de infiltración su función principal es la infiltración del agua hacia el subsuelo para reducir la escorrentía superficial y recargar los acuíferos, complementado con la detención de la escorrentía. La combinación de ambos resultaría en los depósitos o balsas de detención e infiltración (en adelante DBDI).

2.5.2. Según los usos del suelo

Aunque los usos del suelo pueden ser múltiples y variados, a efectos de drenaje muchos pueden agruparse en unas características concretas al presentar características comunes. En ese sentido, la Guía de València [6, p. 62 y ss] diferencia las siguientes categorías a efectos de establecer unos criterios para la elección de la tipología de SUDS:

- Centro histórico protegido (CHP). Zonas más antiguas de las ciudades caracterizadas fundamentalmente por presentar una malla densa de edificios, formas irregulares y tramas viarias estrechas, y pocos espacios abiertos, a excepción de plazas y jardines. Tráfico bajo o moderado.

- Ensanche (ENS). Primeras expansiones decimonónicas y de la primera mitad del s.XX de las ciudades, caracterizadas básicamente por disponer de edificaciones de mayores alturas y patios interiores, tramas viarias regulares y anchas, y mayores espacios abiertos, aunque generalmente escasos. Tráfico alto o muy alto.
- Edificación abierta (EDA). Expansiones de los núcleos urbanos de segunda mitad del s.XX en torno a los citados ensanches ENS de las ciudades, este tipo de zonas se caracterizan por presentar grandes bloques abiertos de viviendas, tramas viarias regulares y anchas, y gran cantidad de espacios libres. Tráfico moderado o alto.
- Viviendas unifamiliares (UFA). Expansiones de las ciudades de segunda mitad del s.XX en torno a zonas ENS y EDA, caracterizadas por baja densidad edificatoria, tramas viarias regulares y numerosos espacios libres. Tráfico bajo y lento.
- Zona Industrial (IND). Espacios amplios destinados a naves industriales y/o logísticas, altamente impermeabilizados y con gran presencia de contaminación viaria. Espacios abiertos periféricos. Tráfico moderado, lento y pesado.
- Zona Terciaria (TER). Espacios amplios destinados a usos productivos terciarios, altamente impermeabilizados y con elevada presencia de contaminación viaria. Zonas verdes y espacios abiertos periféricos Tráfico elevado y lento.
- Red Viaria (RV). Espacios públicos con un elevado índice de sellado del suelo, coeficiente de escorrentía unitario. Elevados índices de contaminación.
- Parques y Jardines (ZV). Espacios públicos con un índice moderado de sellado del suelo, oportunos para minimizar el coeficiente de escorrentía en los espacios urbanos y reducir los índices de contaminación.

De entre las diferentes clasificaciones actualmente disponibles en España se ha utilizado dicha clasificación, en primer lugar, por tratarse de la guía que abarca de forma más completa los tipos de usos urbanos más extendidos actualmente en España (según las 8 categorías antes relacionadas) y, en segundo, por poder utilizarse de forma más adecuada para caracterizar la elección de SUDS según la tipología de este tipo de sistemas adoptada en el presente trabajo.

Atendiendo a las características propias de cada una de estas 8 categorías urbanas, los diferentes tipos estructurales de SUDS pueden ser más o menos adecuados según la siguiente clasificación (Adaptación de la Guía básica para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la ciudad de València, 2015. [8, p. 72]):

TIPOS DE SUDS	CATEGORÍAS (USOS) DEL SUELO							
	CHP	ENS	EDA	UFA	IND	TER	RV	ZV
4. Superficies permeables								
5. Pozos y zanjas de infiltración								
6. Depósitos de infiltración								
7. Drenes filtrantes								
8. Cunetas verdes								
9. Franjas filtrantes								
10. Depósitos de detención								
11. Estanques de retención								
12. Humedales artificiales								

Figura 15. Relación entre usos del suelo y tipos de SUDS (Fuente: adaptación de la Guía de València, 2015).

2.6. Gestión de la calidad del agua: métodos de diseño

La gestión de la contaminación del drenaje urbano es la otra parte fundamental de los SUDS y, en consecuencia, debe tenerse en cuenta ya desde su diseño inicial. Por ello, se van a implantar soluciones de drenaje sostenible que permitan el cumplimiento de los objetivos planteados.

El tratamiento de la calidad de la escorrentía se lleva a cabo en los SUDS mediante procesos de sedimentación, filtración, biorremediación, etc. incorporados en los distintos tipos de soluciones disponibles, generalmente complementarios entre sí y que, de cara a obtener unos resultados de calidad mayores, trabajan de forma conjunta.

La reducción de volúmenes de escorrentía en el caso de los procesos de infiltración puede necesitar previamente, si la escorrentía superficial está muy cargada de contaminantes (como así suele ser en las zonas urbanas), de un tratamiento que evite la contaminación de suelos y acuíferos. En este sentido, por la extensión en su uso destaca la metodología de Ciria, que en su manual c753 propone en su capítulo 26 diversos métodos para la gestión de riesgos de contaminación, entre los que están los métodos cualitativos (que utilizan índices de niveles probables de contaminación y capacidades de desempeño de los diferentes tipos de SUDS disponibles) de enfoque de índice simple, desarrollado a partir de lo establecido en la publicación de ELLIS, J. Bryan, et al²⁴. Los pasos básicos de esta metodología son los siguientes:

²⁴ ELLIS, J. Bryan, et al Lian. *An impact assessment methodology for urban surface runoff quality following best practice treatment*. Science of the Total Environment, 2012, vol. 416, p. 172-179.

1. Asignar índices de peligrosidad de contaminación adecuados para el uso de suelo propuesto, según la siguiente figura 16.
2. Seleccionar SUDS con un índice total de mitigación de la contaminación que iguale o supere el índice de peligrosidad de contaminación, según la figura 17.
3. Cuando la descarga se realice en aguas superficiales o subterráneas protegidas, considerar la necesidad de un enfoque más restrictivo.

Cuando estos índices de mitigación se comparan con los índices de peligrosidad de contaminantes, se puede estimar qué tipos de SUDS serían necesarios para realizar un tratamiento adecuado en una ubicación concreta:

Usos del suelo	(1) ²⁵	(2)	(3)	(4)
Tejados o cubiertas residenciales.	Muy bajo	0.2	0.2	0.05
Otros tejados o cubiertas (zona comercial/industrial)	Bajo	0.3	0.2 ²⁶	0.05
Accesos a propiedades individuales, aparcamientos residenciales, carreteras de poco tráfico (p. ej., calles sin salida, zonas residenciales y carreteras de acceso general) y aparcamientos no residenciales con cambios poco frecuentes (p. ej., escuelas, oficinas), es decir, < 300 movimientos de tráfico/día	Bajo	0.5	0.4	0.4
Patios comerciales y áreas de entrega, estacionamiento de automóviles no residenciales con cambios frecuentes (p.ej., hospitales, tiendas minoristas), todas las carreteras excepto las de poco tráfico y las carreteras/autopistas troncales	Medio	0.7	0.6	0.7
Lugares muy contaminados (p.ej., patios de transporte, parques de camiones, accesos de camiones muy frecuentados a polígonos, vertederos), lugares donde se entregan, manipulan, almacenan, utilizan o fabrican productos químicos y combustibles (distintos del fueloil doméstico); industrias; carreteras y autopistas	Alto	0.8	0.8	0.9

Figura 16. Índices de peligrosidad de contaminación para diferentes usos del suelo
(Fuente: Ciria c753, capítulo 26).

²⁵ Nota: (1) Nivel riesgo de contaminación. (2) Total de sólidos suspendidos. (3) Metales. (4) Hidrocarburos.

²⁶ Hasta 0,8 donde exista potencial para metales para lixiviar desde la cubierta.

Añadir, asimismo, que cuando el índice de mitigación de una tipología individual de SUDS sea insuficiente serán requeridas dos (o más) tipologías en serie hasta alcanzar el índice de peligrosidad precisado, pero aplicando la siguiente relación (se utilizará un factor de 0,5 para considerar la reducción en rendimiento de los componentes secundarios y terciarios de los sistemas de mitigación):

$$\text{Índice de mitigación total de SUDS} = \text{Índice de mitigación} + 0,5 (\text{Índice de mitigación})$$

Tipología de SUDS	(2)	(3)	(4)
4. Superficies permeables	0.7	0.6	0.7
5. Pozos y zanjas de infiltración	0.5	0.4	0.4
6. Depósitos de infiltración	0.6	0.5	0.6
7. Drenes filtrantes	0.5	0.4	0.4
8. Cunetas verdes	0.5	0.6	0.6
9. Franjas filtrantes	0.5	0.4	0.4
10. Depósitos de detención	0.5	0.5	0.6
11. Estanques de retención	0.5	0.5	0.6
12. Humedales artificiales	0.8	0.8	0.8

Figura 17. Índices indicativos de mitigación de SUDS para vertidos a aguas superficiales (Fuente: Ciria c753, capítulo 26, adaptado).

2.7. Depósitos o balsas de detención (e infiltración)

2.7.1. Criterios de dimensionamiento de DBDI. Consideraciones previas

Los DBDI son infraestructuras eficaces para paliar los efectos de los vertidos ocasionados por las escorrentías urbanas en tiempo de lluvia al medio receptor, en particular, por la laminación del caudal que consiguen estos sistemas. Su uso está hoy en día bastante extendido; sin embargo, existe una gran dispersión de directrices, normas y guías de diseño, algunas de ellas incluso obsoletas, para la determinación del volumen óptimo de almacenamiento, que generalmente no considera la función secundaria de infiltración, al menos, para realizar el dimensionamiento del volumen.

No en vano, en el diseño de estas infraestructuras se dan una serie de condicionantes locales que tienen una gran influencia en el desarrollo de dichas metodologías, redundando en la dificultad de dotarlas de un carácter universal. La caracterización estocástica del régimen de lluvia, fenómeno inicial del proceso, es la que condiciona fundamentalmente el desarrollo de un determinado método, ya sea este probabilístico, de evento tipo, de simulación continua o

una versión simplificada derivada de alguno de los anteriores. Así, aunque el planteamiento metodológico pueda seguir ciertas pautas generales, su desarrollo, y por supuesto los resultados obtenidos, no son generalizables para cualquier caso y situación que se analice.

Las características particulares de los DBDI hacen que los métodos de dimensionamiento de estas estructuras, en cuanto al cálculo de su volumen, sigan hoy sin estar estandarizados. En cualquier caso, este tipo de SUDS presentan una serie de aspectos únicos:

- a) Las características del medio suelen ser muy específicas. Aunque existan unas directrices generales para el diseño de los sistemas de alcantarillado y los DBDI que los complementan, el hecho es que cada sistema es único y presenta sus propias singularidades, redundando esto en las posibilidades de establecer en la misma depósitos de detención de características muy diferenciadas.
- b) El origen del problema es intermitente y con una gran variabilidad puesto que depende, por una parte, de un proceso estadístico (la ocurrencia de los eventos de lluvia) y, por otro lado, de un proceso estocástico (la acumulación y lavado de contaminantes en la superficie de la cuenca y en la propia red).
- c) Las bases del dimensionamiento y diseño continúan sin estar estandarizadas, aunque como se verá posteriormente, en los últimos años sí se presentan unas tendencias generales en lo que se refiere al dimensionamiento preliminar de estos sistemas, que en muchas ocasiones es suficiente para la determinación final del volumen a tratar.
- d) No existen bases de datos consistentes para la validación de los resultados, sobre todo en lo que respecta a las cuestiones relativas a la contaminación.

2.7.2. Metodologías existentes para el dimensionamiento

Todo lo anterior hace que a día de hoy se hayan desarrollado diversas metodologías para la determinación del volumen adecuado de un depósito de detención, sobre todo durante los últimos 20 años, para alcanzar el objetivo principal del control de la laminación y contaminación de aguas procedentes del drenaje urbano. A continuación, se enunciarán las diversas metodologías existentes, aglutinándolas en las cuatro tipologías siguientes:

- a) Métodos probabilísticos, cuyo punto de partida es la caracterización estadística de los parámetros fundamentales del proceso de precipitación. A partir de estos parámetros se obtienen distribuciones derivadas, como volúmenes de escorrentía y masas de contaminante generados, vertidos y retenidos.

- b) Métodos de eventos tipo generados a partir del análisis de las relaciones entre las variables implicadas (volúmenes, intensidades, duraciones) en el proceso y su frecuencia de ocurrencia o periodo de retorno.
- c) Simulación continua del proceso hidrológico e hidráulico con el objetivo de analizar en detalle y, a ser posible, también en tiempo real durante los episodios de lluvia, el comportamiento de la solución de drenaje sostenible planteada, mediante su monitorización continua.
- d) Métodos simplificados, generalmente derivados de alguno de los anteriores, que se convierten en “reglas prácticas” de fácil aplicación.

A las que habría que añadir una quinta tipología de métodos empíricos y normativas, generalmente simplificaciones basadas en las ideas centrales de los métodos probabilísticos y/o de eventos tipo, y que dan unas directrices para el dimensionamiento volumétrico de los DBDI. Este tipo de dimensionamiento es actualmente el más extendido en las diferentes normas y guías que se han desarrollado en las últimas décadas, también en España, y son fruto de la experiencia acumulada en la construcción de este tipo de SUDS, por lo que en posteriores apartados se profundizará en estos métodos de dimensionamiento volumétrico.

2.7.3. Diseño y dimensionamiento de DBDI en España

En España, el diseño de DBDI está actualmente regulado por diferentes normativas y guías técnicas que se adaptan a las condiciones regionales y/o locales. Además, se utilizan metodologías hidrológicas estándar combinadas con criterios específicos de regulación establecidos en documentos oficiales. Las principales son:

1. Normativa y referencias específicas:

- Código Técnico de la Edificación (CTE): En el Documento Básico HS-5: "Drenaje de aguas", se establecen requisitos generales sobre la gestión de aguas pluviales en proyectos urbanos.
- Normas Hidrológicas de Confederaciones Hidrográficas: Las confederaciones (por ejemplo, la del Tago o el Ebro) suelen incluir recomendaciones para calcular el volumen de retención necesario para el control de caudales máximos vertidos a los cauces naturales.

- Normas Urbanísticas: Algunos municipios (y también comunidades autónomas, como la Comunidad de Madrid) han desarrollado manuales y guías técnicas que dictan los criterios de diseño para infraestructuras de drenaje sostenible.

2. Métodos utilizados en España

a. Hidrograma Unitario

- Basado en los caudales generados por tormentas de diseño específicas para el área analizada.
- Periodos de retorno entre 10-50 años para entornos urbanos.
- Los datos pluviométricos se extraen de estaciones meteorológicas oficiales (AEMET) o curvas IDF locales.

b. Método Racional Modificado

- Ampliamente utilizado para pequeñas y medianas áreas.
- En combinación generalmente con programas informáticos especializados, se dispone de normativa muy contrastada (por ejemplo, la norma 5.2 - IC drenaje superficial²⁷) para evaluar el caudal (para un determinado periodo de retorno) del área a drenar.

c. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

- Complementado a los sistemas de alcantarillado tradicionales.
- Actualmente se disponen de numerosas directrices o guías, como las documentadas en el presente trabajo.

d. Método de Balance de Masas

- Basado en el principio de conservación de la masa, se emplea para optimizar el diseño de depósitos regulando el flujo hacia los cauces receptores.
- Los organismos de cuenca suelen establecer los caudales de salida máximos permisibles, en función del área de captación y las características de los cauces.

²⁷ Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. «BOE» núm. 60, de 10/03/2016. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-2405>. U.A.V. 02/02/2025.

3. Consideraciones pluviométricas: Los datos de precipitación se obtienen de:

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET): Proporciona datos de lluvia máxima en diferentes periodos, a partir de la red de pluviómetros existente.
- Mapas de Isoyetas: Permiten obtener intensidades de lluvia para diferentes periodos de retorno.
- Curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia) fundamentales para los cálculos hidrológicos, caracterizan la intensidad de la lluvia en función de su duración y su periodo de retorno.

4. Normas y criterios locales: En algunos casos, los municipios, comunidades autónomas y las confederaciones hidrográficas establecen condiciones específicas:

- Caudal de salida: Se limita en función de las capacidades del sistema receptor.
- Métodos de diseño volumétrico: En zonas con riesgo de inundación, el volumen puede sobredimensionarse para garantizar la seguridad.
- Retención e infiltración: En zonas urbanas densas, el diseño puede incluir depósitos combinados con áreas de infiltración para reducir la carga en sistemas de drenaje.

2.7.4. Criterios de diseño

El uso de SUDS requiere un diseño cualificado para que la cadena de gestión del agua funcione correctamente. La elección y el diseño de estos sistemas de drenaje depende de los condicionantes del entorno: la permeabilidad del terreno, la morfología y la climatología del lugar, el estado del acuífero y la calidad del agua recibida [1, p. 40].

En España existen diferentes guías (véanse las referencias bibliográficas [1], [28], [6], [29], [30], [31], [32] y [33]) que definen unos criterios de diseño para las diferentes tipologías de SUDS, en particular, para los DBDI analizados en el presente caso. A continuación, se describen los criterios fijados por las diferentes guías existentes, con un resumen final o compendio.

2.7.4.1. Guías de adaptación al riesgo de inundación: SUDS [1]

En esta publicación se establecen los criterios de diseño y dimensionamiento de cualquier tipo de SUDS diferenciándolos según su localización en la península, considerando para ello las siguientes zonas climáticas:

- Zona A: Precipitaciones frecuentes y constantes de intensidad media-baja. Riesgo medio de inundaciones. Temperaturas medias y bajas. Esta climatología se da predominantemente la zona norte del país.
- Zona B: Precipitaciones estacionales. Periodos secos y periodos lluviosos continuados. Riesgo medio de inundaciones. Humedades bajas y temperaturas medias y bajas. Este clima corresponde a las zonas interiores de la península.
- Zona C: Lluvias esporádicas y de gran intensidad. Episodios de torrencialidad y elevado riesgo de inundaciones, desertificación y sequía. Temperaturas medias y altas y humedad elevada. Climatología predominantemente en la zona del mediterráneo.

De modo orientativo, se puede simplificar la clasificación de las zonas climáticas en España según el siguiente esquema:

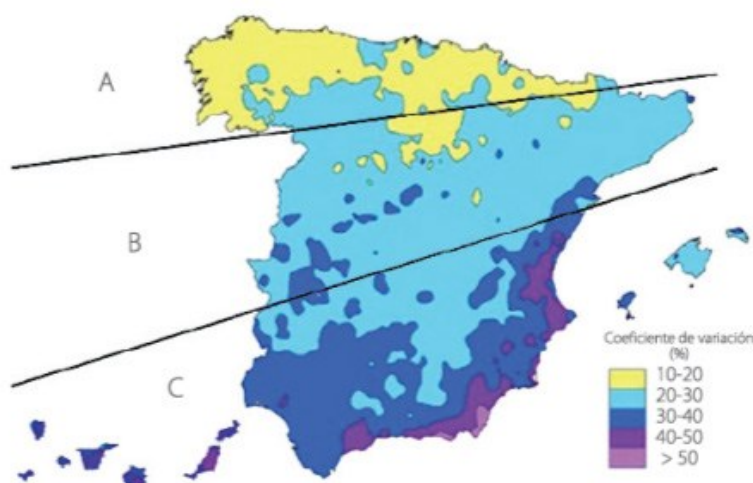


Figura 18. División geográfica según climatología y variación de la precipitación. Figura desde mapa de torrencialidad, AEMET (Fuente: 1, p. 41).

En la zona climática A destaca la idoneidad de estanques y humedales artificiales como sistemas de almacenamiento. Necesitan una cantidad considerable de agua y unas condiciones favorables para la proliferación de la vegetación y la fauna autóctona.

En la zona B se recomiendan los estanques de retención, que también incorporan una lámina permanente de agua, pero las necesidades hídricas son menores que las de los humedales.

En la zona climática C, con clima cálido y precipitaciones torrenciales, se utilizarán preferentemente sistemas de almacenamiento que no incorporen láminas de agua expuestas a la intemperie. Se recomienda utilizar depósitos de detención, preferentemente enterrados. En

caso de utilizar sistemas de almacenamiento en superficie, se recomienda que sean de poca profundidad para que la infiltración y la evaporación sea mayor.

En todos los casos se recomienda el escalonamiento del depósito, ya que ayuda a concentrar la cantidad de agua existente y contribuye a la seguridad de animales y usuarios.

En ningún caso se pueden utilizar humedales o láminas de agua naturales como almacenamiento de la escorrentía urbana, ya que podría contaminarla y afectar negativamente al ecosistema y al acuífero.

En todos los sistemas será necesario disponer aliviaderos y desagües para evacuar rápidamente el agua en caso de que se supere la capacidad máxima del almacenamiento.

Zona climática	Estanque de retención	Depósito de detención	Humedales artificiales
A	Lámina permanente de agua 50% del volumen óptimo	Volumen de agua permanente = volumen óptimo	Humedales poco profundos de detención extendida
B	Volumen de agua permanente = volumen óptimo	Combinarlos con estanques	Dimensiones más reducidas
C	Se recomienda utilizar otros sistemas de almacenamiento	Sistema óptimo enterrado. Varios desagües y aliviaderos	Se recomienda utilizar otros sistemas de almacenamiento

Figura 19. Criterios de diseño de SUDS de almacenamiento de agua (Fuente: Tragsatec, extraído de 1, p. 48).

➤ Diseño de estanques y balsas de detención e infiltración

En estos sistemas la lámina de agua es permanente, por lo que en su entorno precisan una distancia de seguridad mínima de 3 m, donde además la pendiente no supere el 2%. Se aconseja aprovechar esta franja para incorporar un sistema de filtrado previo. En el interior del estanque, con agua permanente, la pendiente no debe superar el 7%, mientras que en la zona prevista para acumular agua adicional de lluvia se puede llegar hasta un 25% de pendiente.

Las proporciones largo-ancho deben ser entre 3:1 y 5:1. La profundidad máxima de agua permanente no debe superar los 2 m. La altura disponible para almacenar agua de lluvia debe ser, como mínimo, de 1 m. Es necesario incorporar uno o varios desagües, así como sistemas de emergencia para evacuar rápidamente el agua en caso de que se sobrepase la capacidad del estanque. Estos sistemas de evacuación del agua deben estar dentro de una zanja o arqueta de fácil acceso para mantenimiento.

En los estanques de detención existe un volumen óptimo de agua con el que las condiciones son idóneas para la vegetación existente. En las zonas tipo A donde las precipitaciones son continuas, se recomienda utilizar estanques de retención en los que la cantidad permanente de agua sea aproximadamente del 50% del volumen óptimo. Las lluvias continuadas aumentarán la cantidad de agua hasta los valores recomendables durante la mayor parte del tiempo.

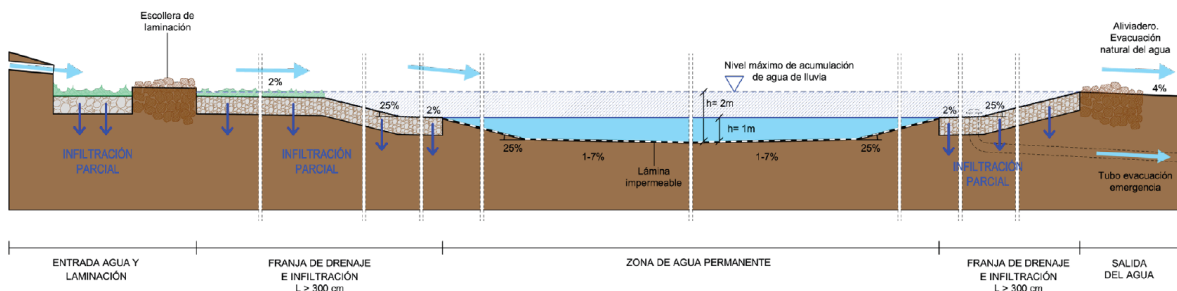


Figura 20. Esquema estanque de detención e infiltración (Fuente: 1, p. 48).

En las zonas climatológicas de tipo B es aconsejable utilizar estanques en los que la cantidad de agua permanente coincida con el volumen de óptimo. En la zona C es más adecuado un sistema de almacenamiento en el que no exista una cantidad permanente de agua, ya que podría evaporarse en los periodos de sequía. Para esta climatología se aconseja utilizar depósitos de detención enterrados.

➤ Diseño de depósitos de detención e infiltración (DBDI)

Los depósitos de detención superficiales deben tener una profundidad máxima de 2 m y unas pendientes máximas del 25% por motivos de seguridad. Es conveniente tener en cuenta en el diseño que gran parte del tiempo el depósito estará vacío y será utilizado como zona de juegos o de esparcimiento, aparcamiento, o terreno de juego para deporte. Por este motivo se recomienda que la profundidad se consiga de manera escalonada y con pendientes tendidas, siguiendo los criterios de seguridad de las zonas de juego y recreativas.

Se recomienda que la proporción largo-ancho esté entre 2:1 y 5:1. La pendiente mínima en la base debe ser del 1% en dirección al desagüe. Es necesario disponer de un elemento de drenaje y filtrado previo a la entrada del agua en el depósito, por lo que conviene disponer una franja filtrante alrededor del depósito. Si el terreno es permeable conviene colocar una lámina de impermeabilización. Es necesario incorporar uno o varios desagües, así como sistemas de emergencia para evacuar rápidamente el agua en caso de que se sobrepase la capacidad del depósito. Estos sistemas de evacuación del agua deben estar dentro de una zanja o arqueta de fácil acceso para mantenimiento.

En la zona A es conveniente disponer grandes áreas de filtración en las proximidades del depósito. En estos climas se necesitan volúmenes mayores de almacenamiento. Se aconseja disponer áreas de tratamiento de las aguas mediante vegetación.

En la zona B se pueden utilizar DBDI con menor capacidad volumétrica. En estos climas es conveniente combinar los DBDI con zonas de estanques o humedales artificiales.

En la zona C es preciso disponer una zona previa de recogida de agua al final de los elementos de canalización y transporte, desde la cual se vierta el agua al depósito gradualmente. Conviene instalar varios puntos de desagüe e incorporar una derivación alternativa (bypass) y aliviaderos para poder evacuar el agua en caso de que se supere la capacidad del depósito. Los espacios del DBDI se pueden utilizar como zonas de juego, áreas recreativas o de deportes en los periodos de sequía. Si el acuífero y terreno lo permite, pueden infiltrar el agua al terreno.

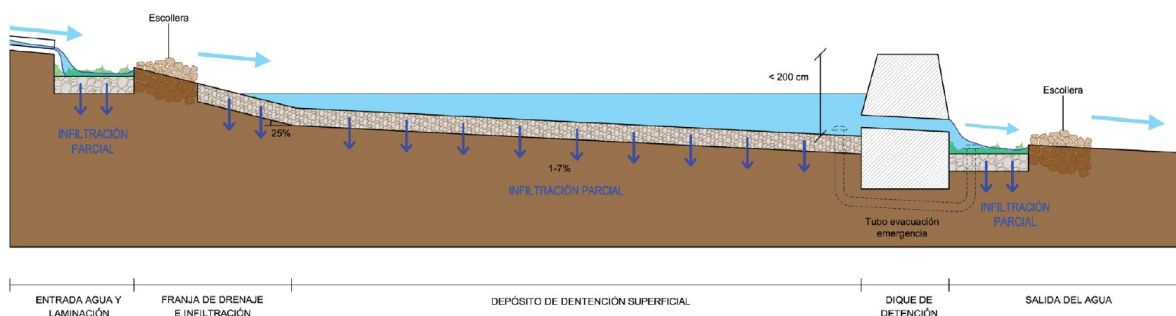


Figura 21. Esquema de depósito de detención e infiltración (Fuente: 1, p. 49).

Cuando no se dispone de terreno en superficie, o el entorno no permite una estructura a cielo abierto, los DBDI se colocan enterrados. Esta también es una buena solución en la zona climatológica C. Con este sistema se evita la aparición de insectos y la evaporación. Además, se pueden alcanzar profundidades mayores, de hasta 6 m, ya que no existe riesgo de caída.

En los depósitos enterrados se debe asegurar la estabilidad estructural propia y del terreno, teniendo en cuenta las sobrecargas que se pueden producir en los distintos estados del depósito (lleno - vacío). En su dimensionamiento hay que considerar el peso del terreno situado por encima del depósito y las sobrecargas probables por uso (coches, maquinaria, tránsito, etc.).

2.7.4.2. Guía básica de diseño de Madrid [28]

La Guía básica de diseño de Madrid²⁸ no establece unos criterios de diseño concretos.

²⁸ CHECA SÁNCHEZ, María Soledad, et al. *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres*. Ayuntamiento de Madrid, 2021.

2.7.4.3. Guía básica de diseño de la Ciudad de València [6]

La geometría de la balsa puede dividirse en 2 vasos para concentrar la sedimentación en uno de ellos (lo que facilita las labores de mantenimiento). Las pendientes máximas en los laterales son 3H:1V y la relación longitud/ancho suele estar entre 3:1 y 5:1. Debe considerarse el acceso sencillo para mantenimiento. La base de las balsas de infiltración debe ser plana, mientras que las de detención deben incluir una ligera pendiente hacia la salida. Los calados en las balsas suelen ser superiores a los 0,50 m, y es aconsejable dejar un resguardo de 0,30 m.

La entrada de agua debe incluir elementos de disipación de energía que impidan la erosión. También se puede considerar un pretratamiento que minimice los requisitos de mantenimiento de la balsa y mejore su eficiencia de eliminación de contaminantes.

En cuanto a la salida del agua, en el caso de las balsas de detención se recomienda emplear válvulas de vórtice en el caso de que el conducto requerido para la laminación sea muy pequeño y genere riesgo de obstrucción. También es importante instalar una rejilla que evite la entrada de sólidos gruesos que puedan obturar el conducto, y elementos de disipación que dificulten la erosión. En el caso de las balsas de infiltración, su implantación es recomendable en terrenos con permeabilidades superiores a 10^{-6} m/s, con distancias superiores a 1 m con respecto al nivel freático. En todos los casos deben incluirse estructuras de alivio que permitan evacuar controladamente el exceso de escorrentía cuando se alcance cierto nivel de servicio.

La vegetación en las balsas debe estar adaptada a las condiciones de encharcamiento y ser preferiblemente autóctona. En los taludes de la balsa se puede incluir vegetación que sirva de pretratamiento de la escorrentía. En la base es preferible que la vegetación sea densa por su capacidad filtrante y para evitar la erosión y el lavado de la base de la balsa.

2.7.4.4. Recomendaciones básicas en Navarra [29]

La publicación navarra²⁹ no establece unos criterios de diseño concretos.

2.7.4.5. Guía básica de diseño para el término municipal de Azuqueca de Henares [30]

Esta guía³⁰ tampoco establece unos criterios de diseño concretos.

²⁹ BERROZPE ULLATE, Gregorio, et al. *Recomendaciones básicas. Diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en Navarra*. Gobierno de Navarra. Consejería de Cohesión Territorial. Febrero 2023.

³⁰ PERALES MOMPALER, Sara, et al. *Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para el término municipal de Azuqueca de Henares*. Ayuntamiento de Azuqueca de Henares, septiembre de 2023.

2.7.4.6. Guía técnica de la ciudad de Barcelona [31]

Atendiendo a esta guía de la ciudad de Barcelona³¹, los depósitos de detención (enterrados y sin función secundaria de infiltración) se construyen sobre una superficie que ha de estar impermeabilizada, puesto que estas estructuras no están concebidas para su infiltración al terreno. Estos depósitos son secos, por lo tanto, no tienen una lámina de agua permanente. Los depósitos de detención pueden ser:

- Superficiales (tipos balsa). Tienen como función principal frenar y almacenar la escorrentía superficial. La profundidad recomendada es de 1 a 3 m, y las pendientes laterales tienen que ser suaves (inferiores al 25%) por criterios de seguridad y mantenimiento. Estos depósitos se pueden utilizar para usos de recreo cuando están secos. La pendiente mínima de la base tiene que ser del 1% aproximadamente en dirección al punto de desagüe.
- Enterrados (de hormigón o plástico). Adecuados cuando no se dispone del espacio suficiente para su disposición en superficie, o en zonas urbanas consolidadas. El más habitual es utilizar celdas reticulares con un elevado índice de huecos (> 90%). Los depósitos enterrados se pueden colocar bajo una capa de vegetación o bien bajo una capa de gravas.

Por su parte, el tubo de desagüe de este tipo de depósitos ha de cumplir estas especificaciones:

- En el caso que el depósito desagüe a otro dispositivo o al medio, el tubo de desagüe tiene que ser de PVC tipo SN-4, con un diámetro mínimo de 300 mm, y envuelto con un dado de 10 cm de arenas.
- En el caso que el depósito desagüe en la red de alcantarillado, el tubo de desagüe tendrá que ser de PVC tipo SN-4, con un diámetro mínimo de 400 mm, y envuelto con un dado de hormigón HM-20 de 10 cm de grosor.
- El tubo tiene que ser registrable a su inicio, final y en los cambios de dirección en planta, para permitir la realización de las tareas de limpieza y mantenimiento.
- La pendiente mínima del tubo de desagüe tiene que ser superior 1%, siendo la pendiente óptima del 1,5-2%.

³¹ BADIA CASAS, Eloi, et al. *Guia tècnica per al disseny de sistemes de drenatge urbà sostenible SUDS*. Ajuntament de Barcelona, Medi Ambient i Serveis Urbans. Ecologia Urbana, abril de 2020.

2.7.4.7. *Guía básica de diseño para el término municipal de Castelló de la Plana [32]*

La guía elaborada para el término municipal de Castelló de la Plana³² establece los siguientes criterios de diseño fundamentales:

- La permeabilidad del terreno debería ser $< 10^{-6}$ m/s para evaluar la balsa de detención (BD), pues si es mayor se aconseja una balsa de infiltración (BI).
- BI: Considerar con una distancia mínima de 1 m entre la base del sistema y el nivel freático.
- BD: Para áreas impermeables de superficie < 3 Ha, la sección del conducto de salida puede tener que ser muy pequeña para atenuar los caudales, aumentando el riesgo de su obstrucción. En ese caso considerarán elementos de control de flujo especiales (p. ej. válvulas de vórtice).
- El diseño en planta podría contar con ondulaciones para generar un aspecto más natural. Se podría dividir la balsa en dos vasos, reservando el primero para la acumulación de sedimentos.
- En general, pendientes laterales $\leq 3H:1V$. Relación longitud/ancho entre 3:1 y 5:1.
- El pretratamiento puede ser necesario para aumentar el rendimiento de eliminación de sedimentos gruesos y sus contaminantes asociados, lo que disminuiría los requisitos de mantenimiento e incrementaría la vida útil de la balsa.
- Las entradas a las balsas deben estar protegidas de la erosión mediante dissipadores de energía (p. ej. con gravas). En la BD la zona de salida también debería estar protegida.
- BI: La base de la balsa debe ser lo más horizontal posible para asegurar que la escorrentía se distribuye uniformemente (tolerancia de la base: 10 mm en 3 m).
- BD: La base de la balsa debería contar con una ligera inclinación (no mayor al 1%) hacia el conducto salida, para maximizar el contacto entre la escorrentía y la vegetación, pero prevenir el estancamiento de agua.

³² PERALES MOMPALER, Sara, et al. *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el término municipal de Castelló de la Plana*. Ayuntamiento de Castelló de la Plana, noviembre 2021.

- BD: La ubicación de la entrada y salida del agua deben ser emplazadas de modo que se maximice la estancia del agua, pues los beneficios de calidad del agua aumentan conforme el tiempo de residencia en la balsa aumenta.
- BD: Conducto de salida con rejilla para retener sólidos gruesos y evitar su obturación.
- BD: El mínimo espesor de lámina de agua a detener suele ser de 0,20 m.
- Requiere de una estructura de alivio para evacuar controladamente el exceso de esorrentía una vez se alcance la altura de almacenamiento de diseño.
- Las fluctuaciones de la lámina de agua deben ser evaluadas y controladas para no afectar al funcionamiento de los elementos colindantes. Se aconseja un resguardo sobre la lámina de agua superficial de 0,30 m.
- Es necesario proveer de un acceso adecuado para las labores de mantenimiento.
- La vegetación seleccionada debería adaptarse a las condiciones del lugar, siendo preferibles las especies autóctonas. Es aconsejable que sea densa para impedir la erosión y el lavado de la base de la balsa y minimizar el riesgo de colmatación e impermeabilización en el caso de las BI.

2.7.4.8. Guía básica de diseño en el término municipal de Murcia [33]

Esta guía de la ciudad de Murcia³³ establece, en cuanto a la geometría de la balsa, que se optará por dividir el sistema en dos vasos intercomunicados, facilitando, además de la sedimentación de sólidos y contaminantes, las labores de mantenimiento. La conexión entre vasos contará con elementos de disipación de energía, tales como gravas u otras soluciones similares, para evitar la erosión de las paredes del talud. Las pendientes de los taludes perimetrales serán inferiores de 3H:1V. Respecto a la sección transversal de la balsa, la relación entre la longitud/ancho debe ser entre 3:1 y 5:1. Además, se deberá considerar un acceso sencillo y práctico para poder realizar convenientemente el posterior mantenimiento.

En referencia a la pendiente de la superficie del sistema, para balsas de infiltración se buscará una base lo más plana posible para facilitar la infiltración de agua al terreno, en cambio, para balsas de detención se inclinará ligeramente la pendiente hacia el punto de salida para optimizar la evacuación de agua. En cuanto al calado de la balsa, se considerará un mínimo de

³³ BLANCO BARQUERO, Juan Antonio, et al. *Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el término municipal de Murcia*. Ayuntamiento de Murcia / Aguas de Murcia, diciembre 2023.

0,5 m de profundidad desde la coronación del sistema hasta la base. Adicionalmente, y siempre que sea posible, se dejará un resguardo de seguridad de 0,30 m entre el volumen máximo de diseño y la coronación de la balsa.

La entrada de agua dispondrá de elementos de disipación de energía, tanto en los puntos de entrada como en el transvase de agua de un vaso a otro, si se prevé un resalto hidráulico o velocidades que puedan erosionar el sistema.

En cuanto a la salida del agua, y para las balsas de detención, se optará por colocar válvulas de vórtice si el conducto para laminación se considera reducido, evitando así su posible obstrucción. Adicionalmente, el punto de salida deberá contar con una rejilla para la captación de sólidos gruesos y elementos de disipación de energía. Se priorizará la construcción de una balsa de infiltración siempre que la permeabilidad del suelo sea mayor que 10^{-6} m/s, con una distancia mínima de 1 m respecto a la superficie del nivel freático. Por otra parte, dichos SUDS contarán con elementos de rebose, y un aliviadero de emergencia si se prevén eventos de lluvia que puedan producir inundaciones.

Respecto a la vegetación, se buscarán ejemplares adaptados a períodos secos, húmedos y de anegamiento temporal, priorizando la elección de especies autóctonas que cumplan dichos criterios. Se considerará incluir vegetación en los taludes de la balsa para mejorar el pretratamiento y velocidad de la escorrentía e incorporar una elevada densidad de vegetación en la base. De esta forma, se mejorará la capacidad fitodepuradora del sistema y se evitará la erosión de la superficie de la balsa.

2.7.4.9. Compendio de los criterios de diseño de DBDI según las principales guías españolas

De las 8 guías de diseño de SUDS disponibles actualmente en España únicamente 5 incorporan criterios de diseño específicos para DBDI, siendo los más completos y detallados los de la guía elaborada en octubre de 2019 por el Ministerio para la Transición Ecológica [1]. No obstante, en función de dónde se ubique el DBDI es necesario complementar dichos criterios con los de aquellas guías más cercanas de entre las otras 7 disponibles, en tanto que el diseño de este tipo de sistemas de drenaje depende en gran medida, entre otras cuestiones, de la climatología propia del lugar.

Como resumen de todo lo anterior, se incluye una tabla con los principales criterios de diseño de los DBDI según la normativa española:

Geometría	Se puede disponer en 2 vasos para concentrar la sedimentación en el primero
Profundidad máxima	2 m (y escalonada). 6 m en enterrados
Calados mínimos	50 cm (y resguardo de 30 cm)
Pendientes máximas (taludes)	3H:1V. 25%
Pendientes mínimas (base)	1%
Dimensiones (proporción largo/ancho)	2:1 a 5:1
Entradas de agua	Incorporar elementos de disipación de energía para evitar la erosión.
Tratamientos previos	Disponer una franja filtrante alrededor
Sistemas de desagüe	Sí. Con válvulas de vórtice y rejillas. Tubos $\Phi > 400$ mm, pendiente $> 1\%$, registrables
Sistemas de emergencia	Para evacuar rápidamente el agua en caso de que se sobrepase la capacidad del depósito
Infiltración al subsuelo	Sí, si el acuífero lo permite. Distancia mínima de 1 m al nivel freático.
Disposición enterrada	Recomendable en zonas secas para evitar proliferación de mosquitos y evaporación.
Usos complementarios	Zona de juegos o esparcimiento, terreno de juego para deporte, aparcamiento, etc.
Vegetación	Adaptada a condiciones de encharcamiento y preferiblemente autóctona

Figura 22. Resumen de los principales criterios de diseño de los DBDI según la normativa española (Fuente: elaboración propia a partir de las guías).

2.7.5. Primeros criterios de dimensionamiento. Tanques de tormenta anticontaminación

En España, el problema derivado de la falta de capacidad de las redes de alcantarillado tradicionales, aunque evidente, no se comenzó a analizar hasta bien entrada la década de los 80, con la introducción de tanques de tormenta enterrados para el control de los caudales y, sobre todo, la contaminación hacia el medio receptor. Como en otros países, los esfuerzos se habían centrado hasta entonces en los problemas de capacidad para las aguas pluviales y en la depuración para las aguas residuales³⁴.

³⁴ Extraído de: ANDRÉS DOMÉNECH, Ignacio. *Evaluación probabilística de indicadores de eficiencia para el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta para el control de la contaminación de escorrentías urbanas*. 2010. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València. Pág. 75 y ss.

Los primeros estudios específicos se realizaron en 1983 en la Universidad Politécnica de Madrid por Ernesto Hontoria García³⁵. Diez años más tarde, conscientes de la importancia del problema se ponen en marcha una serie de programas para estudiar la problemática. A partir de los años 90 del pasado s.XX las universidades de Cantabria, A Coruña y la Politécnica de Catalunya comienzan a desarrollar estudios para la caracterización de la contaminación de las aguas durante episodios de lluvia.

Por otra parte, la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), a través del Grupo Avanzado de Drenaje Urbano (GADU), comienza a analizar el problema y en 2001 lanza el Programa Nacional de Medición de las Descargas de los Sistemas Unitarios (MMA, 2002), que puso de manifiesto la gravedad del problema de los depósitos enterrados para el control de la contaminación de las aguas.

Se relacionan, a continuación, las principales líneas de actuación anticontaminación seguidas en España durante la primera década del siglo XXI, a nivel de dimensionamiento parametrizado de tanques de tormenta.

➤ Experiencias desarrolladas por la Confederación Hidrográfica del Norte

La Confederación Hidrográfica del Norte (CHN) tiene una amplia experiencia en la regulación del caudal de lluvias mediante depósitos de retención. Los sistemas de control y tratamiento de reboses reconocidos por las *“Especificaciones técnicas básicas para el proyecto de conducciones generales de saneamiento de la Confederación Hidrográfica del Norte”*, son aliviaderos tradicionales, sin cámara de regulación y utilizados únicamente en casos de incorporaciones de pequeños caudales, y los depósitos para el control de la contaminación que llaman depósitos de tormenta (Comás, 2014 [23, p. 86]).

Las especificaciones de la CHN recomiendan volúmenes de depósito entre 4 y 9 m³/Ha impermeable según la población sea densa o dispersa, respectivamente.

➤ Directrices de diseño en Galicia

El desarrollo de las *Instrucciones Técnicas para Obras Hidráulicas de Galicia* (ITOGH), contempla diferentes niveles de aproximación al diseño de los tanques de tormenta. En ese sentido, el método simplificado de estas ITOHG permite determinar el volumen de los tanques de tormentas empleando una serie de volúmenes de almacenamiento específicos que

³⁵ GARCÍA, Ernesto Hontoria. *Evaluación de la contaminación por escorrentía superficial urbana*. 1985. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

dependen de parámetros como el tipo de medio receptor, los usos del suelo y la estrategia de caudales derivados hacia la EDAR. En cualquier caso, el método simplificado es de aplicación únicamente en cuencas con superficies netas (impermeables) inferiores a 10 Ha, en aglomeraciones de menos de 3.000 habitantes y siempre que no existan riesgos de inundaciones.

La siguiente tabla recoge los volúmenes de almacenamiento específico definidos en las ITOGH para diferentes estrategias de caudal enviados hacia EDAR, en función de los usos del suelo y del tipo de medio receptor (definido en términos de la Directiva 91/271 como zona sensible o no catalogada).

Caudal de salida del depósito	Tipo de medio receptor	Tipología de la cuenca de aportación		
		Rural	Urbana	Urbana densa
$3 \cdot Q_{\text{medio, TS}}$	Sensible	80 m ³ /Ha neta	100 m ³ /Ha neta	110 m ³ /Ha neta
	No catalogado	60 m ³ /Ha neta	80 m ³ /Ha neta	90 m ³ /Ha neta
$5 \cdot Q_{\text{medio, TS}}$	Sensible	56 m ³ /Ha neta	70 m ³ /Ha neta	77 m ³ /Ha neta
	No catalogado	42 m ³ /Ha neta	56 m ³ /Ha neta	63 m ³ /Ha neta
$7 \cdot Q_{\text{medio, TS}}$	Sensible	32 m ³ /Ha neta	40 m ³ /Ha neta	44 m ³ /Ha neta
	No catalogado	24 m ³ /Ha neta	32 m ³ /Ha neta	36 m ³ /Ha neta

Figura 23. Volúmenes de almacenamiento específico (m³/Ha neta) mínimos para los tanques de tormenta según el método simplificado de las ITOHG (Fuente: Xunta de Galicia, 2009, extraído de 36, p. 87).

Un resultado adicional en el ámbito de Galicia lo recoge Beneyto (2004) en las conclusiones de su tesis doctoral³⁶. Si se considera un caudal hacia la EDAR igual a 5 veces el caudal medio de tiempo seco y se establece como objetivo no superar los 20 vertidos al año, el depósito de tormentas deberá diseñarse con un volumen de unos 90-100 m³/Ha.

➤ Metodología del Plan Especial de Alcantarillado de Barcelona

En este caso el volumen óptimo del tanque de tormentas se fija en aquel que reduce a 1/3 el número de vertidos anuales respecto de la situación de la red de alcantarillado analizada sin la colocación de depósitos. Además, se comprueba que ese valor corresponde al punto de la gráfica a partir del cual es necesario aumentar un 5% el volumen del depósito para conseguir retener un episodio más.

³⁶ BENEYTO GONZÁLEZ-BAYLIN, María. *Evaluación de los rendimientos de depósitos de detención-aliviadero en redes de saneamiento unitarias en cuencas de la España húmeda*. Universidade da Coruña, marzo 2004.

➤ Normas del Canal de Isabel II

En estas normas de saneamiento³⁷, para la determinación del volumen necesario del tanque anticontaminación se recurre literalmente a la Norma alemana ATV-128, que propone una siguiente expresión para determinar el punto de entrada en funcionamiento de un determinado aliviadero tradicional, fijando una “lluvia crítica” de 7.5 l/s·Ha impermeable que varía en función del tiempo de concentración (t_c) de la cuenca:

$$I = \frac{15 * 120}{T_c + 120}$$

Donde I es la intensidad en l/s·Ha y T_c el tiempo de concentración en minutos. Si el tiempo de concentración es superior a 120 minutos, se trabajará con una intensidad crítica 7,5 l/s·Ha.

➤ Norma UNE-EN 752:4

En esta norma se establece un criterio para el diseño de aliviaderos de tanques de tormenta basado en el concepto de lluvia crítica de entre 10 y 30 l/s·Ha, según el grado de protección requerida. Otro criterio propuesto para zonas menos sensibles se basa en el concepto de dilución, permitiendo el vertido de caudales por encima de 5 a 8 veces el caudal medio en tiempo seco.

➤ CEDEX. Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) redactó en 2008 la Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano³⁸, que también aporta metodologías para el cálculo del volumen de depósitos o tanques de tormenta:

- Por un lado, incorpora diversas metodologías simplificadas basadas en la retención del *first flush*, procedimientos simples que acaban traducándose en unas ratios de volumen necesario por hectárea impermeable.
- Por otro lado, detalla metodologías completas basadas en la modelización integrada a partir de 4 etapas: 1) establecimiento del objetivo de protección; 2) elección de la serie de lluvias a modelizar; 3) modelización del estado actual; 4) simulación de alternativas.

³⁷ PRIETO MARTÍN, Rafael; BELTRÁN PEDREIRA, Manuel; et al. *Normas para Redes de Saneamiento*. Versión 3. Canal de Isabel II, 2020.

³⁸ BALAIRÓN, L., et al. *Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano*. CEDEX, Manuales y recomendaciones, 2008.

➤ La ciudad de València y su área metropolitana

La normativa municipal de saneamiento en la ciudad de Valencia de 2004 no estableció ninguna pauta para el dimensionamiento de depósitos de retención. En cambio, su nueva redacción de 2015 si consideró una capacidad mínima para el control de la contaminación, fijada en 70 m³/Ha para sistemas unitarios y 40 m³/Ha para sistemas separativos de pluviales.

➤ Otros criterios utilizados en la Comunitat Valenciana

Tal y como cita Andrés Doménech (2004, [34, p. 83]), en las jornadas sobre “*Depósitos de retención de aguas pluviales. Experiencias de Barcelona y Valencia*” que organizó el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en abril de 2003, el Servicio del Ciclo Integral del Agua del Ayuntamiento de València apuntaba a una lluvia crítica de 20 l/s·Ha y 30 minutos de duración como criterio de dimensionamiento, equivalente a depósitos de 36 m³/Ha.

A su vez, por el Ayuntamiento de València, en colaboración con el Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València, se han predimensionado algunos depósitos en la ciudad siguiendo unos criterios basados en la metodología simplificada de las ratios de retención volumétrica³⁹. Este es el caso de depósitos en los barrios de Malilla, Nazaret, Benimàmet y La Torre. En estos casos resultaron de la metodología aplicada unas ratios entre 65 y 80 m³/Ha impermeable.

Por otra parte, ACUAMED realizó para el Ministerio de Medio Ambiente el proyecto de Reordenación de la infraestructura hidráulica de la huerta y red de saneamiento del área metropolitana de València. Este proyecto preveía, entre otras actuaciones, la implantación de 7 depósitos para el control de las descargas de sistemas unitarios que llegan al Parc Natural de L'Albufera procedentes del tejido urbano e industrial que se extiende al sur de la ciudad de València a lo largo de la autovía V-31. La solución finalmente adoptada manejaba ratios de 100 m³/Ha impermeable.

Esta situación tan dispar en un ámbito tan localizado no puede ilustrar mejor la necesidad de establecer unos criterios de dimensionamiento robustos, puesto que en tres ámbitos diferentes muy cercanos se han manejado ratios que difieren en tres veces los unos de los otros. Por ello, para abordar la planificación hidráulica en las zonas se hace necesario establecer una metodología correcta, adaptada a las condiciones de la ciudad.

³⁹ URBONAS, Ben; STAHRÉ, Peter. *Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management*. 1993.

2.7.6. Criterios de dimensionamiento. Métodos de diseño volumétrico

Las 7 guías locales o regionales españolas incorporan, además de los anteriores criterios de diseño, unos sencillos métodos volumétricos que permiten realizar un dimensionamiento simplificado y suficientemente aproximado de los DBDI, no así la guía del Ministerio para la Transición Ecológica, que sólo incorpora criterios detallados de diseño, no su dimensionamiento.

Estos métodos proponen un criterio de dimensionamiento para la reducción de volúmenes de escorrentía basado en los percentiles de la serie pluviométrica, cada guía unos concretos según el nivel de riesgo adoptado y la pluviometría de la zona. En líneas generales, establecen unos criterios más laxos en urbanizaciones densas y/o actuaciones de regeneración urbana, mientras que en nuevos desarrollos urbanos o zonas que cuenten con mayores espacios abiertos disponibles consideran unos criterios más restrictivos.

El proceso de dimensionamiento volumétrico consiste básicamente en comprobar que el volumen neto disponible en el SUDS (V_{SUDS}), en este caso en el DBDI, es superior al volumen almacenamiento ($V_{\text{Escorrentía}} = V_E$) necesario por la generación de escorrentía, según el percentil que se adopte en cada caso:

$$\text{Método volumétrico} \rightarrow V_{\text{SUDS}} \geq V_{\text{Escorrentía}}$$

A continuación, se describen los criterios de dimensionamiento volumétrico fijados por las diferentes guías existentes.

2.7.6.1. Guías de adaptación al riesgo de inundación: SUDS [1]

Esta publicación no dispone de criterios de dimensionamiento volumétrico.

2.7.6.2. Guía básica de diseño de Madrid [28]

Esta publicación establece como volumen de almacenamiento temporal mínimo V_E , el correspondiente a la escorrentía generada por el volumen de lluvia que no es superado por el 80% de los eventos de precipitación (V_{80}), cuyo valor para la ciudad de Madrid es de 15 mm ó 15 l/m². Dicho volumen V_E puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$V_E = A_{\text{imp}} * \frac{V_{80}}{10^3} \quad (1)$$

Donde:

- V_E = Volumen de escorrentía a almacenar en origen (m³)

- A_{imp} = Área impermeable (m^2)
- V_{80} = Volumen de lluvia de percentil 80% para garantizar cantidad (mm)

Por su parte, tras una primera estimación de la superficie y la profundidad disponible para la construcción del elemento de almacenamiento temporal, considerando las restricciones de espacio del lugar, debe estimarse el volumen de almacenamiento en el SUDS (V_{SUDS}), para lo que puede emplearse la siguiente fórmula:

$$V_{SUDS} = \sum_{i=1}^m A_{b,i} * h_i * n_i \quad (2)$$

Donde:

- m = Número de capas diferentes
- n_i = Porosidad de la capa i (adimensional)
 - Superficial sin relleno (vol. huecos = vol. total): aplicar $n = 1,0$
 - Gravas: utilizar $n = 0,3$ si no se dispone de un valor específico
 - Celdas y cajas reticulares: emplear $n = 0,9$ (o lo indicado por el distribuidor)
- $A_{b,i}$ = Área de la base de la capa i (m^2)
- h_i = Profundidad de la capa i (m)
 - Habitualmente, la altura de la lámina de agua superficial es $\leq 0,3$ m.
 - Si la altura de la lámina de agua superficial es $> 0,3$ m, entonces es necesario escalonar los laterales (según se muestra en la siguiente figura) y tomar las medidas de seguridad oportunas.

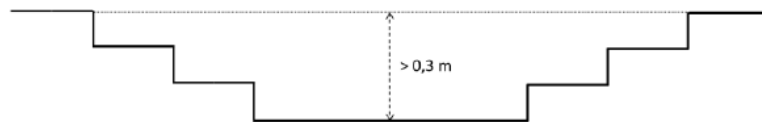


Figura 24. Ejemplo de escalonamiento de los laterales según la Guía de Madrid (Fuente: 28, p. 41).

- Si altura de la lámina de agua superficial es $> 0,5$ m, entonces es necesario pedir autorización al Ayuntamiento de Madrid.
- Es aconsejable que la altura de la lámina de agua en una estructura enterrada no supere 1,5 m.

Tras un primer tanteo, comenzará un proceso iterativo conducente a la comprobación de que el SUDS propuesto cuenta con un volumen neto disponible tal que es suficiente para almacenar temporalmente, al menos, el volumen de escorrentía generado por V_{80} , optimizando el diseño final al ámbito donde se localiza.

2.7.6.3. *Guía básica de diseño de la Ciudad de València [6]*

En esta guía se ha establecido como mínimo criterio de diseño el V_{60} , es decir, el volumen de lluvia que no es superado por el 60% de los eventos de precipitación de la ciudad de València. No obstante, dicho criterio se ha particularizado según se trate de grandes desarrollos urbanísticos o proyectos de renovación de espacios públicos urbanos, considerando en estos casos los siguientes criterios:

Tipología urbana	Criterio	V_x (mm)
Centros históricos protegidos	V_{60}	8
Ensanche	V_{60}	8
Edificación abierta	V_{80}	20
Unifamiliar	V_{85}	27
Industrial	V_{80}	20
Terciario	V_{80}	20

Figura 25. Criterios de dimensionamiento por tipología edificatoria en actuaciones a nivel de sector (Fuente: 6, apartado 6.4, p. 77 y 78).

Tipología urbana	Criterio	V_x (mm)
Parques y jardines	V_{95}	60
Pequeñas vías	V_{60}	8
Grandes vías con medianas ajardinadas	V_{80}	20

Figura 26. Criterios de dimensionamiento por tipología urbana en actuaciones en espacio público (Fuente: 6, apartado 6.4, p. 77 y 78).

Como en el caso de la guía de Madrid, estos criterios de diseño permiten, de un modo simplificado, obtener de una manera rápida y preliminar los volúmenes de almacenamiento necesarios en los SUDS previstos a partir de la cuenca que van a gestionar. El criterio V_x establece los litros por cada metro cuadrado de cuenca que es necesario retener en el SUDS, por lo que el producto de la superficie impermeable y el V_x definirá el volumen necesario en metros cúbicos:

$$V_{\text{necesario}} = A_{\text{imp}} * \frac{V_x}{10^3} \quad (3)$$

2.7.6.4. *Recomendaciones básicas en Navarra [29]*

En este caso se propone V_{60} como un valor mínimo de diseño y un valor de V_{80} como valor estándar de diseño en actuaciones de regeneración urbana.

De acuerdo a la tipología urbana y, como en el caso de València, diferenciando entre actuaciones urbanas de regeneración y nuevos desarrollos urbanos, en la guía navarra [29, apartado 7.4.2] se proponen los criterios de la siguiente tabla, cuyo valor dependerá de la comarca de Navarra en la que se encuentre la actuación:

Tipología urbana	Actuaciones de regeneración	Nuevos desarrollos urbanos
Urbanización densa	V_{60}	V_{70}
Edificación abierta	V_{80}	V_{90}
Casas unifamiliares	V_{80}	V_{90}
Áreas industriales	V_{80}	V_{90}
Centros comerciales y sector terciario	V_{80}	V_{90}
Red viaria	V_{80}	V_{90}
Aparcamiento	V_{80}	V_{90}
Parques	V_{95}	V_{98}

Figura 27. Criterio volumétrico de acuerdo a la tipología urbana, para oportunidades de regeneración y actuaciones puntuales (Fuente: 29, p. 62, tabla 22).

Los volúmenes de almacenamiento necesarios en los SUDS se calcularán nuevamente mediante la anterior expresión (3).

2.7.6.5. *Guía básica de diseño para el término municipal de Azuqueca de Henares [30]*

En el caso de pequeños desarrollos de regeneración urbana, el dimensionamiento de SUDS se puede llevar a cabo empleando el mismo método simplificado que se emplea en las restantes guías, utilizando los valores de los percentiles volumétricos de la siguiente tabla navarra [extraída de 30, apartado 3.2.2.1], con un percentil mínimo del 60% para las zonas densamente pobladas y un percentil máximo del 95% para los parques y jardines:

Tipología de proyecto	Percentil V_x	V_x (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 pobladas	V_{60}	60

Figura 28. Volumen de infiltración según tipo de proyecto (Fuente: 30, apartado 3.2, p. 54, tabla 8).

Los volúmenes de almacenamiento necesarios en los SUDS se calcularán, como en los casos anteriores, mediante la expresión (3). Asimismo, el volumen de almacenamiento de los SUDS se calculará mediante la anterior expresión (2), en este caso considerando los valores de porosidad n_i de la siguiente tabla:

Material	Porosidad (%)	n_i
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

Figura 29. Valores de porosidad para materiales drenantes (Fuente: *The SuDS Manual*, CIRIA (2015), apartado 3.4.2 de la Guía 30, tabla 13).

Cabe señalar que, como parte de esa guía, se ha desarrollado una herramienta de cálculo para facilitar el dimensionamiento simplificado de los SUDS, la cual se puede encontrar en el siguiente enlace web (<https://www.azuqueca.es/guía-básica-de-diseño-de-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds->).

Sin embargo, en nuevos desarrollos urbanísticos y desarrollos de regeneración urbana de mayor tamaño, los SUDS, deberán dimensionarse para disponer de un volumen suficiente que permita limitar los caudales de escorrentía vertidos fuera del ámbito de actuación, por lo que el anterior método se utilizará inicialmente para realizar el predimensionado del sistema. Este requisito también aplica a aquellos proyectos, independientemente de su tamaño y tipo, en el que exista alguna restricción de vertido, o bien cuando el sistema propuesto incluya redes de drenaje o concatene más de un elemento SUDS. Por lo tanto, en estos casos, para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de drenaje y SUDS, se deberá recurrir al uso de herramientas de modelización hidráulica específicas, utilizándose los métodos volumétricos descritos para el predimensionamiento preliminar del sistema.

2.7.6.6. *Guía técnica de la ciudad de Barcelona [31]*

En el caso de esta publicación el volumen de escorrentía generado es el correspondiente a V_{80} , es decir, el correspondiente a la escorrentía generada por el volumen de lluvia que no es superado por el 80% de los eventos de precipitación, cuyo valor para la ciudad de Barcelona es de 15 mm.

El valor del volumen de huecos del sistema de almacenamiento dependerá del tipo de vegetación, de forma genérica se puede aplicar un valor de 0,85 (se puede afinar este valor en función de la densidad de la vegetación escogida en cada caso). En el caso de cunetas verdes o zanjas de infiltración sin vegetación este coeficiente se podría aumentar a 0,95.

Por motivos de seguridad, la altura máxima del espacio libre de almacenamiento de los SUDS se establece en 0,30 m. Para profundidades superiores, habrá que realizar plataformas progresivas o bien implantar dispositivos de protección perimetrales.

Los volúmenes de almacenamiento necesarios en los SUDS se calcularán también mediante la expresión (1). Asimismo, el volumen de almacenamiento de los SUDS se calculará mediante la anterior expresión (2), considerando los siguientes valores de porosidad n_i :

Material	Media
Arenas y arenas con gravas	0,20-0,30
Gravas uniformes	0,30-0,40
Gravas con tubos perforados	0,40-0,50
Geocompuestos y drenes perforados	0,50-0,60
Sistemas con geo-celdas	0,90-0,95

Figura 30. Porosidad eficaz por diferentes tipos de suelos (%) (Fuente: Recomendaciones de proyecto de Drenaje: dispositivos de infiltración (Fundación de la Jardinería y el Paisaje, 2014), apartado 11.3 de la Guía 31, p. 50, tabla 6).

2.7.6.7. *Guía básica de diseño para el término municipal de Castelló de la Plana [32]*

Al contrario que las restantes publicaciones, la guía de Castelló de la Plana no emplea métodos de diseño volumétrico para el dimensionamiento de DBDI, sino que propone limitar o controlar la cantidad de escorrentía vertida desde el SUDS al punto de vertido.

El objetivo de diseño es laminar la avenida asociada a $T = 15$ años sin que varíe el hidrograma del cauce aguas abajo del punto de vertido. Es decir, que no se vea afectado el caudal pico circulante por el cauce donde se vierta, en comparación con la situación preexistente a la actuación a desarrollar. Asimismo, es importante que el régimen de caudales del medio

receptor no se vea afectado drásticamente para lluvias frecuentes, para evitar, entre otros, la erosión de los cauces.

En el ámbito de dicha guía se propone limitar los caudales de escorrentías procedentes de la totalidad de la actuación a un caudal máximo de 70 l/s/Ha de superficie total para T = 2 años, y 141 l/s/Ha de superficie total para T = 15 años, en el municipio de Castelló de la Plana.

2.7.6.8. Guía básica de diseño en el término municipal de Murcia [33]

Como en el caso de Azuqueca de Henares, la guía murciana limita la metodología simplificada volumétrica para zonas consolidadas con cuenca inferior a 2 Ha, sirviendo esta metodología en el resto de casos únicamente como predimensionamiento de los SUDS. En estos casos, además, se exigirá que se desarrolle un modelo hidrológico/hidráulico para garantizar un volumen de almacenamiento suficiente para limitar los caudales de escorrentía vertidos fuera del ámbito.

Por lo demás, la guía considera igualmente el método volumétrico, aunque en este caso se diseñarán generalmente todos los elementos SUDS para la gestión de un volumen de escorrentía mínimo equivalente al percentil V_{80} , si bien en zonas de urbanización densa se propone un criterio de diseño más flexible (con el empleo del percentil V_{60}) y en zonas de parques y jardines, con grandes zonas verdes, unos requisitos más estrictos (percentil V_{95}).

2.7.6.9. Resumen del empleo de los métodos de diseño volumétrico en España

A excepción de la guía de Castelló de la Plana, las otras 6 guías municipales o regionales redactadas en España utilizan actualmente métodos de diseño volumétrico para el dimensionamiento de SUDS, también balsas de detención. En este método se comprueba:

$$\text{Método volumétrico} \rightarrow V_{\text{SUDS}} \geq V_{\text{Escorrentía}}$$

Calculándose ambos términos a partir de las anteriores ecuaciones (2) y (3):

$$V_{\text{SUDS}} = \sum_{i=1}^m A_{b,i} * h_i * n_i \quad (2)$$

$$V_{\text{Escorrentía}} = A_{\text{imp}} * \frac{V_X}{10^3} \quad (3)$$

El criterio fundamental de diseño de esta metodología lo establece el valor de V_X , correspondiendo al volumen de lluvia que no es superado por el X% de los eventos de precipitación de la zona analizada. En general este valor oscila entre V_{60} y V_{95} , el primer caso más laxo para zonas densamente pobladas y el segundo más restrictivo para espacios abiertos ajardinados, con un valor ampliamente aceptado de V_{80} en gran parte de las guías para diferentes situaciones de proyecto y tipologías urbanas.

No obstante, en líneas generales este tipo de metodologías queda limitada a pequeñas actuaciones urbanas, limitando su uso en el resto de casos (actuaciones urbanas de grandes dimensiones y/o nuevos desarrollos urbanísticos) únicamente al predimensionamiento de sus SUDS. En estos casos, además, se deberán emplear modelos hidrológicos que, a su vez, comprueben la limitación de caudales vertidos al medio receptor.

2.8. Regulación en España de los VDSS. Los PIGSS

La Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas⁴⁰ estableció medidas para conseguir una mejor calidad de las aguas continentales, entre las que cabe destacar el sometimiento a autorización previa de las actividades susceptibles de provocar la contaminación del dominio público hidráulico, en particular, los vertidos.

Sin embargo, la adecuada protección de la calidad de las aguas exigía completar las medidas establecidas en dicha ley con otras que sometieran los vertidos de las aguas residuales urbanas, antes de su evacuación al medio, a una serie de tratamientos para limitar los efectos contaminantes de dichas aguas residuales y proteger protección del medio ambiente. Con este objetivo, la Unión Europea aprobó la Directiva 91/271/CEE⁴¹, que fue incorporada al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre⁴², que establece las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo⁴³, que lo desarrolla. Dicha regulación ha dado lugar a diversas interpretaciones sobre los requisitos técnicos que deben cumplir los sistemas colectores, especialmente su estanqueidad, y al tratamiento de las aguas durante los episodios de lluvias torrenciales inusuales.

⁴⁰ Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. «BOE» núm. 189, de 08/08/1985 (Disposición derogada). Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1985-16661>. U.A.V. 02/02/2025.

⁴¹ Directiva del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. «DOCE» núm. 135, de 30/05/1991. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1991-80646>. U.A.V. 02/02/2025.

⁴² Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. «BOE» núm. 312, de 30/12/1995. Link: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1995-27963>. U.A.V. 02/02/2025.

⁴³ Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. «BOE» núm. 77, de 29/03/1996. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1996-7159>. U.A.V. 02/02/2025.

Tal situación, junto con que no se disponía de una normativa que regulase los desbordamientos de los sistemas de saneamiento durante los episodios de lluvia, justificó la aprobación del Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre [12], por el que se modificó:

- Por una parte, el citado Real Decreto 509/1996, para incluir las situaciones de contaminación por vertidos procedentes de desbordamientos de aguas de escorrentía.
- Por otra parte, el RDPH, a partir de la creación de un inventario de puntos de desbordamiento de aguas de escorrentía y el desarrollo del régimen jurídico de desbordamientos de aguas de escorrentía, tanto para las autorizaciones de vertidos existentes a su entrada en vigor como para las nuevas solicitudes, que se regulaba de manera particular mediante la nueva *Sección 4.^a bis. Desbordamientos de sistemas de saneamiento en episodios de lluvia*, del Capítulo II del Título III, a partir del nuevo *Artículo 259 ter. Desbordamientos de sistemas de saneamiento en episodios de lluvia*.

Más recientemente, el Real Decreto 665/2023, de 18 de julio [2], con el fin de proteger las aguas de escorrentía asociadas a los entornos urbanos, evitar su contaminación y tratar de restituir, en la medida de lo posible, el ciclo hidrológico natural mediante el fomento de las técnicas de infiltración, SUDS e infraestructuras verdes, ha modificado nuevamente el RDPH en sus artículos 259 ter y siguientes, así como en el anexo XI «Norma técnica básica para el control de los vertidos por desbordamientos de los sistemas unitarios» y en la modificación de la Orden AAA/2056/2014⁴⁴, para ajustarse a los artículos 246, 246 bis, 251, 259 ter, 259 quater, 259 quinquies y al anexo XI del propio RDPH, en lo relativo al control de los VDSS. En concreto, las modificaciones introducidas se centraron particularmente en:

- La gestión de los VDSS en las ciudades, ya que frecuentemente la contaminación por este tipo de vertidos alcanza niveles significativos durante los primeros momentos de las precipitaciones, no sólo en episodios extremos de lluvia.
- El fomento de la digitalización de la gestión de los episodios de lluvia en las ciudades y la priorización de las medidas preventivas frente a las correctivas, es decir, actuando en el origen del problema, como así contemplan los SUDS.
- La determinación de las condiciones en las que se podrán autorizar los VDSS, estableciendo igualmente la obligación de que se incluyan en la autorización de vertido.

⁴⁴ Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido. «BOE» núm. 268, de 05/11/2014. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2014-11411>. U.A.V. 02/02/2025.

- La obligación de retirar los residuos acumulados en el cauce tras un vertido, ya que uno de los efectos indeseables de este tipo de vertidos es la contaminación y degradación visual de los entornos fluviales.
- La obligación de disponer de sistemas de monitorización que midan el número de eventos, el tiempo de duración del evento y el volumen asociado a cada evento, además de parámetros de calidad.
- Y, sobre todo, la obligación a que determinadas aglomeraciones urbanas elaboren un PIGSS para sus sistemas de saneamiento.

Además de la regulación básica establecida en el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio⁴⁵ (en adelante TRLA) y el RDPH, la legislación aplicable en el control de la contaminación de los VDSS es fundamentalmente:

- Directiva del Consejo 91/271 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, y su reglamento de desarrollo, aprobado por el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo.
- Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y declaración de vertido.
- Real Decreto 665/2023, de 18 de julio.
- RDPH, Anexo XI: Norma técnica básica para el control de los vertidos por desbordamientos de los sistemas de saneamiento.

El cronograma de aplicación en el control de la contaminación de los VDSS es, atendiendo a lo establecido por el propio Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (en adelante Miteco), (<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/vertidos-de-aguas-residuales/vertido-desbordamiento-sistema-saneamiento-dss.html>; U.A.V. 31/05/2025), el siguiente:

⁴⁵ Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. «BOE» núm. 176, de 24/07/2001. Link: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276>. U.A.V. 02/02/2025.



Figura 31. Cronograma de aplicación del control de la contaminación de los VDSS e implantación de los PIGSS (Fuente: Miteco).

Finalmente, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea han adoptado la Directiva (UE) 2024/3019 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas⁴⁶, ya en vigor y que, atendiendo a su artículo 33, deberá ser puesta en vigor por los Estados miembros antes del 31/07/2027. Su objeto se establece en su artículo 1:

“La presente Directiva establece normas sobre la recogida, el tratamiento y el vertido de las aguas residuales urbanas para proteger el medio ambiente y la salud humana, en consonancia con el enfoque de «Una salud», y, a la vez, reducir progresivamente las emisiones de gases de efecto invernadero hasta alcanzar niveles sostenibles, mejorar el balance energético de las actividades de recogida y tratamiento de aguas residuales urbanas y contribuir a la transición hacia una economía circular. También establece normas sobre el acceso al saneamiento para todos, la transparencia del sector de las aguas residuales urbanas, la vigilancia periódica de los parámetros pertinentes para la salud pública en las aguas residuales urbanas y la aplicación del principio de que quien contamina paga”.

En particular, los PIGSS (denominados en la citada Directiva (UE) 2024/3019 como “Planes integrados de gestión de aguas residuales urbanas”) quedan regulados en su artículo 5, detallando su Anexo V el contenido de dichos PIGSS. Asimismo, darán prioridad a las soluciones

⁴⁶ Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, (versión refundida). «DOUE» núm. 3019, de 12/12/2024. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2024-81831>. U.A.V. 07/06/2025.

de infraestructuras verdes y azules cuando sea posible. En ese sentido, atendiendo a la “Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: Infraestructura verde: mejora del capital natural de Europa, Bruselas, 6.5.2013”, la infraestructura verde es “una red de zonas naturales y seminaturales y de otros elementos ambientales, planificada de forma estratégica, diseñada y gestionada para la prestación de una extensa gama de servicios ecosistémicos. Incorpora espacios verdes (o azules en el caso de los ecosistemas acuáticos) y otros elementos físicos de espacios terrestres (incluidas las zonas costeras) y marinos. En los espacios terrestres, la infraestructura verde está presente en los entornos rurales y urbanos”.

Considerando el citado Anexo V de la Directiva (UE) 2024/3019, el contenido mínimo de los PIGSS es el siguiente:

1. Un análisis de la situación inicial del área de drenaje de la aglomeración urbana de que se trate, que incluya al menos lo siguiente:
 - a) una descripción detallada de la red de sistemas de colectores, las capacidades de almacenamiento y de conducción de aguas residuales urbanas y de escorrentía urbana de dicha red y las capacidades existentes de tratamiento de aguas residuales urbanas en caso de lluvias;
 - b) en el caso de colectores unitarios, un análisis dinámico de los flujos de aguas residuales urbanas en caso de lluvia, basado en datos del control o el uso de modelos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua que tengan en cuenta proyecciones climáticas de última generación e incluya una estimación de las cargas contaminantes de los parámetros indicados en el cuadro 1 y, cuando proceda, en el cuadro 2, del anexo I, así como los microplásticos y los contaminantes pertinentes vertidas en las aguas receptoras en caso de lluvias;
 - c) en el caso de colectores separativos, una descripción detallada de los requisitos de control en puntos pertinentes de los sistemas separativos en los que se prevé que las escorrentías urbanas estén contaminadas, tal como se establece en el artículo 5, apartado 2, letra d), a fin de determinar medidas pertinentes y viables, tal como se exige en el punto 3 del presente anexo.
2. Objetivos de reducción de la contaminación causada por los desbordamientos de las aguas de tormenta, incluidos los siguientes:

- a) un objetivo indicativo no vinculante de que el desbordamiento de las aguas de tormenta representa un pequeño porcentaje, que no puede ser superior al 2% de la carga anual de aguas residuales urbanas recogidas, calculado en tiempo seco; este objetivo indicativo no vinculante se alcanzará a más tardar:
 - a. el 31 de diciembre de 2039, en el caso de todas las aglomeraciones urbanas de un mínimo de 100.000 h-e,
 - b. el 31 de diciembre de 2045, en el caso de las aglomeraciones urbanas de un mínimo de 10.000 h-e a que se refiere el artículo 5;
 - b) la reducción progresiva de los macroplásticos.
3. Las medidas que deben adoptarse para alcanzar los objetivos mencionados en el punto 2 de conformidad con los plazos establecidos en dicho punto, junto con un plazo para la ejecución de las medidas y una distinción entre las medidas ya existentes y las que deben adoptarse. Asimismo, incluirá una identificación clara de los agentes implicados y sus responsabilidades en la ejecución del plan integrado de gestión de aguas residuales urbanas.
4. Al evaluar qué medidas deben adoptarse con arreglo al punto 3, los Estados miembros velarán por que sus autoridades competentes se planteen, como mínimo, lo siguiente:
- a) medidas preventivas destinadas a evitar la entrada de aguas pluviales no contaminadas en los sistemas de colectores, incluidas medidas que promuevan la retención natural del agua o la recogida de aguas pluviales, y medidas destinadas a aumentar los espacios verdes y azules en zonas urbanas, con el fin de reducir los desbordamientos de las aguas de tormenta, o a limitar las superficies impermeables en las aglomeraciones urbanas;
 - b) medidas para gestionar mejor y optimizar la utilización de las infraestructuras existentes, incluidos los sistemas de colectores, los volúmenes de almacenamiento y las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas, con el fin de asegurar la minimización de los vertidos de aguas residuales urbanas no tratadas o de vertidos de escorrentía urbana contaminada en las aguas receptoras;
 - c) cuando sea necesario para alcanzar los objetivos mencionados en el punto 2, medidas de mitigación adicionales, incluidas la adaptación de las infraestructuras para la recogida, el almacenamiento y el tratamiento de aguas residuales urbanas,

como por ejemplo la conexión de áreas urbanas de nueva construcción a colectores separativos, cuando sea pertinente, o la creación de nuevas infraestructuras dando prioridad a infraestructuras verdes y azules como zanjas filtrantes, los humedales artificiales y estanques de almacenamiento diseñados para apoyar la biodiversidad. Cuando proceda, se planteará la reutilización del agua en el contexto del desarrollo de los planes integrados de gestión de aguas residuales urbanas a que se refiere el artículo 5.

2.9. El futuro de los SUDS en España y Europa

En Europa, los SUDS están ganando relevancia como soluciones clave para gestionar de manera eficiente las aguas pluviales y mitigar inundaciones en entornos urbanos. Países como Alemania y Francia han implementado durante los últimos años incentivos económicos y fiscales para fomentar la implantación de SUDS, como subvenciones para la construcción de tejados verdes y reducciones de impuestos por la recogida y reutilización de aguas pluviales. Por su parte, Reino Unido ha hecho obligatoria la incorporación de SUDS en los nuevos desarrollos urbanos mediante la implementación del Anexo 3 de la Ley de Gestión de Inundaciones y Agua de 2010 (*Flood and Water Management Act 2010*)⁴⁷, desarrollando estándares nacionales para el diseño, construcción y mantenimiento de este tipo de sistemas. Asimismo, esta regulación normativa incorpora las Autoridades de Aprobación de SuDS (SABs), entes locales responsables de adoptar SUDS en las nuevas construcciones.

En efecto, el desarrollo de los SUDS en el país británico se inició anteriormente a otros, por lo que el diseño, uso e implementación de estos sistemas está más avanzado, orientándose actualmente los esfuerzos sobre todo al control y gestión de la lluvia en origen y la mejora de los rendimientos de contaminación de las aguas de drenaje urbano. Muestra de ellos son las últimas publicaciones de CIRIA, organismo de referencia en materia de SUDS:

- *Using SuDS to reduce phosphorus in surface water runoff* (C808F)⁴⁸, que trata “trenes de tratamiento”, es decir, diferentes SUDS en serie para lograr fundamentalmente la eliminación del fósforo.

⁴⁷ Flood and Water Management Act 2010, SCHEDULE 3 Sustainable Drainage. Link: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2010/29/schedule/3>. U.A.V. 04/02/2025.

⁴⁸ BRADLEY, J., et al. *Using SuDS to reduce phosphorus in surface water runoff* (C808F). Department for Environment Food & Rural Affairs. CIRIA. Londres, agosto 2024.

- *Blue roofs. A guide to implementation* (C8157D)⁴⁹, nueva guía para el diseño y gestión de los denominados techos azules.

Todo este tipo de medidas han demostrado ser efectivas para promover prácticas de drenaje sostenible y podrían servir de modelo para otras naciones. Sin embargo, la implementación de estos sistemas enfrenta desafíos significativos debido, sobre todo, a la inexistencia de una legislación unificada, la falta de una financiación adecuada del ciclo urbano del agua, en particular, de las redes de aguas pluviales, y la necesidad de una mayor concienciación y formación técnica. En España, por ejemplo, la ausencia de una normativa común dificulta su adopción generalizada, aunque como se ha visto anteriormente, algunas regiones y ciudades han comenzado a integrar estas soluciones en su regulación propia. También la caída de la inversión por parte de las administraciones públicas y las compañías operadoras, se encuentra entre las causas fundamentales del deterioro del ciclo urbano del agua en España⁵⁰. En efecto, este informe elaborado por PWC estima [50, p. 58] que “*existe un déficit estructural de €5.000M (las inversiones de los últimos 5 años – periodo 2017-22 – sólo cubren cerca del 20% de las necesarias)*”, todo ello considerando que la inversión anual necesaria en el ciclo urbano se acerca a los €6.200M, pero las inversiones históricas sólo han alcanzado un total de €1.200M.

Entre las causas del anterior déficit de inversión se encuentra el sistema tarifario en España, que presenta 2 importantes problemas [50, p. 33]:

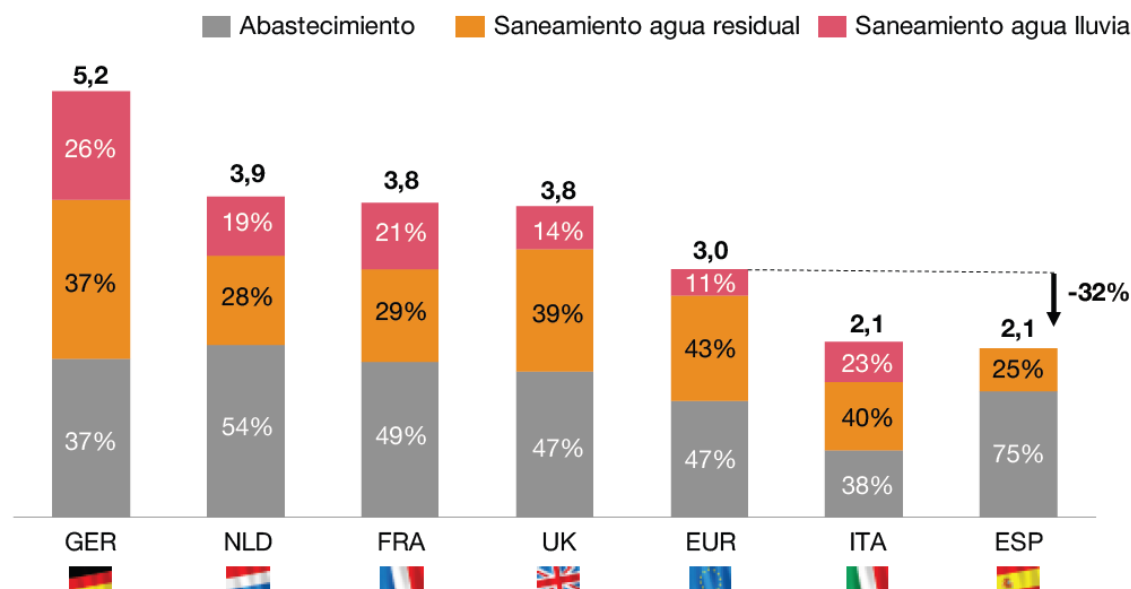
- (i) las tarifas son bajas y volátiles e impiden que se cumpla totalmente con el principio de recuperación de costes fijado por la directiva europea del agua.
- (ii) existe una muy alta dispersión en el valor de las tarifas aplicadas entre los municipios aun perteneciendo a la misma comunidad autónoma y presentando características hidrológicas similares, lo cual sugiere que sería beneficioso aprobar un marco metodológico que incrementara los principios técnicos en la fijación de las tarifas urbanas.

De manera particular, en el caso español, además de contemplar unos costes en la tarifa del agua sensiblemente inferiores a los de otros países europeos, no recoge en dicha tarifa el saneamiento de agua de lluvia, mientras que en la Europa comunitaria este concepto supone,

⁴⁹ HARROP, C., et al. *Blue roofs. A guide to implementation* (C817D). Department for Environment Food & Rural Affairs. CIRIA. Londres, noviembre 2024.

⁵⁰ PWC (PricewaterhouseCoopers). *Estimación del déficit de inversiones en el ciclo urbano del agua en España*. AGUA (Asociación de gestores urbanos del agua), mayo 2024, p. 6. Link: <https://asociacionagua.com/wp-content/uploads/2024/06/Analisis-del-deficit-de-agua-urbano.pdf>. U.A.V. 25/05/2025.

de media, el 11% de la tarifa. Si se observa el siguiente gráfico se comprueba que, en líneas generales, el porcentaje de la tarifa de saneamiento (residual y de lluvia) es sensiblemente inferior en España (25%) que respecto al resto de Europa (63% de media):



Fuente: INE, análisis Strategy&.

Figura 32. Tarifas del sector del agua en varios países europeos [€/m³, 2020] (Fuente: 50, p. 33, figura 24).

En consecuencia, los retos futuros de los SUDS en Europa abarcan aspectos normativos, técnicos, económicos y sociales, presentado su implementación desafíos importantes:

1) Falta de una normativa armonizada a nivel europeo

Aunque algunos países han avanzado en la regulación del drenaje urbano sostenible, aún no existe una normativa común que facilite su adopción en toda la UE. Cada nación, incluso cada región o ciudad, continúa desarrollando sus propias guías y normativas, lo que genera desigualdades en la aplicación y dificulta la integración de los SUDS en las ciudades consolidadas y/o los nuevos planes urbanísticos.

2) Integración con infraestructuras existentes

Muchas ciudades europeas tienen redes de alcantarillado y drenaje, en general, muy envejecidas, diseñadas fundamentalmente para sistemas tradicionales. Adaptar los SUDS a estos sistemas puede ser, en estos casos, complejo y costoso, requiriendo intervenciones a gran escala y una planificación estratégica urbana global, estableciendo prioridades que se centren, fundamentalmente, en el control de las zonas

más problemáticas a nivel de inundación y de la contaminación del medio natural. En ese contexto los PIGSS pueden representar una gran oportunidad de planificación de los sistemas de alcantarillado dentro de la planificación global de las zonas urbanas.

3) Mantenimiento y gestión a largo plazo

Uno de los grandes retos de los SUDS es garantizar su funcionamiento óptimo a medio y largo plazo. Las características fundamentales de estos sistemas hacen que, en general, requieren de mayor mantenimiento para garantizar su buen funcionamiento, por lo que la falta de una financiación adecuada para ello y unos protocolos claros puede condicionar su efectividad a medio y largo plazo. No sólo es una cuestión económica, también es un tema social y de buen uso de los recursos públicos para la asignación periódica del personal necesario para su limpieza y mantenimiento.

4) Costes iniciales y financiación

Su coste inicial de implementación, en no pocas ocasiones en sistemas de alcantarillado ya preexistentes y entornos urbanos consolidados, hace que muchos municipios dependan de subvenciones o financiación externa para poder implementar este tipo de sistemas sostenibles en las ciudades. En el caso español hay que añadir, además, el déficit de inversiones en el ciclo urbano del agua, con unas tarifas del sector del agua un 32% inferior a la media de la Europa comunitaria que, como se ha visto anteriormente, además no contempla el saneamiento de agua de lluvia.

5) Concienciación y aceptación pública

La percepción pública sobre los SUDS todavía es limitada en no pocas regiones. La falta de conocimiento sobre sus beneficios aún hoy sigue generando resistencia en la ciudadanía y entre los responsables de la toma de decisiones. Por ello, campañas de concienciación ciudadana, programas educativos, regulación clara y específica a nivel nacional, y una formación generalizada para los decisores municipales, son clave para impulsar definitivamente *-su aceptación.

6) Cambio climático e incertidumbre sobre futuros eventos climáticos

El cambio climático está provocando eventos meteorológicos cada vez más frecuentes y extremos. Los SUDS deben diseñarse teniendo en cuenta dichos escenarios climáticos, tanto en lo que respecta a los episodios de lluvia como al aumento del calor en las ciudades asociados el efecto isla de calor en las zonas urbanas.

7) Uso eficiente del espacio en ciudades densamente pobladas

Encontrar espacio para implementar SUDS en áreas urbanas densamente pobladas es complicado y requiere de innovación en el diseño del espacio urbano y su proyección, así como su incorporación en la planificación urbanística.

8) Medición y monitoreo del rendimiento

Para que los SUDS sean efectivos a medio y largo plazo es fundamental contar con sistemas de monitoreo y evaluación de su desempeño. Sin embargo, actualmente todavía no hay metodologías estandarizadas para medir su eficacia.

En definitiva, la mejora de la implantación del drenaje urbano sostenible en Europa enfrenta a día de hoy importantes retos, pero su desarrollo en coordinación con los sistemas de alcantarillado tradicionales es crucial para hacer frente al cambio climático y mejorar la resiliencia de las zonas urbanas. Superar estas barreras requiere un enfoque integral que combine innovación tecnológica, financiación adecuada, regulación clara, concienciación ciudadana y formación adecuada a los decisores municipales.

2.10. Tendencias internacionales

Más allá de Europa los SUDS también están ganando importancia, debido básicamente a los desafíos de la urbanización creciente de las ciudades y el aumento de la frecuencia de los eventos extremos asociados al cambio climático. Así, algunas iniciativas destacadas en el resto del mundo incluyen:

- En Norteamérica, ciudades como Nueva York, Chicago, Portland o Vancouver han integrado SUDS en su regulación local para mejorar la gestión de aguas pluviales y promover entornos urbanos más sostenibles. Por ejemplo, en el caso de la ciudad de Nueva York, la Oficina de Justicia Climática y Ambiental de la Alcaldía (*Mayor's Office of Climate and Environmental Justice*) que, como indica su propia página web⁵¹ lidera “los esfuerzos de la Ciudad para garantizar que se esté preparando para adaptarse y proteger a los neoyorquinos de los impactos cada vez más intensos del cambio climático”, está trabajando fundamentalmente en la adaptación de la ciudad a los eventos de calor extremo, inundaciones costeras y las lluvias extremas. En particular, respecto a estas últimas “durante las últimas tres décadas, la ciudad de Nueva York ha transformado su enfoque de la gestión de aguas pluviales y la resiliencia a las lluvias extremas, [...]”

⁵¹ Link: <https://climate.cityofnewyork.us/es/>. U.A.V: 28/03/2025.

utilizando infraestructura gris y verde para mejorar la salud de nuestras vías fluviales locales y prevenir inundaciones". En definitiva, integración de los SUDS en los sistemas de alcantarillado tradicional que ya dispone la ciudad para combinar ambos elementos y, con ello, mejorar el sistema de drenaje de su zona metropolitana.

Por su parte, la ciudad de Portland no sólo continúa adoptando medidas públicas en la gestión de las aguas pluviales y la protección de las masas de agua (ya en 1999 adoptó su primer Manual de Gestión de Aguas Pluviales [*Stormwater Management Manual*, SWMM], aprobándose el pasado 1 de marzo de 2025 su última actualización), sino que a través de sus *Clean River Rewards*⁵² (beneficios por río limpio) también ha involucrado al sector privado y los particulares ofreciéndoles descuentos en las tarifas de alcantarillado si estos gestionan de forma segura las aguas pluviales en su propiedad y las mantiene fuera de la red alcantarillado.

- De la misma manera, durante los últimos años países de Hispanoamérica como Colombia, Argentina o México también han llevado a cabo proyectos con SUDS en sus principales ciudades, aunque en estos países la regulación de este tipo de sistemas es aún incipiente. Sobre esto último destacan los "Lineamientos para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)" que, publicados en 2018 por el Departamento Nacional de Planeación del Gobierno de Colombia, presentan proyectos tipo para implementar SUDS en la gestión ambiental de la escorrentía superficial urbana.
- Por su parte, en Asia y Oceanía destacan fundamentalmente los trabajos realizados en China, Japón, Australia, Malasia y, sobre todo, Singapur, país que en las últimas décadas ha integrado los SUDS en su planificación urbana. A través de la Agencia Nacional del Agua (PUB *Singapore's National Water Agency*) de su Ministerio de Sostenibilidad y Medio Ambiente, pretende garantizar "*un suministro de agua diversificado y sostenible para Singapur mediante las Cuatro Llaves Nacionales (agua de captación local, agua importada, NEWater y agua desalinizada)*".

Concretamente, su Programa ABC (*Active, Beautiful, Clean Waters; ABC Waters*) fue lanzado por el propio gobierno de Singapur en 2006 con el objetivo de transformar el tratamiento de las aguas urbanas de la ciudad, promoviendo un enfoque integral y sostenible en su gestión. Este programa incluye, entre otros, guías para el diseño, construcción y mantenimiento de diversos tipos de SUDS. También destaca su

⁵² Link: <https://www.portland.gov/bes/grants-incentives/clean-river-rewards#toc-about-clean-river-rewards>. U.A.V. 28/03/2025.

influencia en el ámbito académico, existiendo programas especializados de formación, certificación de proyectos y cursos académicos que abordan la gestión integral del agua y las infraestructuras verdes para su posterior aplicación a la planificación urbana.

Por su parte, para la implementación de este tipo de sistemas en el drenaje de aguas superficiales de los nuevos desarrollos urbanos, el citado Programa ABC ha desarrollado el Código de Prácticas sobre Drenaje de Aguas Superficiales⁵³ (Séptima edición - Dic. 2018, con modificaciones según el Anexo n.º 2 - Oct. 2023).

En consecuencia, más allá del desarrollo de proyectos que incorporen los SUDS en la gestión de las aguas urbanas, o incluso de guías o normativas que, en mayor o menor medida, regulen el diseño, cálculo, construcción y/o mantenimiento de este tipo de técnicas dentro de los sistemas de alcantarillado, a nivel mundial también destacan en materia de drenaje otro tipo de experiencias enfocadas en medidas de tipo preventivo, como puedan ser la potenciación de la concienciación ciudadana y la formación especializada, como es el caso de Singapur, o la colaboración de la ciudadanía y los particulares en la gestión en origen de las escorrentías mediante descuentos en las tarifas de alcantarillado, como es el caso de Portland. Experiencias que demuestran la importancia de extender este tipo de sistemas más allá de las medidas estructurales, más ampliamente empleadas.

⁵³ Link: <https://www.pub.gov.sg/-/media/PUB/PDF/Compliance/Earth-Control-Measures/Code-of-Practice-on-Surface-Water-Drainage.pdf>. U.A.V. 28/03/2025.

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El presente trabajo tiene un doble objetivo general, por una parte, evaluar de manera general los sistemas de alcantarillado tradicional, identificar sus carencias actuales y proponer la integración y complementación de SUDS para optimizar su desempeño, en particular, sistemas de laminación. Este enfoque global permitirá no sólo minimizar los riesgos asociados a las inundaciones urbanas, sino también promover beneficios ambientales, sociales y económicos. Para ello será necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluación de los sistemas de alcantarillado tradicionales, identificando problemas relacionados con su capacidad hidráulica, peligrosidad de inundación y riesgos ambientales, económicos y sociales asociados.
 - Estudio de alternativas a los sistemas de alcantarillado tradicionales:
 - Revisión de los principales SUDS disponibles, seleccionando aquellos más adecuados para las características de los casos de estudio.
 - Determinación de los equipamientos de laminación disponibles para regular el flujo de agua y complementar los sistemas tradicionales.
2. Diseño conceptual del sistema global propuesto, con integración de los SUDS en las técnicas tradicionales mediante la aplicación en éstas de métodos naturales de infiltración, retención y laminación, concretamente utilización de DBDI.
3. Evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema:
 - Simulación del comportamiento del sistema frente a diferentes escenarios de lluvia, comparándolo con los sistemas tradicionales de alcantarillado.
 - Análisis comparativo de la viabilidad técnica, económica y ambiental de las medidas propuestas.
4. Principales conclusiones alcanzadas y propuesta de recomendaciones:
 - Conclusiones sobre la validez de las propuestas realizadas.
 - Recomendaciones para proyectos futuros en la gestión sostenible del agua.

A lo largo del documento se detallarán las metodologías de evaluación para elementos DBDI, los criterios de diseño y las ventajas comparativas de la solución global propuesta, destacando su aplicabilidad en diversos escenarios urbanos.

Asimismo, el presente trabajo tiene como complementario introducir el diseño general de un PIGSS que, cumpliendo con el contenido e información mínima establecidos en el apartado 3 del artículo 259 quinquies del RDPH, permita mejorar la eficiencia operativa de un sistema de saneamiento, su sostenibilidad ambiental, económica y social, y su capacidad de respuesta actual y futura. Para ello será necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Descripción y caracterización detallada del sistema de saneamiento:
 - Descripción detallada del sistema, de su capacidad de almacenamiento y de su capacidad de tratamiento de aguas residuales en caso de precipitaciones.
 - Diagnóstico del estado de las infraestructuras, atendiendo tanto a su capacidad de transporte en tiempo de lluvia como a su estado de obsolescencia. Identificación de los principales problemas.
2. Establecimiento de objetivos. Propuesta de indicadores de seguimiento:
 - Diseño de un sistema de monitoreo de indicadores concretos que permita medir la eficiencia del sistema implementado.
 - Propuesta de objetivos indicativos y metas basadas en estos indicadores.
3. Diseño de acciones para optimizar el sistema de saneamiento:
 - Propuesta de medidas preventivas, operativas y de mantenimiento para la mejora generalizada de la infraestructura y la gestión operativa.
 - Implantación de elementos sostenibles en el sistema, como la reutilización de aguas residuales depuradas y la reducción de impactos ambientales.
4. Elaboración de un cronograma de ejecución de las actuaciones:
 - Establecimiento de fases detalladas y prioridades para la ejecución de las acciones propuestas para optimizar el sistema.
 - Estimación general de costes, relación de administraciones y agentes implicados, y planteamiento de fuentes de financiación del plan.
5. Evaluación de los impactos esperados con el desarrollo del plan, estimando sus beneficios ambientales, sociales y económicos.
6. Propuesta del contenido del informe anual con las medidas realizadas y los resultados del sistema de monitorización de los vertidos por desbordamientos.

4. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD

El presente trabajo surge de la necesidad de mejorar la gestión del drenaje urbano a través de la integración de los SUDS en las infraestructuras tradicionales de alcantarillado, en particular, mediante los equipamientos de laminación, con un enfoque en su complementariedad y sinergia dentro de la implementación de PIGSS que, en conjunto y en la medida de lo posible, permitan mejorar los siguientes aspectos tratados en apartados anteriores:

1) Contexto normativo y regulador

Uno de los principales desafíos detectados es la falta de una normativa armonizada que facilite la adopción y estandarización de los SUDS en las zonas urbanas, especialmente en los planes urbanísticos. En España, la regulación normativa es diversa, lo que dificulta la generalización del uso de SUDS y el empleo de los métodos volumétricos para su dimensionamiento. Por ello, resulta necesario evaluar si este tipo de dimensionamientos es aceptable y aplicable de manera homogénea en diferentes zonas del país y para distintos tipos de entornos urbanos.

2) Aspectos técnicos y operativos

La incorporación de SUDS en redes de alcantarillado tradicionales y su integración con los PIGSS requiere adaptaciones técnicas que aprovechen la infraestructura existente, como la implementación de balsas de laminación e infiltración en estas redes. Este enfoque conjunto no sólo alivia la carga de las redes de alcantarillado en eventos de lluvia intensa, sino que también mejora la calidad de las aguas antes de su tratamiento y/o retorno al medio natural y asegura una gestión eficiente de los vertidos.

3) Sostenibilidad y mantenimiento

Otra necesidad identificada es garantizar el funcionamiento óptimo de los SUDS y la implementación de los PIGSS a medio y largo plazo. Esto implica la necesidad de una financiación adecuada y la implementación de protocolos claros de mantenimiento. La falta de metodologías estandarizadas para medir la eficacia de los SUDS también representa un obstáculo para su implementación exitosa.

4) Aceptación social y concienciación pública

La todavía limitada percepción pública sobre los beneficios de los SUDS y la resistencia al cambio por parte de los responsables de la toma de decisiones, requieren campañas de concienciación y programas educativos para fomentar su aceptación y adopción. Por ello,

resulta esencial sensibilizar a la población y, sobre todo, a los responsables de la toma de decisiones sobre los beneficios ambientales y económicos de los SUDS y los PIGSS, sobre todo, a los decisores municipales que, en última instancia, son los que aplican estas técnicas en los sistemas de alcantarillado municipales.

5) Cambio climático y eventos extremos

El cambio climático ha incrementado la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos. Por ello, la integración de SUDS y PIGSS en el diseño de los sistemas de alcantarillado es una estrategia clave para mitigar los efectos del cambio climático; es necesario diseñar los nuevos elementos de alcantarillado y revisar los sistemas existentes considerando estos escenarios climáticos futuros, para mejorar la resiliencia de las zonas urbanas.

6) Medición y monitoreo del rendimiento

Los nuevos PIGSS pueden suponer una oportunidad para la medición continua y el monitoreo de los sistemas de alcantarillado, todo ello para lograr que estos sistemas continúan siendo efectivos a medio y largo plazo, y el uso de recursos económicos para su mantenimiento sea lo más eficiente posible.

En conclusión, la necesidad identificada en este trabajo radica en la integración efectiva de los SUDS, y su implementación en los nuevos PIGSS, en las infraestructuras de alcantarillado tradicionales para optimizar la gestión del drenaje urbano. Este enfoque complementario no sólo mejora la capacidad hidráulica de la red y la calidad del agua antes de su tratamiento y/o vertido final al medio natural, sino que también contribuye a la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas de alcantarillado frente a eventos climáticos extremos.

5. PROPUESTA METODOLÓGICA

Teniendo en cuenta los objetivos del presente trabajo y la necesidad identificada tras el estudio detallado del estado del arte, en el presente trabajo se propone una metodología con un enfoque sistemático que permita el diagnóstico de los sistemas de alcantarillado y la incorporación en estos de técnicas SUDS, en particular, equipamientos de laminación DBDI. Asimismo, se incluye la posterior validación de los dimensionamientos volumétricos y, por último, la inserción de estas técnicas de drenaje sostenible dentro de los nuevos PIGSS como elementos clave en la optimización de la gestión del drenaje urbano. Para ello esta metodología considera las siguientes fases:

Fase 1: Recolección de información y análisis preliminar

La primera fase precisa la recopilación y análisis de la información relevante sobre el área de estudio y el sistema de alcantarillado existente en ésta y su entorno inmediato.

- Caracterización del área de estudio:
 - Análisis de la topografía, usos del suelo y ordenación urbana, posibles afecciones urbanas y características del subsuelo.
 - Recopilación y estudio de los datos pluviométricos, considerando finalmente el periodo de retorno establecido en la normativa aplicable a cada caso.
 - Revisión del marco normativo aplicable.
- Análisis del sistema de alcantarillado actual:
 - Recopilación de planos, especificaciones técnicas y datos básicos de la red, incluyendo toma de datos in situ, que permitan caracterizar completamente su estado actual, especialmente los pozos de registro y el perfil longitudinal de las diferentes canalizaciones que componen el sistema.
 - Identificación de puntos críticos de la red (zonas con inundaciones recurrentes, limitaciones hidráulicas, problemas estructurales, elementos a reparar, etc.).
 - Evaluación de los requisitos normativos en el área de estudio.

Fase 2: Diagnóstico del sistema tradicional

En esta fase se lleva a cabo un análisis técnico detallado para evaluar el sistema de alcantarillado según los métodos tradicionales.

- Modelado hidrológico e hidráulico:
 - Aplicación de software especializado como SWMM o HEC-RAS, o empleo de modelos de cálculo para la simulación de la red.
 - Simulación de escenarios de lluvia según la regulación existente y evaluación de la capacidad de los diferentes elementos de la red.
- Identificación de deficiencias:
 - Localización de zonas de la red de alcantarillado con problemas de capacidad y, en su caso, problemas asociados de desbordamientos y/o vertidos.
 - Evaluación de impactos ambientales y riesgos asociados.
 - Identificación de posibles brechas en la planificación del saneamiento en el contexto del PIGSS.

Fase 3: Diseño de propuestas de mejora

Esta fase se centra en la implementación e integración de SUDS (equipamientos de laminación) en los sistemas de alcantarillado para mejorar la gestión del drenaje urbano.

- Selección de SUDS, en particular, equipamientos de laminación:
 - Diseño de DBDI para mejorar la capacidad del sistema de alcantarillado.
 - Identificación de otras técnicas SUDS que puedan complementar al sistema de alcantarillado y los DBDI, como jardines de lluvia, pavimentos permeables, etc.
- Elaboración del diseño conceptual del sistema de alcantarillado mejorado:
 - Diseño de los planos básicos y distribución estratégica de las canalizaciones y principales elementos de la red de saneamiento analizada.
 - Definición de parámetros técnicos clave (dimensiones, capacidad, materiales).
 - En su caso, integración de los SUDS seleccionados en el marco del PIGSS para una gestión completa del sistema de saneamiento.

Fase 4: Evaluación de la implementación de SUDS en el sistema de alcantarillado.

Se realiza un análisis integral para determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental de las soluciones propuestas, comparando con el diagnóstico según los sistemas tradicionales.

- Simulación del sistema mejorado:
 - Aplicación de software especializado como SWMM o HEC-RAS, o empleo de modelos de cálculo para la simulación de la red.
 - Comparación del comportamiento hidráulico del sistema con las técnicas de drenaje sostenible implementadas.
 - Evaluación de la mejora en la calidad del agua.
- Análisis coste-beneficio:
 - Estimación de la variación de los costes de construcción, operación y mantenimiento en ambas soluciones, con y sin implementación de SUDS.
 - Evaluación de los beneficios económicos, sociales y, sobre todo, ambientales de la implementación de SUDS en el sistema de alcantarillado.
 - Valoración de la implementación del PIGSS y su impacto en la planificación del saneamiento urbano.
- Validación de los dimensionamientos volumétricos.
 - Diseño de los equipamientos de laminación mediante métodos volumétricos.
 - Comparación de los diseños estimados con los obtenidos mediante la aplicación de métodos hidrológicos e hidráulicos.
 - Validación del dimensionamiento volumétrico en diferentes escenarios.

Fase 5: Conclusiones y recomendaciones

La última fase de la metodología sintetiza los resultados obtenidos y proporciona directrices para la implementación y optimización del sistema de alcantarillado.

- Presentación de resultados:
 - Exposición de las mejoras conseguidas en términos de capacidad hidráulica del sistema, sostenibilidad ambiental y costes constructivos.
 - Evaluación de la aplicabilidad de la metodología en diversas tipologías de entornos urbanos.
 - Integración del PIGSS como estrategia de gestión a medio y largo plazo.

- Recomendaciones para futuras mejoras del sistema:
 - Directrices para la optimización del sistema a medio y largo plazo.
 - Propuesta de estrategias de mantenimiento y monitoreo del sistema.
 - Ajuste de los dimensionamientos volumétricos de los DBDI.

Esta metodología estructurada en fases garantiza un análisis completo, riguroso y secuencial del drenaje urbano, y permite analizar la viabilidad de implementar soluciones tipo DBDI en sistemas de alcantarillado para que sean sostenibles y adaptables a distintas realidades urbanas, pudiendo comprobar las mejoras que introduce en los sistemas tradicionales.

Para realizar el modelado hidrológico e hidráulico de los sistemas de alcantarillado pueden emplearse diferentes técnicas más o menos complejas (aplicables en cada caso según las características del propio sistema), que se compararán finalmente con los resultados obtenidos de manera simplificada a partir de los métodos volumétricos actualmente disponibles en España. Entre dichas técnicas se encuentran las siguientes:

- Método racional, que estima el caudal pico en el diseño de pequeñas cuencas (Tamaño no superior a 200 Ha) urbanas y rurales de drenaje sin generar el hidrograma, es decir, sin describir cómo varía temporalmente el caudal, permitiendo dimensionar las infraestructuras de drenaje para eventos extremos. Este método considera la simplificación de que la intensidad de precipitación es uniforme en toda la cuenca y que dura, al menos, el tiempo de concentración.
- Modelo de Producción de Escorrentía Superficial (SCS Curve Number Method o SCS-CN Method⁵⁴), desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) del Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) como una herramienta o modelo para estimar la escorrentía superficial en cuencas rurales y urbanas, permite calcular el volumen total de la cuenca para diferentes tiempos de concentración o duración de la tormenta sin necesidad de modelar la evolución temporal de la escorrentía. Permite estimar la escorrentía de una determinada cuenca atendiendo a la precipitación acumulada, el tiempo de concentración, el umbral de escorrentía y el tipo de terreno disponible, pudiendo aplicarse al dimensionamiento de equipamientos de laminación DBDI a partir de la estimación de los volúmenes a laminar.

⁵⁴ Primera versión: MOCKUS, Victor, et al. National engineering handbook. *US Soil Conservation Service: Washington, DC, USA*, 1964, vol. 4.

- Método del Hidrograma Completo (Full Hydrograph Method) que, basado en el Procedimiento Wallingford (Wallingford Procedure⁵⁵), permite generar hidrogramas completos que representan la variación del caudal en el tiempo, en lugar de utilizar métodos simplificados basados en caudales pico (como el método racional).
- Método de Stanford Watershed Model (SWM) que, desarrollado en la Universidad de Stanford en la década de 1960, es uno de los primeros modelos hidrológicos de simulación continua. Base de diversos modelos hidrológicos, actualmente este método es ampliamente utilizado en estudios de cambio climático o planificación de recursos hídricos, también en el dimensionamiento de presas.

⁵⁵ KELLAGHER, R. The Wallingford Procedure-for design and analysis of urban storm drainage. 1981.

6. CASOS DE ESTUDIO. DESARROLLO

La metodología sistemática planteada se va a aplicar a 3 proyectos urbanísticos que, en líneas generales, permiten abarcar un amplio espectro de casos distintos y que, además, pueden ser representativos de la implementación de los equipamientos de laminación DBDI en sistemas de alcantarillado tradicional en España. Para ello se han seleccionado 3 casos de drenaje que poseen las siguientes características fundamentales:

- En primer lugar, se localizan en diferentes puntos de España con regímenes pluviométricos distintos: uno en la provincia de Ávila, en la localidad de Candeleda, con un clima mediterráneo continental con lluvias bastante abundantes y, en general, con carácter poco torrencial; un segundo caso en la costa de la provincia de Valencia, en el municipio de Torrent, con un clima mediterráneo semiárido y lluvias en general escasas, pero de carácter frecuentemente torrencial; y un tercero caso también en la provincia de Valencia, pero en este caso en su zona interior montañosa, en la localidad de Bèlgida, con clima mediterráneo templado y lluvias más abundantes y, como en el caso anterior, también frecuentemente de carácter torrencial.
- En segundo lugar, más allá de sus tipologías específicas abarcan distintos usos urbanos generales: industriales en el caso de Candeleda y Bèlgida, y residenciales en el caso de Torrent, en este último de diversas tipologías edificatorias.
- En tercer lugar, sus superficies, ordenación urbanística y configuración urbana son variadas. En ese sentido, Candeleda prevé un polígono industrial de nueva creación alejado unos 2 km de su casco urbano y con una superficie total de unos 75.000 m², previendo manzanas industriales con tipología de bloque exento y espacios libres en parcelas; por su parte, Bèlgida recoge un polígono que prevé la regularización y ampliación de las industrias existentes en la entrada principal de su núcleo urbano, con una superficie total de unos 105.000 m², para lo que ordena manzanas compactas de tipología adosada y escasos espacios libres en las parcelas; por último, Torrent prevé una nueva zona residencial con usos unifamiliares (tanto adosados como aislados) y edificaciones plurifamiliares de tipología abierta en altura, sobre una superficie total de unos 100.000 m² que unirá el intersticio rústico actualmente existente entre 2 zonas urbanas del municipio.

La siguiente tabla recoge las características principales de los 3 casos analizados, estimándose que sus diferencias permiten el análisis y comparación de distintos casos entre sí que, además, pueden ser representativos de suficientes casos de redes de alcantarillado de España:

	Caso 1 Torrent (Valencia)	Caso 2 Candeleda (Ávila)	Caso 3 Bèlgida (Valencia)
Régimen de lluvias	Escasas y de carácter torrencial	Abundantes y poco torrenciales	Abundantes y de carácter torrencial
Superficie total (l)	102.508 m ²	74.530 m ²	104.595 m ²
Parcelas (m ²)	44.773 (43,7%)	36.004 (48,3%)	57.422 (54,9%)
Zonas verdes (m ²)	10.950 (10,7%)	5.401 (7,2%)	10.327 (9,9%)
Equipamientos (m ²)	6.150 (6,0%)	5.401 (7,2%)	250 (0,2%)
Red viaria (m ²)	40.635 (39,6%)	27.724 (37,2%)	36.596 (35,0%)
Configuración urbana	Unión entre zonas urbanas existentes	Aislado del núcleo urbano principal	Junto al núcleo urbano principal
Uso urbano general	Residencial	Industrial / Terciario	Industrial / Logístico
Tipología urbana	Unifamiliar aislado y adosado, Plurifamiliar edificación abierta	Bloque exento	Manzana compacta

Figura 33. Características fundamentales de los casos de estudio (Fuente: elaboración propia).

6.1. Red de drenaje del Sector residencial 6 “Marxadella” de Torrent (Valencia)

6.1.1. Fase 1: Recolección de información y análisis preliminar

6.1.1.1. Caracterización del área de estudio

➤ Ordenación urbana y usos del suelo. Topografía y geotecnia

El Sector 6 “Marxadella” es un área de suelo urbanizable residencial con una superficie de 102.505,20 m² situada en el sureste del municipio de Torrent (Valencia). El instrumento de planeamiento que ordena el sector fue aprobado por Resolución de 28 de enero de 2005, del Conseller de Territorio y Vivienda, de aprobación definitiva y homologación del plan parcial del Sector 6 Marxadella (BOP Valencia 05/06/2005).

Su ordenación prevé la creación de un total de 16 manzanas de uso dominante residencial, una zona de equipamiento educativo-cultural y 6 zonas verdes, todo ello unido por la red viaria. Al tratarse de un nuevo desarrollo en zona urbana existen todo tipo de servicios e infraestructuras en el propio ámbito y su entorno más próximo, como son líneas eléctricas, alumbrado público, redes de distribución de gas, redes de telecomunicaciones, redes de agua potable y colectores de saneamiento, lo que permite conexiones de forma inmediata.

6.1.1.2. Análisis del sistema de alcantarillado actual

➤ Datos básicos. Caracterización del estado actual

Dentro del ámbito la lluvia es mayoritariamente filtrada al subsuelo, o en caso de saturación del suelo, los terrenos escurren superficialmente sus aguas hacia las zonas más bajas del entorno inmediato, hacia la zona urbana existente al norte, Parc Central. Existen excepciones en las calles parcialmente urbanizadas del entorno, donde se presentan elementos de drenaje urbano como imbornales, que se encuentran conectados a las redes de saneamiento existentes.

Desde Aigües de l'Horta (en adelante AdIH), empresa concesionaria de los servicios de agua potable, saneamiento de aguas residuales y gestión de aguas pluviales del municipio, se ha facilitado información de todos estos servicios, en particular, del trazado de las redes de saneamiento y aguas pluviales existentes en el entorno, incluyendo localización de pozos de registro, su profundidad, y diámetro y características de los colectores existentes. Esta información de la red separativa de saneamiento existente en esta zona del municipio se ha completado, a su vez, mediante el correspondiente levantamiento topográfico, que ha permitido disponer de una información completa del estado actual y capacidad de estas redes.

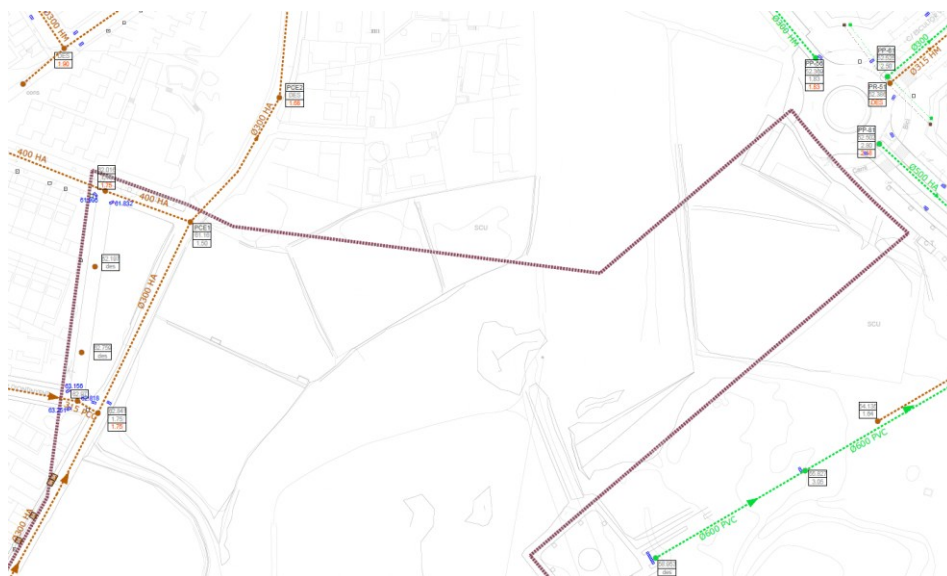


Figura 35. Redes de saneamiento existentes en el Sector 6 Marxadella y su entorno
(Fuente: Proyecto de urbanización).

➤ Puntos críticos de la red

El drenaje natural de la zona se materializa en dirección SW-NE, por lo que existen diversas cuencas externas, provenientes de la urbanización El Vedat y la zona urbana Marxadella, que vierten su escorrentía superficial al nuevo Sector 6.

Por dichas razones esta zona es sensible a inundación, y dado que según la información facilitada los colectores generales existentes aguas abajo están ya trabajando al límite de su capacidad, se hace necesario el diseño de alternativas en la red de drenaje, como son los SUDS. De este modo, desde la concesionaria se limitan los caudales pluviales a verter a las redes existentes aguas abajo, como máximo, al 50% de su capacidad total. Asimismo, se indica la necesidad de instalar dos DBDI en caso de superarse dicho límite que, debido a la topografía natural del ámbito y a las rasantes proyectadas, deberán situarse en la avenida central E-W del sector antes de la conexión de la nueva red con los colectores existentes aguas abajo en Parc Central. En este caso se analiza únicamente el llamado depósito nº1, situado en la zona central.

Así pues, la solución de drenaje pasa por la división en tres zonas de la red diseñada, de acuerdo con las 3 grandes cuencas identificadas en el análisis de escorrentías. El depósito nº 1 objeto del presente caso laminará la cuenca central del sector, que incluye una parte de cuencas externas e incorporará, según se detallará posteriormente, un aliviadero de hormigón que, en última instancia, se conectará a la red general de aguas pluviales existente aguas abajo, en concreto a un colector de 500 mm de diámetro presente en la Av. Barcelona'92.

➤ Requisitos normativos

Los criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales se resumen en la siguiente tabla:

Tipos de tuberías utilizadas	Hormigón armado clase 90
Diámetro nominal colector mínimo	400 mm
Tubo de imbornal	250 - 315 mm
Velocidad máxima	4 m/s (puntualmente 4,3 m/s)
Velocidad mínima	1 m/s (puntualmente 0,5 m/s)
Limitación caudal conexión red general	50% capacidad del colector disponible
Espaciamiento máximo entre pozos	50 m
Recubrimiento mínimo	100 cm (75 cm en cabeceras).

Figura 36. Criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales de Torrent (Fuente: Proyecto de urbanización).

6.1.2. Fase 2: Diagnóstico del sistema tradicional

6.1.2.1. Modelado hidrológico e hidráulico

Los parámetros fundamentales del modelado hidrológico e hidráulico realizado para este caso concreto (sólo la cuenca central) se resumen en la siguiente tabla:

Metodología considerada	Instrucción 5.2-IC "Drenaje superficial"	
Metodología de cálculo	Método racional, T = 25 años	
Datos pluviométricos:	Pd = 157,35 mm/día, Id = 6,56 mm/h	
Coef. escorrentía pavimentos	0,9684	18.299 m ²
Coef. escorrentía parcelas urbanas	0,5587	18.960 m ²
Coef. escorrentía cuencas externas urbanas	0,5587	1.000 m ²
Coef. escorrentía zonas verdes	0,3632	5.856 m ²
Coeficiente de rugosidad tuberías	Hormigón n = 0.015	

Figura 37. Parámetros fundamentales del modelo hidrológico e hidráulico empleado en Torrent, sin SUDS, cuenca central (Fuente: elaboración propia).

A partir de lo anterior, se ha realizado un diseño completo de la red de drenaje proyectada en Torrent, así como su correspondiente modelo de cálculo según el método de la Instrucción 5.2-IC, incluyéndose ambos como documentos anexos DA-1_01 (planos de planta) y DA-1_02 (modelo de cálculo de la red laminada en el depósito nº 1) al final del presente trabajo.

6.1.2.2. Identificación de deficiencias

Tal y como se comprueba en el modelo realizado (véanse documentos anexos DA-1_01 y DA-1_02), el diámetro necesario del colector principal (denominado PL131-PL139 en el DA-1_02) de la cuenca central que finalmente se conecta a la red general existente aguas abajo (denominado PP-81 en el DA-1_02) supera no sólo el límite máximo establecido del 50% de la capacidad de la red existente, sino que incluso es mayor ($\Phi = 800$ mm de la nueva red frente a 500 mm de la red existente), con lo que los caudales vertidos de la zona central de la nueva red de drenaje del Sector 6 producirán desbordamientos al conectarse con la red existente aguas abajo en la avenida Barcelona'92, en este caso, únicamente de aguas pluviales, aunque con los problemas de contaminación asociados a este tipo de redes en zonas urbanas.

Es más, también los 2 ramales principales (denominados AR-01 y AR-02 en el DA-1_02) que, en última instancia, se conectan a dicho colector final superan ya ampliamente el límite del 50% de la capacidad de la red existente en la que se prevé la conexión de la nueva red, puesto que cada una de estas 2 subcuencas ya precisa un colector de 600 mm de diámetro, mayor al colector disponible aguas abajo ($\Phi = 500$ mm).

En consecuencia, el diseño de un sistema de alcantarillado tradicional no es viable en este caso, entre otras cuestiones, por la insuficiente capacidad de la red a la que se evacúan las aguas pluviales y los importantes caudales que se vierten a la misma procedentes de la cuenca central del nuevo Sector 6 de Torrent, que se estiman en 1,159 m³/s para un periodo de retorno de 25 años, frente a los 0,184 m³/s disponibles en la canalización $\Phi = 500$ mm existente, 50% de su capacidad total, según se comprueba con el siguiente cálculo de dicho colector:

APLICACIÓN DE MANNING-STRICKLER		Pendiente 2%	
$Q = V \cdot S = S \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \cdot K \cdot U$			
Diámetro tubería		D=	0,5000 m
Radio tubería		R=	0,2500 m
Máx. llenado	50%	h=	0,2500 m
Ángulo mojado	-0,8	α =	4,9962 rad
Perímetro mojado		pm=	1,2490 m
Término C			0,5000
Sección mojada		Sm=	0,156130722 m ²
Radio hidráulico		Rh=	0,125 m
	k= 66,66667	n=	0,015
	U= 1		
Pendiente		p=	0,02 m/m
Velocidad		v=	2,357022604 m/s
Caudal		Q=	0,36800364 m ³ /s
		Qrequerido=	1,159 m ³ /s
Comprobación		50%	0,18400182
Cumple?	NO		

Figura 38. Estimación de la capacidad disponible para la cuenca central del Sector 6 de Torrent en la red de aguas pluviales existente (Fuente: elaboración propia).

Así pues, para viabilizar este diseño sería preciso acondicionar la red de pluviales existente aguas abajo o ejecutar una nueva red en paralelo que evacuase exclusivamente los caudales procedentes de la nueva urbanización hasta el punto de drenaje final, sin aportar más caudales a las canalizaciones existentes en Parc Central puesto que ya presentan problemas de insuficiencia de capacidad de evacuación durante los episodios de lluvia en la localidad.

Consultadas las redes existentes aguas abajo, se comprueba que las canalizaciones pluviales tienen una longitud total de 625 m hasta el punto de vertido final al colector general de drenaje del ámbito Parc Central de Torrent, localizado aproximadamente en la intersección entre las calles Londres'48 y Múnich'72, variando su diámetro entre los 500 mm de la Av. Barcelona'92 hasta 2.000 mm en el punto de vertido, diámetro importante porque que estas canalizaciones drenan buena parte de esta zona de Torrent. Además, discurren siempre por una zona urbana densamente poblada y con gran presencia de infraestructuras urbanas, con lo que la reposición de las canalizaciones existentes o la ejecución de un nuevo colector para el Sector 6 Marxadella, además de un importante coste económico, generaría notables efectos negativos para la población de esta zona durante la realización de las obras que se precisan.

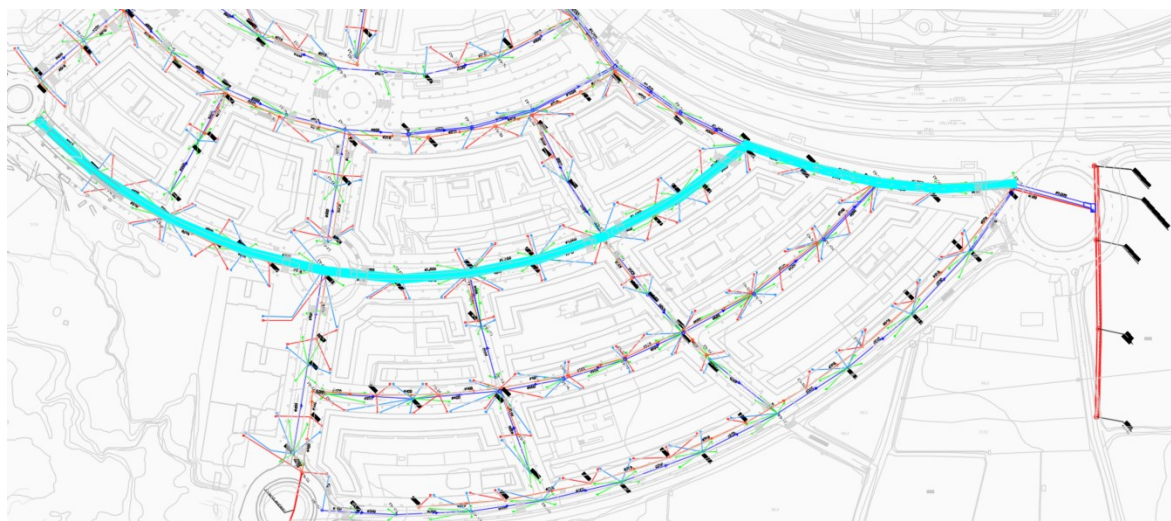


Figura 39. Redes de saneamiento existentes aguas abajo del Sector 6 Marxadella y trazado del nuevo colector pluvial (en color azul) necesario (Fuente: Elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización e información de AdlH).

Considerando más factible la construcción de un nuevo colector de hormigón $\Phi = 800$ mm hasta el punto de vertido final de Parc central, esta nueva infraestructura de drenaje tradicional tendría una longitud total de los citados 625 m y se precisarían en torno a 20 pozos de registro, estimándose para estas obras un coste de ejecución material de unos 350.000 - 400.000 €.

Asimismo, en esta solución habría que contemplar la adecuación del punto de vertido existente y del colector general de drenaje de Parc Central de Torrent para tratar los nuevos caudales aportados, lo que incrementaría los costes anteriores. No obstante, no se ha podido determinar el coste aproximado de estas obras adicionales por desconocerse su alcance.

Con todo lo anterior, la extensión de un sistema de alcantarillado tradicional más allá de los límites del Sector 6 tampoco se considera adecuado porque, más allá de su coste económico y las repercusiones sociales que tendría esta obra externa, en última instancia tampoco se cuenta con capacidad suficiente en el punto de vertido, agravando así los problemas de inundación ya existentes en esta importante zona residencial de Torrent.

6.1.3. Fase 3: Diseño de propuestas de mejora

6.1.3.1. Selección de SUDS, equipamientos de laminación

Considerando la inexistencia de cauces cercanos y teniendo en cuenta, asimismo, la falta de capacidad de las redes de saneamiento existentes en el entorno para evacuar las aguas pluviales del Sector 6 de Torrent, la implantación de elementos tipo DBDI es necesaria para garantizar el correcto drenaje en este nuevo ámbito urbano, tratándose de un caso claro de complementariedad de los SUDS en los sistemas de drenaje tradicionales. En este caso

particular se da la circunstancia, además, que este tipo de sistemas son necesarios no sólo para garantizar el correcto drenaje del Sector 6, sino también para aquellas zonas urbanas de la localidad que, por escorrentía superficial, acaban evacuando sus aguas pluviales a este ámbito, y también para aquellas otras situadas aguas abajo que ya presentan en la actualidad problemas puntuales de inundación pluvial, por lo que es necesario adoptar otro tipo de medidas adicionales a los sistemas tradicionales de alcantarillado que mejoren el drenaje de Parc Central y eviten los actuales problemas de inundación.

Atendiendo a exigencias del promotor y considerando también la ordenación urbana prevista para el Sector 6 y la topografía disponible en la zona, en este caso particular se contemplan depósitos de hormigón armado cilíndricos y semienterrados, con lo que únicamente se podrá aprovechar su función laminadora, no así de infiltración al subsuelo. Asimismo, las aguas laminadas podrán reutilizarse para otros usos en el propio sector o en las zonas urbanas próximas, como puede ser el riego de zonas verdes y baldeo de calles.

Aunque no son objeto del presente trabajo, cabe añadir que complementariamente se han considerado otro tipo de técnicas SUDS en el proyecto del Sector 6, como son jardines de lluvia en diversas zonas verdes, zanjas filtrantes en medianas viarias y pavimentos permeables.

6.1.3.2. Elaboración del diseño conceptual del sistema de alcantarillado mejorado

El depósito nº 1 analizado en este caso necesariamente deberá ubicarse en la zona central del Sector 6 Marxadella de Torrent, en el interior de una glorieta viaria de diámetro $\Phi = 45$ m, debiendo permanecer su zona externa necesariamente ajardinada y sin obstáculos visuales, con lo que el diámetro máximo de este depósito no podrá superar los 25 m. Asimismo, su altura total no rebasará los 4 m.

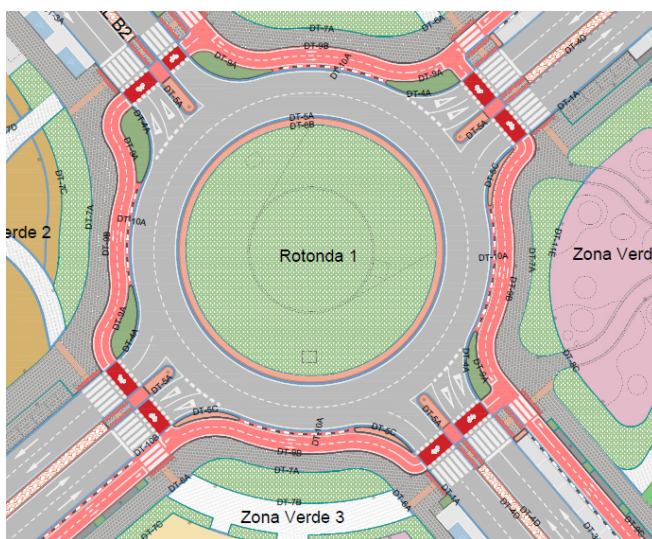


Figura 40. Ordenación prevista en el entorno donde se ubicará el depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent (Fuente: Proyecto de urbanización).

DATOS FINALES**Caudal entrada DBDI**

Punto entrada	m ³ /s
AR-01 - V-01	0,769
AR-02 - V-02	0,390
TOTAL ENTRADA	1,159

Q salida PC1

Punto vertido	m ³ /s
PP-81	0,368
50% calado	0,184

Tiempo de concentración de las cuencas

	h
AR-01 - V-01	0,194
AR-02 - V-02	0,255

Volumen necesario depósito

	m ³
Caudal depósito centro	894

Depósito

Diámetro (m)	20
Altura libre (m)	3,5
Altura libre - resguardo (m)	3,3
Volumen libre (m ³)	1.100
Volumen libre - resguardo (m ³)	1.037
Laminación cuencas centro	116%

Como predimensionamiento, por la concesionaria municipal de las redes de saneamiento se ha establecido para este caso que el volumen de los depósitos se calcule como la diferencia de caudal de entrada y salida para una intensidad de lluvia dada durante el tiempo de duración de esa lluvia, asimilado en este caso al tiempo de concentración de cada cuenca.

A partir de lo anterior y para el caso concreto del depósito nº 1, se precisa un volumen de laminación de unos 900 m³, que podrá conseguirse mediante un nuevo depósito de 20 m de diámetro y 3,5 m de altura total, garantizándose la completa laminación de esta cuenca.

Figura 41. Predimensionamiento del depósito nº1 de Torrent (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización).

Atendiendo a la información facilitada por AdIH y la recogida en el propio Proyecto de urbanización del Sector 6 Marxadella, el coste completo de ejecución material de este depósito de laminación semienterrado es aproximadamente de 250.000 €.

6.1.4. Fase 4: Evaluación de la implementación de SUDS en el sistema de alcantarillado

6.1.4.1. Simulación del sistema mejorado

Para el modelado hidrológico e hidráulico del nuevo sistema de alcantarillado con DBDI se ha empleado el Método Racional, aunque en este caso comparando la metodología prevista en la Instrucción 5.2-IC con el Método Racional Calibrado diseñado por la Normativa para obras de saneamiento y drenaje urbano de la ciudad de Valencia, año 2015, que adapta el Método Racional a las características hidrológicas específicas de la ciudad y su área metropolitana, como son unos coeficientes de escorrentías concretos y el cálculo de la intensidades de lluvia a partir de una curva IDF calibrada para la ciudad en función de la duración de los aguaceros y su periodo de retorno para los máximos aguaceros anuales.

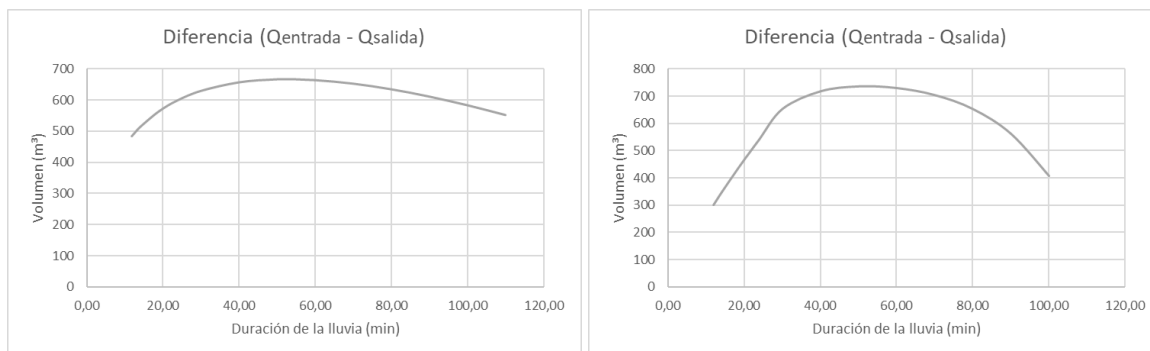


Figura 42. Volumen necesario del depósito nº 1 de Torrent en función de la duración de la lluvia; izquierda según 5.2-IC y derecha según MRC Valencia (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización).

Como se puede observar en estos gráficos y se detalla en los modelos de cálculo presentados a continuación, aunque el resultado final en ambas simulaciones no es completamente igual sí coinciden, en primer lugar, en estimar un volumen máximo necesario para el depósito en torno a $650\text{-}750\text{ m}^3$ y, segundo, que dicho volumen máximo se precisará en torno a un tiempo de duración de la lluvia de 50 minutos, sensiblemente superior al tiempo de concentración de la cuenca central analizada, que es de unos 12 minutos.

En consecuencia, el predimensionamiento anterior de 900 m^3 mínimos y depósito final de 1.100 m^3 de capacidad realizado según los parámetros establecidos por la concesionaria municipal AdIH, sería más que suficiente para garantizar la total laminación de la red de aguas pluviales de esta cuenca, en este caso para la lluvia asociada a un periodo de retorno de 25 años, con aliviadero a la red existente aguas abajo de $\Phi = 500\text{ mm}$ y capacidad de uso al 50%, según los requerimientos antes detallados.

Así pues, la implementación de un depósito DBDI mejora notablemente el comportamiento hidráulico de este sistema de drenaje, a la par que permite también incrementar la calidad del agua de lluvia y los problemas ambientales que puede provocar su contaminación, puesto que las primeras aguas más contaminadas serán depositadas en el fondo para posteriormente ser bombeadas y evacuadas a la red de saneamiento, tratándose finalmente en las correspondientes instalaciones de depuración de la localidad.

De la misma manera, este tipo de infraestructuras de laminación ayudará a mejorar notablemente el drenaje de esta zona de la localidad, que ya presenta actualmente problemas de inundación por la insuficiente capacidad de los colectores de aguas pluviales.

Área	0,024320	km²	Cuenca vertiente										
Id	6,556	mm/h	Intensidad precipitación										
tc	0,198	h	Tiempo de concentración	11,88 min									
I1/Id	11		Índice torrencialidad										
C	0,709		Coeficiente de escorrentía										
Ka	1,000		Factor de intensidad										
Po	17,872	mm	Umbral de escorretnía										
Q	0,863	m³/s	Caudal de proyecto										
IDF		tc (h)		Altura precip (mm)		K	m³/s	min	V entrada	Qsalida	Diferencia Q	Vsalida	Diferencia
Tiempo de concentración		178,559		h =	35,355 mm	1,00934599	0,863	11,88	614,99	0,184	0,679	131,16	483,83
Inten.media	It = 178,557 mm/h	t = 0,198	h = 35,355 mm	1,00934632	0,863	11,88	615,00	0,184	0,679	131,16	483,83		
	It = 177,636 mm/h	t = 0,200	h = 35,527 mm	1,00946303	0,858	12,00	618,06	0,184	0,674	132,48	485,58		
	It = 170,417 mm/h	t = 0,217	h = 36,924 mm	1,01044842	0,824	13,00	642,98	0,184	0,640	143,52	499,46		
1,2*tc	It = 162,393 mm/h	t = 0,238	h = 38,586 mm	1,01171061	0,787	14,26	672,76	0,184	0,602	157,39	515,37		
	It = 139,315 mm/h	t = 0,317	h = 44,136 mm	1,01669389	0,678	19,01	773,33	0,184	0,494	209,86	563,47		
2*tc	It = 123,318 mm/h	t = 0,396	h = 48,835 mm	1,02194668	0,603	23,76	860,08	0,184	0,419	262,32	597,76		
	It = 108,243 mm/h	t = 0,500	h = 54,121 mm	1,02915639	0,533	30,00	959,91	0,184	0,349	331,20	628,70		
	It = 91,767 mm/h	t = 0,667	h = 61,178 mm	1,04125358	0,457	40,00	1.097,82	0,184	0,273	441,60	656,22		
	It = 80,468 mm/h	t = 0,833	h = 67,057 mm	1,05381126	0,406	50,00	1.217,83	0,184	0,222	552,01	665,82		
	It = 72,119 mm/h	t = 1,000	h = 72,119 mm	1,06666667	0,368	60,00	1.325,73	0,184	0,184	662,41	663,32		
	It = 65,636 mm/h	t = 1,167	h = 76,575 mm	1,07970448	0,339	70,00	1.424,85	0,184	0,155	772,81	652,04		
	It = 60,421 mm/h	t = 1,333	h = 80,562 mm	1,09283886	0,316	80,00	1.517,27	0,184	0,132	883,21	634,06		
tc = 1,5 h	It = 56,115 mm/h	t = 1,500	h = 84,172 mm	1,10600386	0,297	90,00	1.604,37	0,184	0,113	993,61	610,76		
	It = 52,485 mm/h	t = 1,667	h = 87,474 mm	1,11914778	0,281	100,00	1.687,12	0,184	0,097	1.104,01	583,11		
	It = 49,373 mm/h	t = 1,833	h = 90,518 mm	1,13222958	0,268	110,00	1.766,22	0,184	0,084	1.214,41	551,81		
Volumen máximo							50,00						665,82

Figura 43. Modelo hidrológico e hidráulico de la cuenca central del Sector 6 de Torrent según la norma 5.2-IC (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto).

6.1.4.2. Análisis global coste-beneficio

La introducción de elementos tipo DBDI en las redes de saneamiento de esta zona de Torrent, es un claro ejemplo del beneficio que este tipo de SUDS puede producir en la reducción de los volúmenes de escorrentía en las zonas urbanas, lo que disminuye los riesgos de inundaciones pluviales asociados, y la complementariedad que estos elementos pueden tener con las redes de saneamiento tradicionales, que resultan insuficientes en este caso.

En efecto, este ejemplo ha permitido comprobar que el empleo exclusivo de los sistemas tradicionales no es posible sin recurrir a grandes obras que, de manera complementaria, precisaría afectar a otros ámbitos mucho mayores para aumentar los diámetros de las canalizaciones de drenaje hasta los puntos finales de vertido, no impidiendo ello la contaminación del medio sin adoptar otros sistemas adicionales debido a los contaminantes presentes en las aguas de drenaje urbanas. En cambio, la intercalación de elementos de laminación tipo DBDI, además de reducir los caudales punta y, en consecuencia, los costes de construcción asociados a las canalizaciones y demás elementos de la red, también permite el tratamiento previo de las aguas de drenaje antes de su vertido al medio, a partir de la incorporación de las aguas pluviales más contaminadas depositadas en los fondos de las instalaciones de laminación hacia las canalizaciones de aguas residuales, así como su posible reutilización para otros usos, con los consiguientes beneficios ambientales.

De la misma manera, este tipo de soluciones presenta unos beneficios sociales muy importantes para la población de esta zona de Torrent, puesto que la laminación de caudales conseguida con nuevos elementos DBDI ayudará a disminuir los problemas de inundabilidad existentes aguas abajo. Asimismo, la gestión propia de las aguas pluviales dentro del Sector 6 tendrá efectos positivos en la población del entorno más cercano, en tanto que no precisará de obras externas con importantes consecuencias durante su ejecución para la población afectada.

Por su parte, la implementación de DBDI en este caso también repercute positivamente en el coste de construcción de la nueva infraestructura de drenaje, pasando de los 350.000 -400.000 € estimados mediante el empleo exclusivo de sistemas tradicionales a unos 250.000 € con SUDS, es decir, cerca de un 30% menos de coste en el peor de los casos, todo ello sin contar otras obras adicionales en los puntos de vertido que, según se ha adelantado anteriormente, incrementará el coste exterior de la red de drenaje con sistemas tradicionales.

Por último, también es necesario añadir que el diseño global planteado para la red de drenaje del Sector 6 de Torrent, separativa respecto a la red de saneamiento de aguas residuales, muestra igualmente la forma de proceder que ha de considerarse en los PIGSS, mediante un

buen diagnóstico del estado del sistema y sus puntos críticos, un adecuado diseño, planificación global del saneamiento urbano y modelado de su funcionamiento en diferentes hipótesis y, por último, la determinación de las obras y demás actuaciones necesarias para alcanzar los objetivos perseguidos y lograr el mejor rendimiento final de la red general de saneamiento, tanto desde el punto de vista económico como ambiental y social.

6.1.4.3. *Dimensionamiento volumétrico. Validación*

Para realizar el dimensionamiento volumétrico en este caso van a emplearse, por proximidad, los parámetros de diseño considerados en la Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València [6], en tanto que el Sector 6 Marxadella de Torrent se sitúa a escasos 10 km de esta ciudad y, en consecuencia, su metodología es la más extrapolable de todas las guías disponibles en España.

Para ello se van a considerar las superficies de cada tipo de suelo, su coeficiente a efectos de impermeabilidad y el criterio de percentil asociado a las diferentes tipologías edificatorias definidas en el plan, resultando:

Tipología de suelos	Superficie inicial		Coeficiente de zona	Superficie	S6 Torrent. SUDS mínimo		Volumen
	4,412 Ha	44.115 m²			Criterio volumétrico		
Pavimentos	1,830 Ha	18.299 m²	0,95	17.384 m²	Vx	23,50 mm	409 m³
Parcelas residenciales	1,896 Ha	18.960 m²	0,50	9.480 m²	Vx	23,50 mm	223 m³
Cuencas externas	0,100 Ha	1.000 m²	0,85	850 m²	Vx	23,50 mm	20 m³
Zonas verdes	0,586 Ha	5.856 m²	0,30	1.757 m²	Vx	23,50 mm	41 m³
Dimensionamiento volumétrico de SUDS según la <i>Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València</i>	Actuaciones a nivel de sector				Criterio percentiles de lluvia por tipologías edificatorias existentes		
	Tipología urbana		Criterio	V _x (mm)			
	Centros históricos protegidos		V ₆₀	8			
	Ensanche		V ₆₀	8			
	Edificación abierta		V ₆₀	20			
	Unifamiliar		V ₆₅	27			
	Industrial		V ₆₀	20			
	Terciario		V ₆₀	20			
	Tabla 9. Criterios de dimensionamiento por tipología edificatoria.						
	Ensanche		Ed. Abierta	Unifamiliar			
Vx		Vx	Vx				
V60		V80	V85				
8 mm		20 mm	27 mm				
0%		50%	50%				
Percentil		Vx = 23,50 mm					

Figura 45. Dimensionamiento volumétrico del depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent según la guía de la ciudad de València (Fuente: elaboración propia)

A su vez, este dimensionamiento se puede comparar con los diseños realizados anteriormente según los diferentes modelos empleados, resultando:

	Volumen (m ³)	% s/Dim.Vol	Vx (mm)
Predimensionamiento concesionaria	900 m ³	29,95%	30,54 mm
Método racional 5.2-IC	666 m ³	-3,86%	22,59 mm
Método racional calibrado Valencia	735 m ³	6,17%	24,95 mm
Dimensionamiento volumétrico	693 m³	0,00%	23,50 mm
Depósito nº 1 Torrent	1.037 m ³	49,73%	35,19 mm

Figura 46. Comparación de métodos de diseño en el caso del depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent (predimensionamiento, modelos, volumétrico y DBDI final).

De la comparativa anterior se comprueba que, en líneas generales, el dimensionamiento mediante métodos volumétricos de este DBDI de Torrent se ajusta bien al realizado a partir de modelos hidrológico-hidráulicos, como es el método racional empleado en las metodologías de la norma 5.2-IC y la normativa de saneamiento de la ciudad de València, con los que difiere menos de un 10%, situándose en la media entre ambas metodologías.

Por su parte, el dimensionamiento final de este DBDI, como hipótesis más conservadora de diseño y del lado de la seguridad, ha adoptado un volumen sensiblemente mayor al necesario según los diferentes modelos utilizados, superándolos en torno al 50%, volumen que se aproxima al percentil 90 de la ciudad de València, es decir, aquél no superado por el 90% de los eventos de precipitación acumulada, todo ello para minimizar posibles episodios de inundación en la zona. Esta mayoración del volumen será tratada en apartados posteriores, junto con los resultados obtenidos para los otros 2 casos de estudio.

6.2. Red de drenaje del Sector industrial SUR-3 “Carrascales” de Candeleda (Ávila)

6.2.1. Fase 1: Recolección de información y análisis preliminar

6.2.1.1. Caracterización del área de estudio

➤ Ordenación urbana y usos del suelo. Topografía y geotecnia

El Sector SUR-3 “Los Carrascales” es un área de 74.530,19 m² de suelo urbanizable industrial situada al suroeste del casco urbano de Candeleda (Ávila), junto a la carretera CL-501. La Revisión de las Normas Urbanísticas Municipales que, entre otros, ordena este sector fue aprobada el 1 de octubre de 2021 (Boletín Oficial de Castilla y León de 22/10/2021).

Su ordenación prevé la creación de un total de 4 manzanas industriales, otra manzana para uso terciario, 2 zonas de equipamientos y espacios libres de transición en gran parte del perímetro, todo ello unido por viario. Al tratarse de un nuevo desarrollo en zona rústica alejado del casco urbano no se dispone de servicios e infraestructuras dentro del ámbito de actuación, más allá de algunas líneas aéreas eléctricas y de telecomunicaciones y canalizaciones de agua potable para el campo de fútbol, que se sitúa a unos 100 m al oeste. Por el contrario, no existe ningún tipo de instalación de saneamiento en el ámbito ni su entorno inmediato.

La topografía del ámbito es la propia de esta zona del municipio, con las mayores alturas (376 m.s.n.m.) localizadas en el extremo norte y las menores (370 m.s.n.m.) en el sur, desnivel de 6 m sensiblemente constante que en los aproximadamente 490 m de distancia que hay entre ambos extremos, suponen una pendiente media en torno al 1,25% en sentido sur-suroeste.

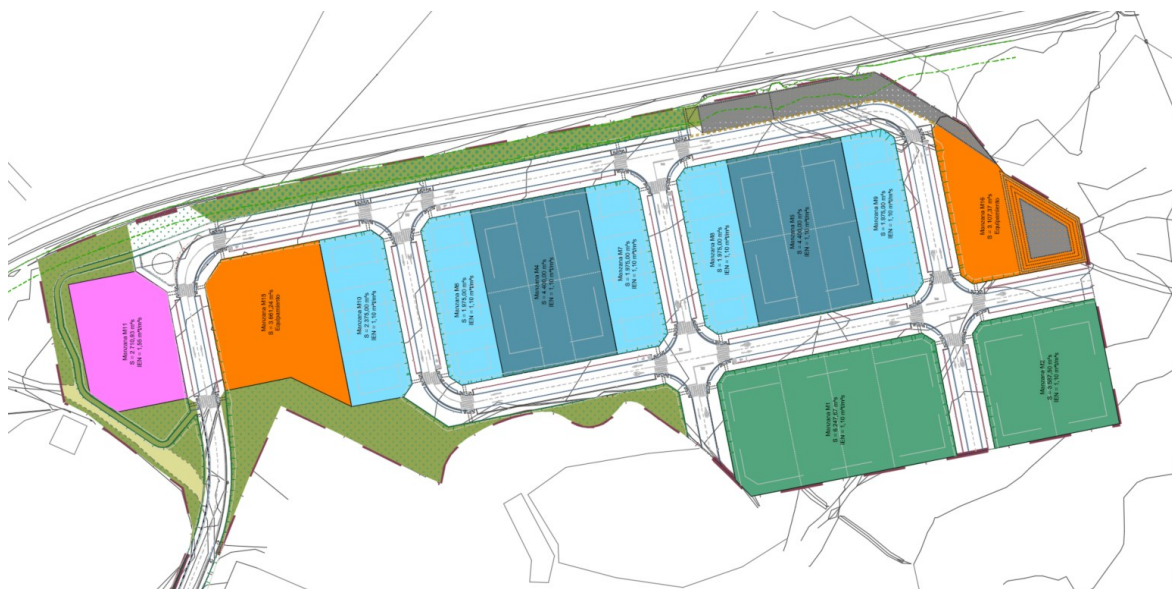


Figura 47. Ordenación Sector SUR-3 (Fuente: Proyecto de urbanización).

En cuanto a la geotecnia de la zona, los materiales presentes son conglomerados silíceos, arenas y lutitas, que intercalan bolos de notable dimensiones a partir de la profundidad 300 cm, todo ello bajo un primer nivel de terreno vegetal de unos 40 cm de espesor. Este terreno, además, presenta una elevada permeabilidad, con valores de 10^{-3} m/s para el nivel inferior.

➤ Datos pluviométricos

Al tratarse de cuencas pequeñas, en este caso son apropiados los métodos hidrometeorológicos contenidos en la Instrucción 5.2- IC “Drenaje Superficial”, considerando un periodo de retorno de 25 años, atendiendo a la normativa empleada y los criterios del promotor.

Con ello se tienen los siguientes datos pluviométricos: $P_d = 164,54$ mm/día, $I_d = 6,86$ mm/h.

➤ Marco normativo aplicable

Instrucción 5.2-IC “Drenaje superficial”.

6.2.1.2. Análisis del sistema de alcantarillado actual

➤ Datos básicos. Caracterización del estado actual

Dentro del ámbito la lluvia es actualmente filtrada al subsuelo, o en caso de saturación del suelo, los terrenos vierten sus aguas finalmente por escorrentía natural hacia el río Tiétar, que se encuentra a más de 3 km al sur del ámbito de actuación. Por ello, no existe un sistema de drenaje de pluviales en el ámbito de actuación, más allá de las cunetas de drenaje de carácter más o menos natural distribuidas a lo largo del terreno.



Figura 48. Drenaje natural existente en la zona sur del ámbito, ODT en la carretera CL-501 y continuación hacia el sur (Fuente: elaboración propia).

De la misma manera, tampoco existe una red de saneamiento en la actuación ni su entorno, hallándose la infraestructura más cercana a unos 500 al SE, la denominada EBAR El Carrascal, situada en el lado este de la carretera CL-501, a la altura del Camino del Lomo y que, mediante la impulsión correspondiente, evacúa las aguas residuales que recoge hasta la EDAR municipal, situada en el extremo este del término municipal junto al Arroyo Nogalera.



Figura 49. EBAR El Carrascal de Candeleda, infraestructura de saneamiento más próxima del sector SUR-3 (Fuente: elaboración propia).

➤ Puntos críticos de la red

El drenaje natural de la zona se materializa en dirección sur, sin que exista en el ámbito ni su entorno canalizaciones de aguas pluviales ni una red natural de drenaje, puesto que no se presentan ríos o barrancos claramente definidos en la zona, más allá de la formación de pequeñas escorrentías naturales de escasa capacidad que inundan el terreno a su alrededor en episodios importantes de lluvias, cuando el suelo de elevada permeabilidad se satura.

La creación de un nuevo polígono industrial en este entorno producirá un incremento de la escorrentía a causa del aumento de suelo sellado, lo que puede generar problemas de drenaje en esta zona. Por ello, se hace necesario plantear alternativas de diseño en la red de drenaje

del nuevo polígono, como son los SUDS, concretamente DBDI, con los que se podrán infiltrar y laminar los caudales de aguas pluviales recogidos en el ámbito antes de su retorno, en su caso, a las pequeñas escorrentías naturales presentes al sur.

Asimismo, se precisa que la red de saneamiento del nuevo polígono sea separativa, con una red de aguas residuales diferenciada de la red de aguas pluviales que evacúe aguas fecales hacia la citada EBAR El Carrascal, con su posterior tratamiento en la EDAR municipal. De esta manera se conseguirán tratar conveniente las aguas residuales que se generen en el nuevo polígono, sin que se produzca ningún tipo de vertido de estas aguas en la red de pluviales y, en última instancia, en el drenaje natural de la zona.

➤ Requisitos normativos

Los criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales se resumen en la siguiente tabla:

Tipos de tuberías utilizadas	PEAD clase SN-8
Diámetro nominal colector mínimo	400 mm
Tubo de imbornal	250 - 315 mm
Velocidad máxima	3 m/s (puntualmente 4 m/s)
Velocidad mínima	1 m/s (puntualmente 0,5 m/s)
Espaciamiento máximo entre pozos	50 m
Recubrimiento mínimo	100 cm (75 cm en cabeceras).

Figura 50. Criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales de Candeleda
(Fuente: Proyecto de urbanización).

Asimismo, el vigente Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo 2023-2027⁵⁶ establece en el artículo 34 de sus disposiciones normativas (en adelante PHDHT), diversas limitaciones a considerar para los desbordamientos de las redes de pluviales hacia los cauces de esta demarcación. Las limitaciones de aplicación al presente caso se describen literalmente a continuación:

“2. Los puntos de desbordamiento en las redes de recogida de aguas pluviales deberán disponer de tanques de tormenta que permitan retener una lluvia de 20 minutos con una intensidad de 10 l/s·ha, considerando la totalidad de la cuenca de aportación y un coeficiente de escorrentía de valor la unidad, sin perjuicio de que en el correspondiente estudio de detalle, se justifiquen otros valores en el dimensionamiento de los tanques de tormenta que garanticen que no se produzcan efectos perjudiciales sobre la calidad de las aguas por la incorporación al cauce de las primeras aguas de escorrentía.

⁵⁶ Aprobado por el Real Decreto 35/2023, de 24 de enero (BOE núm. 35, de 10 de febrero de 2023). Link: <https://www.boe.es/boe/dias/2023/02/10/pdfs/BOE-A-2023-3511.pdf>. U.A.V. 24/04/2025.

3. El caudal máximo que pudiera incorporarse al cauce en los puntos de desbordamiento, tanto en redes unitarias como de recogida de pluviales, no podrá superar nunca un valor equivalente al 10 % del caudal circulante por el cauce en régimen natural, para un periodo de retorno igual al de diseño de la red, sin perjuicio de que en el correspondiente estudio de detalle, se justifiquen valores superiores que garanticen que, para el mismo periodo de retorno, no se produce un incremento del caudal circulante por el cauce respecto a la situación preoperacional”.

6.2.2. Fase 2: Diagnóstico del sistema tradicional

6.2.2.1. Modelado hidrológico e hidráulico

Los parámetros fundamentales del modelado hidrológico e hidráulico realizado para este caso concreto (sólo red interior del polígono industrial) se resumen en la siguiente tabla:

Metodología considerada	Instrucción 5.2-IC “Drenaje superficial	
Metodología de cálculo	Método racional, T = 25 años	
Datos pluviométricos:	Pd = 164,54 mm/día, Id = 6,86 mm/h	
Coef. escorrentía pavimentos	0,9954	17.844 m ²
Coef. escorrentía parcelas urbanas	0,8807	38.387 m ²
Coef. escorrentía cuencas externas urbanas	0,5518	0 m ²
Coef. escorrentía zonas verdes	0,5665	3.374 m ²
Coeficiente de rugosidad tuberías	Polietileno n = 0.011	

Figura 51. Parámetros fundamentales del modelo hidrológico e hidráulico empleado en la red de pluviales de Candeleda, sin SUDS (Fuente: elaboración propia).

Dicho método de cálculo se considera adecuado para este caso al tratarse de un proyecto de pequeñas dimensiones (menos de 10 Ha) y situarse en un entorno rústico. En ese sentido, el dimensionamiento de la red de drenaje con este método toma la lluvia máxima de la zona para el periodo de retorno considerado, en consecuencia, del lado de la seguridad al adoptar valores extremos de lluvia que, además, se mantienen constantes durante un determinado periodo.

A partir de lo anterior, se ha realizado un diseño completo de la red de drenaje del polígono industrial de Candeleda, así como su correspondiente modelo de cálculo según el citado método racional recogido en la Instrucción 5.2-IC, incluyéndose ambos como documentos anexos DA-2_01 (planos de planta) y DA-2_02 (modelo de cálculo) al final del presente trabajo.

Como se observa, la red de pluviales se conecta al drenaje natural existente en la zona en 2 puntos distintos pero conectados entre sí (denominados VERT1 y VERT2), cuyo modelado hidrológico e hidráulico, realizado con la misma metodología y para el mismo periodo de retorno T = 25 años, presenta en su estado natural los siguientes resultados de caudal:

Superficie cuenca	S =	396.926	m ²
Longitud cauce principal	L =	1.725	m
Desnivel	H =	84	m
Pendiente	J =	0.048696	m/m
Tiempo concentración	Tc =	0.806228	h
Factor reductor MPD	Ka =	1	
Coef. uniformidad	K =	1.05174	
Coef. escorrentía pavimentos	0,9959	8.100	m ²
Coef. escorrentía parcelas urbanas	0,8909	14.134	m ²
Coef. escorrentía cuencas externas urbanas	0,5743	371.318	m ²
Coef. escorrentía zonas verdes	0,6502	3.374	m ²
Datos pluviométricos	Pd = 164,54 mm It = 77,61 mm/h		
Caudal circulante por el drenaje	Q = 8,35 m ³ /s		

Figura 52. Caudal de referencia en el drenaje existente en el entorno del polígono de Candeleda para el periodo de retorno T = 25 años (Fuente: elaboración propia).

6.2.2.2. *Identificación de deficiencias*

Tal y como se comprueba en el modelo realizado (véanse documentos anexos DA-2_01 y DA-2_02), la cuenca vertiente al drenaje existente en el punto VERT1 sí cumpliría con la limitación de caudal del 10% establecida en el apartado 3 del artículo 34 PHDHT para T = 25 años:

$$\text{Caudal natural circulante por el drenaje} = 8,35 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$10\% \text{ Caudal natural circulante por el drenaje} = 0,8350 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Caudal VERT1} = 0,7322 \text{ m}^3/\text{s} < 0,8350 \text{ m}^3/\text{s}$$

En cambio, la cuenca vertiente al drenaje existente en el otro punto VERT2 no cumpliría con la citada limitación, máxime si se consideran ambos caudales conjuntamente puesto que, en última instancia, acaban vertiendo al citado drenaje, con lo que la limitación normativa ha de entenderse de todos los vertidos que se realicen:

$$\text{Caudal natural circulante por el drenaje} = 8,35 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$10\% \text{ Caudal natural circulante por el drenaje} = 0,8350 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Caudal VERT2} = 1,2009 \text{ m}^3/\text{s} > 0,8350 \text{ m}^3/\text{s}$$

En consecuencia, el diseño de un sistema de alcantarillado tradicional no es viable en este caso, fundamentalmente porque no se cumplen con las limitaciones establecidas por el plan hidrológico de cuenca, entre otras, al superar el caudal pluvial vertido (1,9331 m³/s) a la red de drenaje existente el 10% del caudal circulante por el cauce en régimen natural (8,35 m³/s):

Caudal natural circulante por el drenaje = $8,35 \text{ m}^3/\text{s}$ 100%

Caudal VERT1 + VERT2 = $0,7322 + 1,2009 = 1,9331 \text{ m}^3/\text{s}$ 23,15% > 10%

Así pues, para viabilizar este diseño se podría optar inicialmente por 2 soluciones: (i) aumentar la capacidad actual del cauce existente por encima de los $19,33 \text{ m}^3/\text{s}$, de manera que el vertido pluvial realizado por el nuevo polígono industrial no superase el 10% del caudal natural de este cauce, lo que precisaría aumentar notablemente su capacidad actual a partir de su mejora y ampliación; (ii) ejecutar una nueva red de pluviales exterior al polígono hasta el cauce más cercano (garganta de Santa María), que se sitúa a unos 1.000 al sureste del ámbito, es decir, continuar con el diseño de un sistema tradicional de alcantarillado para el vertido pluvial exterior del nuevo polígono de Candeleda.

Esta segunda opción precisaría inicialmente la construcción de un nuevo colector de pluviales $\Phi = 1.000 \text{ mm}$. En efecto, si se considera un colector de hormigón armado con una longitud total de unos 1.000 m y su desnivel aproximado total, que es de unos 15 m, a falta de un diseño detallado del trazado su pendiente media es del 1,5%. Además, según se comprueba con el siguiente cálculo de dicho colector, su capacidad máxima ($2,024 \text{ m}^3/\text{s}$) es superior al caudal punta ($1,9331 \text{ m}^3/\text{s}$) estimado en el polígono para el periodo de retorno de 25 años:

APLICACIÓN DE MANNING-STRICKLER		Pendiente 1,5%
$Q = V \cdot S = S \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \cdot K \cdot U$		
Diámetro tubería	D=	1,0000 m
Radio tubería	R=	0,5000 m
Máx. llenado	h=	0,5000 m
Ángulo mojado	α =	4,9962 rad
Perímetro mojado	pm=	2,4981 m
Término C		1,0000
Sección mojada	Sm=	0,62452289 m ²
Radio hidráulico	Rh=	0,25 m
k=	n=	0,015
U=		1
Pendiente	p=	0,015 m/m
Velocidad	v=	3,24026883 m/s
Caudal	Q=	2,02362204 m ³ /s
	Qrequerido=	1,933 m ³ /s

Figura 53. Estimación de la capacidad máxima del nuevo colector exterior preciso para el vertido pluvial polígono de Candeleda (Fuente: elaboración propia).

Esta nueva infraestructura de drenaje precisaría, además del citado colector de 1 km, de un mínimo de 20 pozos de registro y diversas obras auxiliares que serían necesarias para salvar diferentes elementos e infraestructuras existentes en su trazado, estimándose para estas obras exteriores un coste de ejecución material de unos 750.000 €, todo ello sin contar las expropiaciones e indemnizaciones que también se deberían prever. Este coste adicional sería muy importante respecto al total de las obras de urbanización del Sector industrial SUR-3 “Carrascales” de Candeleda (cuantificadas en total en unos 4.500.000 €).

En consecuencia, la extensión de un sistema de alcantarillado tradicional fuera de los límites del polígono de Candeleda tampoco se considera adecuado por su elevado coste económico, así como por su impacto ambiental, puesto que este nuevo colector exterior discurriría por espacios naturales de notable valor paisajístico y ambiental.

6.2.3. Fase 3: Diseño de propuestas de mejora

6.2.3.1. Selección de SUDS, equipamientos de laminación

Teniendo en cuenta lo anterior, la implantación de elementos tipo DBDI es necesaria no sólo para garantizar el correcto drenaje en este nuevo ámbito urbano industrial de Candeleda, sino fundamentalmente para cumplir con las limitaciones establecidas por el PHDHT y garantizar la viabilidad económica del nuevo polígono industrial.

Atendiendo a exigencias del promotor y considerando también las características geotécnicas de los materiales existentes que, según se ha adelantado anteriormente, tienen una elevada permeabilidad (10^{-3} m/s), para este caso se contempla la ejecución de una balsa de laminación e infiltración DBDI para la cuenca interna del polígono que, en última instancia, acaba vertiendo al drenaje existente en el punto denominado VERT2, manteniendo la conexión inicial del otro punto de vertido VERT1 al cumplir aisladamente con las limitaciones del PHDHT.

Aunque no son objeto del presente trabajo, cabe añadir que complementariamente se han considerado otro tipo de técnicas SUDS en el proyecto del polígono de Candelada, como son jardines de lluvia en las zonas verdes perimetrales, zanjas filtrantes en las transiciones entre zonas pavimentadas y no pavimentadas, y cunetas de drenaje dirigidas hacia los anteriores sistemas de drenaje sostenible.

6.2.3.2. Elaboración del diseño conceptual del sistema de alcantarillado mejorado

Considerando la ordenación prevista para el Sector SUR-3, que no contempla ninguna reserva de espacio para ubicar elementos de laminación, y teniendo en cuenta, asimismo, el drenaje natural del ámbito del proyecto y su entorno que, como se ha adelantado anteriormente, se

dirige en dirección sur hacia un pequeño cauce existente que se adentra por el extremo sur del



ámbito a partir de una ODT existente bajo la carretera CL-501, el único espacio urbano donde se puede ubicar el DBDI necesario para el polígono es una manzana municipal destinada a equipamiento y sin uso específico. Así, con más de 3.000 m² de superficie, esta manzana permitiría ubicar este elemento de drenaje sostenible en su mitad sur, reservando la norte para la futura implantación de usos municipales diversos.

Figura 54. Ordenación en el extremo sur del Sector SUR-3 y espacio reservado para el DBDI en la manzana de equipamientos (Fuente: Proyecto de urbanización).

Área	0,033998	km ²
Longitud cauce principal	0,294	km
Cota máxima	372,89	m
Cota desagüe	368,29	m
Pendiente	0,015646	m/m
t _c	0,260692	h
Región (Figura 2.9)	1022	
β _m	0,9	
K _a	1	
I _l /I _d	10	
F _a	20,80179	
K _t	1,013131	

T	25
Pd (mm)	164,54
I _d (mm/h)	6,86
I(T,t)	142,61
C medio	1,00
QT (m ³ /s)	1,36

Vol (para t = 20 min)	1.631	m³
------------------------------	--------------	----------------------

Como predimensionamiento de dicha balsa de laminación se ha empleado el método racional de la norma 5.2-IC, considerando que toda la cuenca tiene coeficiente de escorrentía unitario. Para el caso concreto de la cuenca VERT2 del polígono de Candeleda resultan los datos de la figura lateral, determinándose finalmente que se precisa un volumen de laminación para esta cuenca de unos 1.630 m³. Teniendo en cuenta el espacio disponible este volumen podrá conseguirse mediante una nueva balsa de unos 700 m² de superficie y 2,5 m de altura, garantizándose así la completa laminación de esta cuenca.

Figura 55. Predimensionamiento DBDI Candeleda (Fuente: elaboración propia).

Atendiendo a la información recogida en el propio Proyecto de urbanización del Sector SUR-3 de Candeleda, el coste completo de ejecución material de este DBDI, incluida su integración paisajística y acondicionamiento exterior, es aproximadamente de 200.000 €.

6.2.4. Fase 4: Evaluación de la implementación de SUDS en el sistema de alcantarillado

6.2.4.1. Simulación del sistema mejorado

Para el modelado hidrológico e hidráulico del nuevo sistema de alcantarillado con DBDI se ha estimado, para un periodo de retorno de 25 años, el volumen de crecida generado por la cuenca

vertiente asumiendo una cierta duración de tormenta, haciendo uso de la curva IDF para obtener el volumen total de precipitación, y de un modelo de producción de escorrentía para estimar la altura acumulada de lluvia neta para diferentes tiempos de concentración sin necesidad de modelar la evolución temporal de la escorrentía.

A tal efecto, los criterios de diseño empleados en el análisis han sido los siguientes:

- 1) Diseño de alternativas para duraciones de tormenta de hasta 2 horas, superiores al tiempo de concentración de la cuenca (0,26 horas).
- 2) Intensidades medias correspondientes a las duraciones y retorno asociado a las tormentas según la curva IDF de Témez (Instrucción 5.2-IC):

$$I(t)_T = \frac{P(d)_T}{24} \cdot \alpha^{\left\{ \frac{28^{(0.1)} - t^{(0.1)}}{28^{(0.1)} - 1} \right\}}$$

donde $P(d)_T$ es el cuantil de precipitación diaria máxima anual correspondiente al retorno T y α el factor de torrencialidad (para el que se ha asumido el valor de 10).

- 3) Modelo de producción de escorrentía superficial del USDA, asumiendo el valor de umbral de escorrentía obtenido por promediación areal para la cuenca (4,06 mm), que permite evaluar el volumen de lluvia neta acumulado, $E(t)$ a partir de la altura de precipitación acumulada $P(t)$ según la expresión:

$$E(t) = 0 \quad \text{si } P(t) \leq P_0$$

$$E(t) = \frac{[P(t) - P_0]^2}{P(t) + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } P(t) > P_0$$

A continuación, se obtienen las intensidades de lluvia media asociadas a partir de las curvas IDF para una duración de tormenta (hasta 2 horas) y período de retorno prefijados ($T = 25$ años) que, multiplicada por la duración de la tormenta, permite obtener la altura acumulada de precipitación. Aplicando el modelo de producción de escorrentía superficial a diferentes tiempos de duración de tormenta se obtiene finalmente el volumen de laminación necesario para la cuenca interior del polígono VERT2 que, según se ha visto anteriormente, cuenta con una superficie total de unos 34.000 m²:

Área	0,033998	km ²	Cuenca vertiente	Modelo de producción de escorrentía						
Id	6,856	mm/h	Intensidad precipitación							
tc	0,261	h	Tiempo de concentración	E(t) 0 si P(t) ≤ Po						
I1/Id	10		Índice torrencialidad	E(t) = $\frac{[P(t)-Po]^2}{P(t)+4 \cdot Po}$ si P(t) > Po						
C	0,921		Coeficiente de escorrentía							
Ka	1,000		Factor de intensidad							
Po	4,066	mm	Umbral de escorrentía							
Q	1,257	m ³ /s	Caudal de proyecto							
IDF			tc (h)	Altura precipitación		K	m ³ /s	[P(t) - Po] ²	E(t) (mm)	Vol (m ³)
Inten.media	It =	142,615 mm/h	t =	0,261	37,179 mm	1,013131	1,257	1.096,45	20,52	697,522
	It =	137,503 mm/h	t =	0,280	38,501 mm	1,014340	1,213	1.185,77	21,65	736,133
	It =	135,048 mm/h	t =	0,290	39,164 mm	1,014973	1,192	1.231,86	22,22	755,600
1,2*tc	It =	129,865 mm/h	t =	0,313	40,626 mm	1,016437	1,148	1.336,61	23,50	798,784
	It =	114,148 mm/h	t =	0,400	45,659 mm	1,022217	1,015	1.729,99	27,94	949,836
2*tc	It =	98,969 mm/h	t =	0,521	51,601 mm	1,030675	0,887	2.259,58	33,30	1.131,981
	It =	86,405 mm/h	t =	0,667	57,604 mm	1,041254	0,783	2.866,28	38,80	1.319,233
	It =	76,163 mm/h	t =	0,833	63,470 mm	1,053811	0,698	3.528,80	44,26	1.504,671
tc = 1,2 h	It =	68,558 mm/h	t =	1,000	68,558 mm	1,066667	0,636	4.159,28	49,04	1.667,106
	It =	62,629 mm/h	t =	1,167	73,068 mm	1,079704	0,588	4.761,23	53,30	1.812,048
	It =	57,844 mm/h	t =	1,333	77,125 mm	1,092839	0,550	5.337,64	57,16	1.943,161
	It =	53,879 mm/h	t =	1,500	80,819 mm	1,106004	0,518	5.891,03	60,68	2.063,022
	It =	50,528 mm/h	t =	1,667	84,213 mm	1,119148	0,492	6.423,54	63,93	2.173,521
tc = 2 h	It =	47,648 mm/h	t =	1,833	87,355 mm	1,132230	0,469	6.937,00	66,95	2.276,091
	It =	45,140 mm/h	t =	2,000	90,281 mm	1,145216	0,450	7.432,97	69,76	2.371,846

Figura 56. Estimación del volumen de laminación del punto de vertido VERT2 del polígono de Candeleda, según la curva IDF de Témez y el modelo de producción de escorrentía superficial (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto).

Sin tener en cuenta la permeabilidad del suelo ni la instalación de algún aliviadero en la balsa, elementos que también contribuirían a reducir su volumen final mediante, respectivamente, la infiltración del agua en el terreno y el desagüe parcial de la balsa, atendiendo a los resultados anteriores el volumen de almacenamiento del DBDI oscila entre unos 700 y 2.400 m³ para, respectivamente, el tiempo de concentración de la cuenca y 2 horas del evento de precipitación, máximo considerado para este caso.

Teniendo en cuenta el periodo de retorno adoptado, las características generales del ámbito de actuación y las limitaciones físicas del proyecto, para el nuevo polígono de Candeleda se adopta finalmente una lluvia de 1,2 h, valor muy conservador de dimensionamiento con el que resulta un volumen para la balsa de laminación en torno a 1.800 m³, superior al obtenido en el predimensionamiento a partir de la norma 5.2-IC con un coeficiente de escorrentía unitario.

Asimismo, este volumen también es muy superior al que se obtiene a partir del apartado 2 del artículo 34 del PHDHT para toda la superficie del polígono industrial de Candeleda, que resultaría ser de unos 90 m³, según la siguiente justificación:

Predimensionamiento del desbordamiento según el artículo 34, apartado 2 de las disposiciones normativas del PHTDH	Caudal	10 l/s/Ha
	Superficie	74.530 m ²
		7,4530 Ha
	Duración	20 min
		1.200 s
	Caudal total	74,53 l/s
	Volumen total	89.436 l/s
		89,436 m³

Figura 57. Predimensionamiento del desbordamiento del polígono de Candeleda según la normativa del PHDHT (Fuente: elaboración propia).

Así pues, la implementación de un elemento DBDI mejora notablemente el comportamiento hidráulico del sistema de drenaje proyectado en el nuevo polígono de Candeleda, permite cumplir con la normativa del organismo de cuenca y mejorar la calidad de las aguas pluviales antes de su retorno al medio natural y, de la misma manera, también permitiría reutilizar las aguas retenidas en episodios de lluvia para otros posibles usos no potables, como el riego, o proceder a la recarga de los acuíferos de la zona mediante su infiltración al terreno.

6.2.4.2. Análisis global coste-beneficio

La introducción de elementos tipo DBDI en las redes de saneamiento del nuevo polígono industrial de Candeleda no sólo es obligatorio atendiendo a la normativa del vigente PHDHT, sino que también es un claro ejemplo del beneficio que este tipo de SUDS puede producir

dentro de un entorno rústico y las escorrentías naturales disponibles en la zona, reduciendo los volúmenes de escorrentía urbana asociados al nuevo polígono y, con ello, los posibles riesgos de inundación que se podrían generar en este entorno.

En efecto, este caso ha permitido comprobar que el empleo exclusivo de los sistemas tradicionales afectaría notablemente la escorrentía natural de la zona, generando problemas de inundación en el entorno de las escorrentías naturales existentes que verían aumentado notablemente su caudal como consecuencia del sellado de una importante superficie de terreno debido a la construcción del nuevo polígono industrial.

En cambio, la intercalación de elementos de laminación tipo DBDI, además de reducir los caudales punta y, en consecuencia, reducir la afección al drenaje natural existente, también permite mejorar la calidad de las aguas pluviales generadas en la nueva zona urbana, tratando la escorrentía mediante procesos físicos y químicos naturales de filtración, sedimentación y biorremediación, según se ha analizado anteriormente en el apartado “2.6. *Gestión de la calidad del agua: métodos de diseño*” del presente trabajo.

De la misma manera, la implementación de DBDI en este caso también repercutiría positivamente en el coste de construcción de la nueva infraestructura de drenaje exterior precisa, pasando de los 750.000 € estimados mediante el empleo exclusivo de sistemas tradicionales a unos 200.000 € con su sustitución por SUDS localizados dentro del propio polígono industrial de Candeleda, es decir, en torno a 73% menos de coste sin contar las expropiaciones e indemnizaciones necesarias en el primer caso. A este beneficio económico habría que añadir, asimismo, el importante beneficio ambiental, puesto que se deja de construir una nueva infraestructura en un entorno natural de importante valor ambiental, no precisando afectar territorio fuera del ámbito del propio polígono.

6.2.4.3. Dimensionamiento volumétrico. Validación

Para realizar el dimensionamiento volumétrico en este caso van a emplearse, por proximidad, los parámetros de diseño considerados en la Guía básica de Azuqueca de Henares [30], en tanto que, junto con la guía de la ciudad de Madrid, es la normativa desarrollada más próxima al Sector SUR-3 “Los Carrascales” de Candeleda y, en consecuencia, su metodología resultar ser la más extrapolable de todas las guías disponibles en España.

Para ello se van a considerar las superficies de cada tipo de suelo previstas en todo el polígono industrial, su coeficiente a efectos de impermeabilidad y el criterio de percentil asociado a las diferentes zonas definidas en el plan, resultando:

Tipología de suelos	Superficie inicial		Coeficiente de zona	Superficie	Candeleda. SUDS mínimo		Volumen
	7,453 Ha	74.530 m²			Criterio volumétrico		
Viales y aceras	2,772 Ha	27.724 m²	0,95	26.338 m²	Vx	11,00 mm	290 m³
Cubiertas	3,600 Ha	36.004 m²	1,00	36.004 m²	Vx	11,00 mm	396 m³
Pavimento permeable	0,540 Ha	5.401 m²	0,70	3.781 m²	Vx	11,00 mm	42 m³
Zonas verdes	0,540 Ha	5.401 m²	0,30	1.620 m²	Vx	20,00 mm	32 m³
Dimensionamiento volumétrico de SUDS según la Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el término municipal de Azuqueca de Henares	Tabla 8: Volumen de infiltración según tipo de proyecto				Criterio percentiles de lluvia por tipologías edificatorias existentes		
	Tipo de proyecto	Percentil V _s	V (mm)		Parques	Desarrollos	Regeneración
	Parques y jardines	V ₉₅	20		Vx	Vx	Vx
	Nuevos desarrollos y desarrollos de regeneración urbana	V ₉₀	11		V95	V80	V85
	Pequeños desarrollos de regeneración urbana en zonas densamente urbanizadas	V ₆₀	6		20 mm	11 mm	6 mm
					0%	100%	0%
					Percentil	Vx = 11,00 mm	

Figura 58. Dimensionamiento volumétrico del DBDI del Sector SUR-3 de Candeleda según la guía de Azuqueca de Henares (Fuente: elaboración propia).

A su vez, este dimensionamiento se puede comparar con los diseños realizados anteriormente según los diferentes modelos empleados, resultando:

	Volumen (m ³)	% s/Dim.Vol	Vx
Predimensionamiento art.34.2 PHTDH	89 m ³	-88,23%	1,20 mm
Predimensionamiento MR, escorrentía 1	1.631 m ³	114,64%	21,88 mm
Modelo de producción de escorrentía tc	698 m ³	-8,19%	9,36 mm
Dimensionamiento volumétrico	760 m³	0,00%	10,19 mm
DBDI (balsa) Candeleda	1.812 m ³	138,50%	24,31 mm

Figura 59. Comparación de métodos de diseño en el caso del DBDI del Sector SUR-3 de Candeleda (predimensionamientos, modelo, volumétrico y DBDI final).

De la comparativa anterior se comprueba que, en líneas generales, el dimensionamiento mediante métodos volumétricos de este DBDI en el caso de Candeleda se ajusta bien al realizado a partir del modelo hidrológico-hidráulico utilizado, que ha consistido en el empleo de la metodología de la norma 5.2-IC y la implementación del modelo de producción de escorrentía superficial del USDA, modelos aptos para un entorno de interfaz urbana-rústica con el que difiere en torno a un 8%.

Por su parte, el dimensionamiento final de este DBDI, como hipótesis más conservadora de diseño y del lado de la seguridad, ha adoptado un volumen sensiblemente mayor al necesario según los diferentes métodos utilizados, superándolos más del 100%, volumen que se sitúa en torno al percentil 96 del municipio de Azuqueca de Henares, es decir, aquél no superado por el 96% de los eventos de precipitación acumulada, todo ello para minimizar posibles episodios de inundación en el nuevo polígono industrial de Candeleda y su afección al entorno. A ello hay que añadir, asimismo, que la permeabilidad del terreno no se ha considerado en los cálculos, con lo que se estaría aún más del lado de la seguridad; de la misma manera, tampoco se ha considerado el aliviadero previsto en el punto bajo de la balsa de laminación, con capacidad

suficiente y que permitirá disminuir los caudales en la balsa de manera controlada, evacuando las escorrentías a los elementos de drenaje existentes en el entorno de manera laminada. Como se ha adelantado anteriormente, esta mayoración final del volumen será discutida en apartados posteriores, junto con los volúmenes adoptados para los otros 2 casos de estudio.

6.3. Red de drenaje del Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida (Valencia)

6.3.1. Fase 1: Recolección de información y análisis preliminar

6.3.1.1. Caracterización del área de estudio

➤ Ordenación urbana y usos del suelo. Topografía y geotecnia

El Sector industrial 2 “El Tossalet”, es un área de suelo urbanizable de 104.595 m² situada en torno a la cooperativa agropecuaria “Cofrudeca” a unos 250 m al norte del casco urbano de Bèlgida (Valencia), colindante a la carretera CV-667, al oeste de la misma. El Plan Parcial que desarrolla la ordenación de este sector previsto en el Plan General de Ordenación Urbana de Bèlgida fue aprobado el 29 de octubre de 1998 (D.O.G.V. de fecha 28/01/1999).

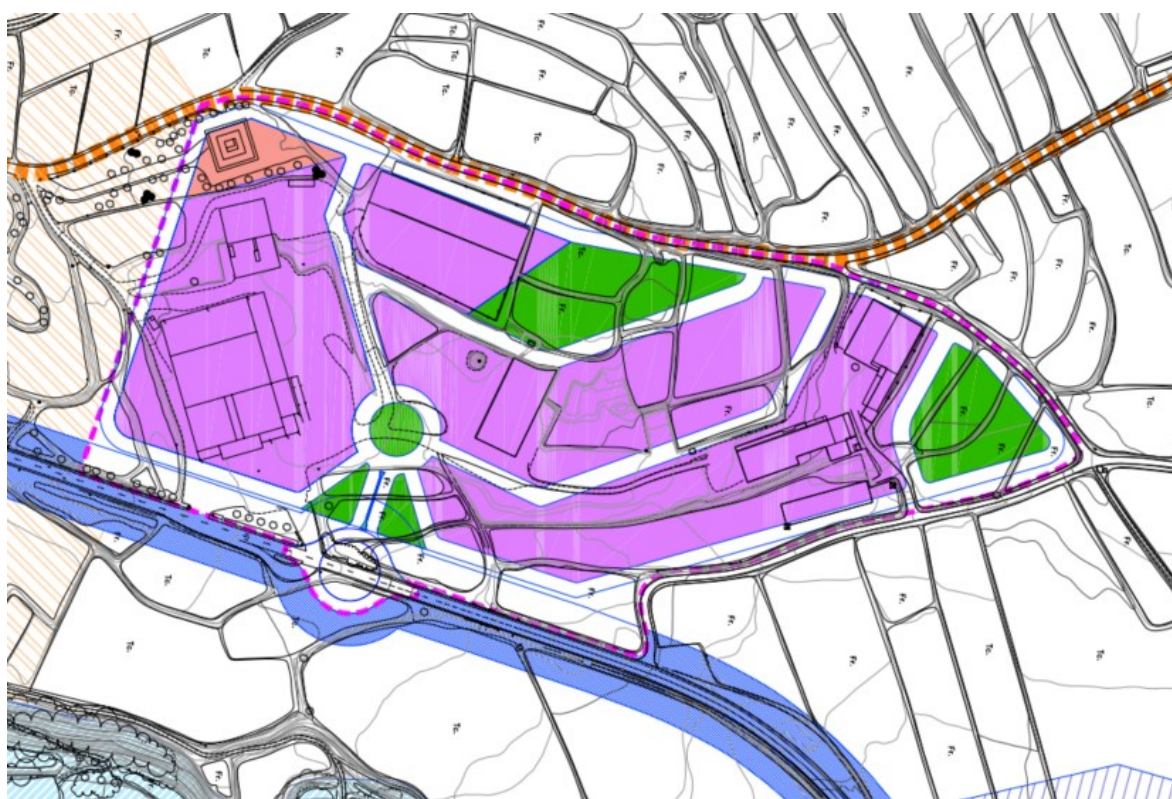


Figura 60. Usos pormenorizados definidos en el Polígono Industrial El Tossalet (Fuente: Plan General de Bèlgida).

Su ordenación pormenorizada, de uso dominante industrial y tipología de manzana densa, contempla la creación de 4 manzanas de uso industrial, aunque una de ellas presenta una

subzona de tolerancia residencial, mientras que otra presenta sus usos divididos entre industrial y zona verde, con su extremo norte finalizando en una manzana de zona verde, transición con la zona agrícola. Al tratarse de un nuevo desarrollo próximo al casco urbano se dispone de servicios e infraestructuras urbanas dentro del propio ámbito de actuación o próximas al mismo, como es el caso de la red de agua potable y las instalaciones de saneamiento que prestan servicio actualmente a la cooperativa, o diversas líneas aéreas eléctricas y de telecomunicaciones que, además de la citada instalación agropecuaria, también dan servicio al cercano casco urbano de Bèlgida. En cuanto al drenaje, además de las obras propias que dispone la carretera CV-667, al noreste de dicha carretera se sitúa el barranco de Bèlgida, a unos 350 m del extremo norte del nuevo polígono industrial, punto más bajo del mismo.

La topografía del ámbito es un fiel reflejo de la etimología del sector, es decir, se trata de una zona localizada en una pequeña sobreelevación respecto al valle sensiblemente plano en el que se sitúa la localidad de Bèlgida, con pendiente predominante en dirección noreste. Sus mayores alturas (252 m.s.n.m.) se encuentran al suroeste del ámbito y las menores (230 m.s.n.m.) en su extremo norte, junto a los caminos rurales que actúan como pequeños desagües naturales hacia el barranco de Bèlgida durante los episodios de lluvias. Este desnivel de 22 m supone una pendiente media en torno al 5% en sentido N-NE en los 420 m de distancia que hay entre ambos extremos, aunque se trata de una zona con topografía y pendientes muy irregulares.

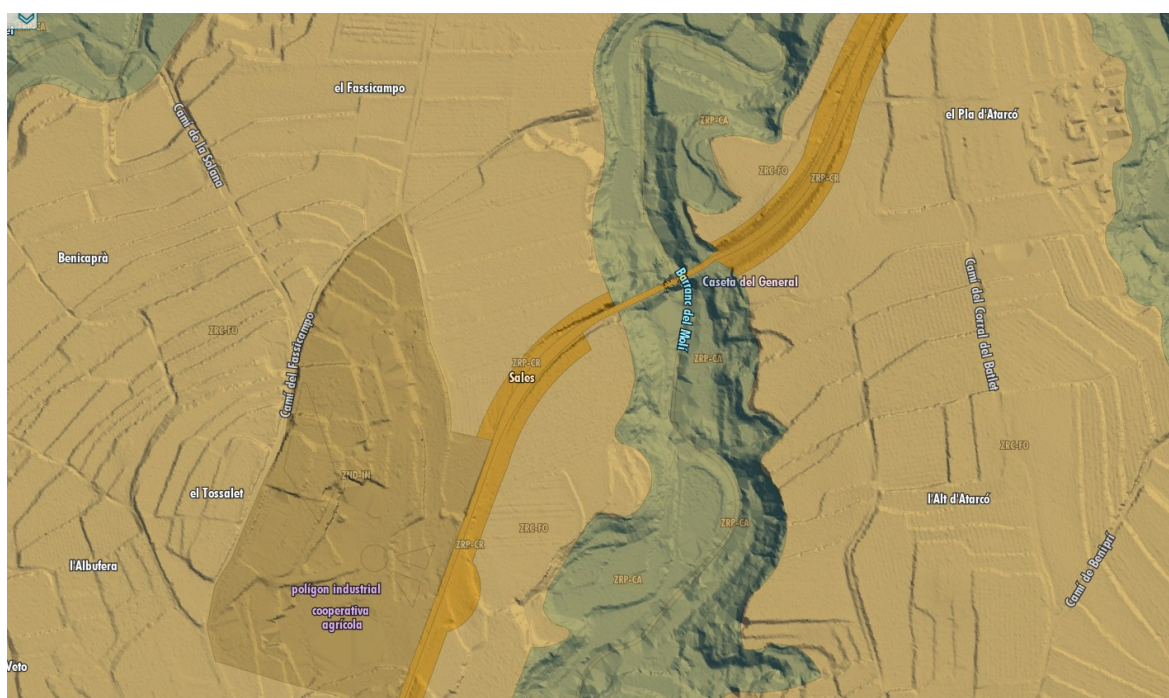


Figura 61. Mapa de relieves de la zona (Fuente: Proyecto de urbanización).

En cuanto a la geotecnia, los materiales presentes son fundamentalmente margas alteradas y calcarenitas, rocas sedimentarias blandas y fácilmente erosionables que en esta zona alcanzan espesores importantes, todo ello bajo un primer nivel de terreno vegetal de unos 50 cm de espesor. Este terreno de consistencia dura cuenta con una baja permeabilidad, aunque puede tener fracturas o fisuras que favorecen la infiltración localizada.

➤ Datos pluviométricos

Al tratarse de cuencas pequeñas, en este caso son apropiados los métodos hidrometeorológicos contenidos en la Instrucción 5.2- IC “Drenaje Superficial”, considerando un periodo de retorno de 25 años, atendiendo a la normativa empleada y los criterios del promotor.

Con ello se tienen los siguientes datos pluviométricos: $P_d = 227,48 \text{ mm/día}$, $I_d = 9,48 \text{ mm/h}$, que muestran la notable intensidad de la pluviometría en esta zona de la Comunitat Valenciana.

➤ Marco normativo aplicable

Normativa para obras de saneamiento y drenaje urbano de la ciudad de Valencia, año 2015, e Instrucción 5.2-IC “Drenaje superficial”.

6.3.1.2. Análisis del sistema de alcantarillado actual

➤ Datos básicos. Caracterización del estado actual

Dentro del ámbito la lluvia es actualmente filtrada al subsuelo, o en caso de saturación del suelo (que se produce muy frecuentemente), vierte sus aguas hacia la carretera CV-667 y algunos caminos formados en torno a los cultivos existentes, que reconducen las escorrentías hacia el barranco de Bèlgida. Por ello, no existe una red de aguas pluviales en el ámbito de actuación, más allá de esas cunetas o caminos de drenaje de carácter más o menos natural distribuidas a lo largo del ámbito, así como las obras de drenaje realizadas por la carretera.

- En los laterales de la CV-667 se pueden encontrar sistemas de drenaje basados en canalizaciones y cunetas que, además de las aguas pluviales de esta carretera, recogen las escorrentías provenientes de la zona sur del sector, a ambos lados de la citada vía. Asimismo, coincidiendo con el punto más bajo se ha identificado una obra de drenaje transversal, que dirige los caudales provenientes de la cuneta oeste de la carretera hacia los cursos de drenaje naturales presentes al este.
- La mitad occidental del sector, que se encuentra limitado por el denominado camino de la Ermita, presenta una topografía en la que las aguas discurren fundamentalmente en

dirección norte por dicha vía durante los episodios de lluvia, al configurarse como el drenaje natural de la zona. Esta situación se intensifica más al norte donde este camino se bifurca, disminuyendo de forma acusada sus cotas en sentido noreste y encajonándose hasta su intersección con el denominado Camí del Fassicampo, donde la escorrentía pasa a discurrir de forma natural por los caminos existentes hacia el barranco de Bèlgida, en dirección noreste.



Figura 62. Caminos existentes al norte del sector industrial de Bèlgida, drenajes naturales de la zona (Fuente: Proyecto de urbanización).

➤ Puntos críticos de la red

El drenaje natural de la zona se materializa fundamentalmente en dirección norte, a partir de los caminos o drenajes naturales que existen en el entorno y que, en última instancia, trasladan las escorrentías generadas en esta zona durante los episodios de lluvia hacia el barranco de Bèlgida, al noreste. En este contexto, la creación de un nuevo polígono industrial producirá un aumento importante de la escorrentía a causa del incremento de suelo sellado, lo que puede agravar los problemas de drenaje ya existentes en este ámbito periurbano que, además, recibe escorrentías desde su entorno, fundamentalmente por el oeste. Por ello, se precisan alternativas de diseño en la red de drenaje del nuevo polígono, como son los SUDS, en particular DBDI que puedan laminar los importantes caudales pluviales recogidos en el ámbito antes de su retorno a los cauces presentes al norte.

Asimismo, se precisa que la red de saneamiento del nuevo polígono sea separativa, con una red de aguas residuales que trate estas aguas finalmente en la EDAR municipal, sin que se produzca ningún tipo de vertido fecal en la red de pluviales y, en última instancia, en el drenaje natural de la zona, en particular, en el barranco de Bèlgida.

➤ Requisitos normativos

Los criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales se resumen en la siguiente tabla:

Tipos de tuberías utilizadas	PEAD clase SN-8, $400 \leq \varnothing \leq 630$ mm Hormigón armado clase 90-SR, $\varnothing \geq 800$ mm
Diámetro nominal colector mínimo	400 mm
Tubo de imbornal	315 mm
Velocidad máxima / mínima	4 m/s - 1 m/s
Espaciamiento máximo entre pozos	50 m
Recubrimiento mínimo	100 cm (75 cm en cabeceras).

Figura 63. Criterios de diseño fundamentales de la red de pluviales de Bèlgida (Fuente: Proyecto de urbanización).

6.3.2. Fase 2: Diagnóstico del sistema tradicional

6.3.2.1. Modelado hidrológico e hidráulico

Los parámetros fundamentales del modelado hidrológico e hidráulico realizado para este caso concreto se resumen en la siguiente tabla:

Metodología considerada	Instrucción 5.2-IC "Drenaje superficial"	
Metodología de cálculo	Método racional, T = 25 años	
Datos pluviométricos:	Pd = 227,48 mm/día, Id = 9,48 mm/h	
Coef. escorrentía pavimentos	0,9902	23.314 m ²
Coef. escorrentía parcelas urbanas	0,8677	57.371 m ²
Coef. escorrentía cuencas externas agrícolas	0,5714	23.879 m ²
Coef. escorrentía zonas verdes	0,5949	4.871 m ²
Coeficiente de rugosidad tuberías	Polietileno n = 0.011, hormigón n = 0.015	

Figura 64. Parámetros fundamentales del modelo hidrológico e hidráulico empleado en la red de pluviales de Bèlgida, sin SUDS (Fuente: elaboración propia).

A partir de lo anterior, se ha realizado un diseño completo de la red de drenaje del polígono industrial de Bèlgida, así como su correspondiente modelo de cálculo según el método de la Instrucción 5.2-IC, incluyéndose ambos como documentos anexos DA-3_01 (planos de planta) y DA-3_02 (modelo de cálculo) al final del presente trabajo.

6.3.2.2. Identificación de deficiencias

El diseño planteado mediante un sistema de alcantarillado tradicional precisa, tal y como se comprueba en el modelo realizado (véanse documentos anexos DA-3_01 y DA-3_02), la ejecución de un colector exterior de aguas pluviales de grandes dimensiones (diámetros 1.500 y 2.000 mm) de cerca de 400 m de longitud que, en última instancia, vierta las aguas recogidas en el nuevo polígono industrial en el cauce del barranco de Bèlgida. Se trata pues de una obra de notables dimensiones y dificultad de ejecución que, además, afectaría no sólo al citado cauce (para el que habría que pedir la correspondiente autorización al organismo de cuenca, la Confederación Hidrográfica del Júcar; en adelante CHJ), sino también al camino agrícola bajo el

que se ubica su traza, con lo que su coste económico (estimado en unos 400.000 € de ejecución material) sería muy importante respecto al global de las obras de urbanización del Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida (cuantificadas en total en 3.500.000 €).

Asimismo, aunque el vigente Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2023-2027 [véase referencia 55], no establece en sus disposiciones normativas (en adelante PHDHJ) limitación alguna de caudal para los desbordamientos de las redes de pluviales hacia los cauces de dicha demarcación, sí prescribe en su artículo 54 medidas para reducir la contaminación procedente de estos desbordamientos, especialmente la obligación de instalar sistemas de retención de sólidos gruesos y flotantes, por lo que estos también deberían instalarse en el caso del polígono industrial de Bèlgida, incrementando el coste antes citado.

De la misma manera, este planteamiento en el sistema de alcantarillado no cumpliría con el artículo 126 ter, apartado 7, del vigente RDPH, que prescribe literalmente que *“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”*.

En consecuencia, el diseño de un sistema de alcantarillado tradicional no se considera idóneo en este caso, fundamentalmente porque no se cumplen con las limitaciones establecidas por el PHDHJ y el RPDH, porque precisa de una notable inversión económica y una importante afección a espacios externos al nuevo polígono industrial y, sobre todo, porque el barranco de Bèlgida se podría ver seriamente afectado en el punto de vertido de aguas pluviales, si no se adoptan otro tipo de medidas de protección en el propio cauce y respecto a la cantidad y calidad de las aguas pluviales vertidas.

6.3.3. Fase 3: Diseño de propuestas de mejora

6.3.3.1. Selección de SUDS, equipamientos de laminación

Teniendo en cuenta las limitaciones anteriores y la propia configuración del Sector industrial 2 “El Tossalet”, con un espacio verde sin uso específico localizado en su extremo norte, justo en la zona más baja del nuevo polígono y en la transición con el espacio rústico existente al norte, la implantación de elementos tipo DBDI es necesaria no sólo para garantizar su correcto drenaje urbano y minimizar el coste de la urbanización, sino también para cumplir con las propias limitaciones establecidas por el vigente RDPH.

En efecto, aprovechando las dimensiones y características de este espacio libre se podría ubicar en él un nuevo elemento DBDI que, sobre todo, permita garantizar la laminación de las

aguas pluviales antes de su infiltración al terreno (no considerada en los cálculos por la baja permeabilidad del suelo existente), evaporación tras los periodos de lluvia o, en su caso, vertido final mediante el correspondiente aliviadero hacia los caminos presentes al norte del polígono y que, según se ha adelantado anteriormente, funcionan también como elementos de drenaje durante los episodios de lluvia.



Figura 65. Espacios rústicos y agrícolas existentes al norte del sector industrial de Bèlgida (Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth).

Aunque no son objeto del presente trabajo, cabe añadir que complementariamente se han considerado otro tipo de técnicas SUDS en el proyecto del polígono de Bèlgida, como son jardines de lluvia en las zonas verdes y cunetas de drenaje dirigidas hacia estos.

6.3.3.2. *Elaboración del diseño conceptual del sistema de alcantarillado mejorado*

Con todo lo anterior, el Sector industrial 2 “El Tossalet” ya dispone en su interior de un espacio urbano donde poder ubicar el DBDI necesario para el correcto drenaje de este polígono, la zona verde de más de 3.500 m² localizada en su extremo norte, sin necesidad de ocupar espacios exteriores o ejecutar canalizaciones externas.

Asimismo, el vial inicialmente previsto por la ordenación en torno a esta zona verde pasará a formar parte de la misma, a modo de vía de servicio, puesto que con el proyecto se ha identificado que no es necesario para garantizar la movilidad interior del polígono ni su conexión exterior, con lo que se disminuye el coste de las obras de urbanización y se mejoran las condiciones de integración paisajística de esta zona verde y su correcto mantenimiento.

Figura 66. Ordenación prevista en el extremo norte del polígono de Bèlgida y espacio reservado para el DBDI (Fuente: Proyecto).



Área	0,109534	km ²
Longitud cauce principal	0,80	km
Cota máxima	252	m
Cota desagüe	232	m
Pendiente	0,025	m/m
tc	0,510342	h
Región (Figura 2.9)	822	
βm	2,4	
Ka	1	
I1/Id	11	
Fa	16,31948	
Kt	1,02989	

T	25
Pd (mm)	227,48
Id (mm/h)	9,48
I(T,t)	154,68
C medio	1,00
QT (m3/s)	4,85

Vol (para t = 20 min)	5.816 m³
------------------------------	----------------------------

Aunque el PHDHJ no establece ninguna metodología o limitación, para predimensionar la balsa de laminación de Bèlgida se ha empleado también el método simplificado del artículo 34 del PHDHT, es decir, adoptar una lluvia de 20 minutos y considerar que toda la cuenca laminada tiene coeficiente de escorrentía unitario. Para este caso se tienen los datos mostrados en la figura lateral, determinándose preliminarmente que se precisa un volumen de laminación para esta cuenca cercano a los 6.000 m³. Teniendo en cuenta el espacio disponible este volumen podrá conseguirse mediante una nueva balsa de unos 3.000 m² de superficie y 2 m de altura total, garantizándose así la completa laminación de esta cuenca.

Figura 67. Predimensionamiento DBDI Bèlgida (Fuente: elaboración propia).

Atendiendo a la información recogida en el propio Proyecto de urbanización del Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida, el coste completo de ejecución material de este DBDI, incluida su integración paisajística como zona verde perimetral de este polígono, es aproximadamente de 350.000 €.

6.3.4. Fase 4: Evaluación de la implementación de SUDS en el sistema de alcantarillado

6.3.4.1. Simulación del sistema mejorado

Para el modelado hidrológico e hidráulico del nuevo sistema de alcantarillado con DBDI se ha estimado, para un periodo de retorno de 25 años, el volumen de crecida generado por la cuenca vertiente asumiendo una cierta duración de tormenta, haciendo uso de la curva IDF para obtener el volumen total de precipitación, y de un modelo de producción de escorrentía para estimar la altura acumulada de lluvia neta para diferentes tiempos de concentración sin necesidad de modelar la evolución temporal de la escorrentía.

A tal efecto, los criterios de diseño empleados en el análisis han sido los siguientes:

- 1) Diseño de alternativas para duraciones de tormenta de hasta 3 horas, superiores al tiempo de concentración de la cuenca (32 minutos) y representativas de las tormentas de corta duración que se producen en la zona.
- 2) Intensidades medias correspondientes a las duraciones y retorno asociado a las tormentas según la curva IDF de Témez (Instrucción 5.2-IC), pues no se disponen resultados de la IDF de zona para duraciones de tiempo superiores a 2 horas:

$$I(t)_T = \frac{P(d)_T}{24} \cdot \alpha^{\left\{ \frac{28^{(0.1)} - t^{(0.1)}}{28^{(0.1)} - 1} \right\}}$$

donde $P(d)_T$ es el cuantil de precipitación diaria máxima anual correspondiente al retorno T y α el factor de torrencialidad (para el que se ha asumido el valor de 11).

- 3) Modelo de producción de escorrentía superficial del USDA, asumiendo el valor de umbral de escorrentía obtenido por promediación areal para la cuenca (24,496 mm), que permite evaluar el volumen de lluvia neta acumulado, $E(t)$ a partir de la altura de precipitación acumulada $P(t)$ según la expresión:

$$E(t) = 0 \quad \text{si } P(t) \leq P_0$$

$$E(t) = \frac{[P(t) - P_0]^2}{P(t) + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } P(t) > P_0$$

A continuación, se obtienen las intensidades de lluvia media asociadas a partir de las curvas IDF para una duración de tormenta (hasta 3 horas) y período de retorno prefijados ($T = 25$ años) que, multiplicada por la duración de la tormenta, permite obtener la altura acumulada de precipitación. Aplicando el modelo de producción de escorrentía superficial a diferentes tiempos de duración de tormenta se obtiene finalmente el volumen de laminación necesario para la cuenca interior del polígono industrial de Bèlgida y su entorno que, por cuestiones topográficas, evacúa su escorrentía hacia el interior sector, incrementando la superficie total por encima de los 150.000 m²:

Área	0,15461643	km²	Cuenca vertiente										
Id	9,478	mm/h	Intensidad precipitación										
tc	0,537	h	Tiempo de concentración										
I1/Id	11		Índice torrencialidad										
C	0,684		Coeficiente de escorrentía										
Ka	1,000		Factor de intensidad										
Po	24,496	mm	Umbral de escorretnía										
Q	4,556	m³/s	Caudal de proyecto										
IDF			tc (h)			Altura precipitación		K	m³/s	[P(t) -Po]²	E(t) (mm)	Vol (m³)	
Inten. media	It =	150,298	mm/h	t =	0,537	h	80,684	mm	1,031779	4,556	3.157,03	17,67	2.732,03
	It =	148,233	mm/h	t =	0,550	h	81,528	mm	1,032725	4,497	3.252,65	18,12	2.801,53
	It =	141,016	mm/h	t =	0,600	h	84,609	mm	1,036348	4,293	3.613,59	19,79	3.059,89
	It =	135,338	mm/h	t =	0,644	h	87,184	mm	1,039591	4,133	3.929,75	21,22	3.281,34
	It =	119,189	mm/h	t =	0,800	h	95,351	mm	1,051272	3,681	5.020,43	25,97	4.014,97
1,2*tc	It =	99,849	mm/h	t =	1,074	h	107,203	mm	1,072412	3,146	6.840,41	33,34	5.154,48
	It =	75,877	mm/h	t =	1,667	h	126,461	mm	1,119148	2,495	10.396,83	46,32	7.162,16
	It =	71,379	mm/h	t =	1,833	h	130,861	mm	1,132230	2,374	11.313,38	49,44	7.643,71
tc = 2 h	It =	67,471	mm/h	t =	2,000	h	134,942	mm	1,145216	2,270	12.198,17	52,37	8.097,12
	It =	64,037	mm/h	t =	2,167	h	138,748	mm	1,158082	2,179	13.053,40	55,14	8.525,51
	It =	60,992	mm/h	t =	2,333	h	142,314	mm	1,170805	2,098	13.881,04	57,77	8.931,51
tc = 2,5 h	It =	58,268	mm/h	t =	2,500	h	145,669	mm	1,183368	2,026	14.682,87	60,26	9.317,34
	It =	55,814	mm/h	t =	2,667	h	148,837	mm	1,195758	1,961	15.460,51	62,64	9.684,91
	It =	53,589	mm/h	t =	2,833	h	151,836	mm	1,207964	1,902	16.215,43	64,91	10.035,85
tc = 3 h	It =	51,561	mm/h	t =	3,000	h	154,684	mm	1,219978	1,848	16.948,94	67,08	10.371,58

Figura 68. Estimación del volumen de laminación del polígono de Bèlgida, según la curva IDF de Témez y el modelo de producción de escorrenría superficial (Fuente: elaboración propia a partir del Proyecto de urbanización).

Sin tener en cuenta la permeabilidad del suelo ni la instalación de algún aliviadero en la balsa, elementos que también contribuirían a reducir su volumen final mediante, respectivamente, la infiltración del agua en el terreno y el desagüe parcial de la balsa, atendiendo a los resultados anteriores el volumen de almacenamiento del DBDI oscila entre unos 2.700 y 10.400 m³ para, respectivamente, el tiempo de concentración de la cuenca y 3 horas del evento de precipitación, máximo considerado para este caso.

Teniendo en cuenta las características generales del ámbito de actuación, la pluviometría de la zona y la disponibilidad de espacios en el proyecto, para el nuevo polígono de Bèlgida se considera una hipótesis muy conservadora y se adopta finalmente una lluvia de 3 h a un caudal pico de periodo de retorno 25 años, resultando un volumen de la balsa de laminación en torno a 10.700 m³, muy superior al obtenido en el predimensionamiento a partir de la norma de drenaje superficial 5.2-IC con un coeficiente de escorrentía unitario.

Así pues, la implementación de un elemento DBDI mejora notablemente el comportamiento hidráulico del sistema de drenaje proyectado en el nuevo polígono de Bèlgida, permite cumplir con el RDPH y mejorar la calidad de las aguas pluviales antes de su retorno al medio natural y, de la misma manera, también permitiría reutilizar las aguas retenidas en episodios de lluvia para otros posibles usos no potables, como riego de las zonas verdes del sector o de los espacios agrarios presentes en su entorno.

6.3.4.2. Análisis global coste-beneficio

La introducción de elementos tipo DBDI en la red de drenaje del nuevo polígono industrial de Bèlgida no sólo es obligatorio atendiendo al RDPH, sino que también es un claro ejemplo de los beneficios ambientales y económicos que este tipo de SUDS puede producir en una actuación urbana de este tipo, reduciendo sus costes de urbanización y los volúmenes de escorrentía urbana asociados al nuevo polígono que, en última instancia, acaban vertiendo en la red de drenaje de la zona, en este caso el barranco de Bèlgida.

En efecto, el empleo exclusivo de los sistemas tradicionales precisaría en este caso una importante inversión económica para posibilitar la evacuación de las escorrentías generadas en el ámbito hasta el cauce de barranco de Bèlgida, lo que además afectaría la escorrentía natural en este cauce y generar problemas de calidad en las aguas de este barranco.

En cambio, la intercalación de elementos de laminación tipo DBDI, además de reducir los caudales punta y, en consecuencia, reducir la afección al drenaje natural existente, también permite mejorar la calidad de las aguas pluviales generadas en la zona urbana, tratando la

escorrentía mediante procesos físicos y químicos naturales de filtración, sedimentación y biorremediación, según se ha analizado anteriormente en el apartado “2.6. *Gestión de la calidad del agua: métodos de diseño*” del presente trabajo.

Asimismo, la implementación de DBDI en este caso también repercute positivamente en el coste de construcción de la nueva infraestructura de drenaje necesaria, pasando de los 400.000 € estimados mediante el empleo exclusivo de sistemas tradicionales a unos 350.000 € con SUDS, todo ello sin contar en el primer caso otras obras necesarias (sistemas de retención de sólidos gruesos y flotantes) en el punto de vertido que, según se ha adelantado anteriormente, incrementarían más aún el coste exterior de la red de drenaje con sistemas tradicionales. Además, conviene aclarar que una parte de los citados 350.000 € presupuestados con SUDS serían necesarios igualmente en el proyecto de urbanización sin la ejecución de la balsa, en tanto que deberían destinarse igualmente a la ejecución de la zona verde aquí prevista, con lo que todo este coste no se destina exclusivamente a la ejecución del DBDI. En cualquier caso, para facilidad comparativa se contempla la totalidad de dicha cifra.

6.3.4.3. *Dimensionamiento volumétrico. Validación*

Para realizar el dimensionamiento volumétrico en este caso van a emplearse, por proximidad, los parámetros de diseño considerados en la Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València [6], en tanto que el Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida se sitúa a unos 85 km de esta ciudad y, en consecuencia, su metodología es la más extrapolable de todas las guías disponibles en España.

Para ello se van a considerar las superficies de cada tipo de suelo para todo el polígono industrial, su coeficiente a efectos de impermeabilidad y el criterio de percentil asociado a las diferentes tipologías zonas definidas en el plan, resultando:

Tipología de suelos	Superficie inicial		Coeficiente de zona	Superficie	S2 Bèlgida. SUDS mínimo		Volumen
	15,462 Ha	154.616 m²			Criterio volumétrico		
Pavimentos	2,573 Ha	25.732 m²	0,95	24.445 m²	Vx	20,00 mm	489 m³
Parcelas industriales	5,830 Ha	58.302 m²	0,95	55.387 m²	Vx	20,00 mm	1.108 m³
Cuencas externas	5,507 Ha	55.072 m²	0,85	46.811 m²	Vx	20,00 mm	936 m³
Zonas verdes	1,551 Ha	15.510 m²	0,30	4.653 m²	Vx	20,00 mm	93 m³
Dimensionamiento volumétrico de SUDS según la <i>Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València</i>	Actuaciones a nivel de sector				Criterio percentiles de lluvia por tipologías edificatorias existentes		
	Tipología urbana		Criterio	V _x (mm)	Ed. Abierta	Industrial	Terciario
	Centros históricos protegidos		V ₆₀	8	Vx	Vx	Vx
	Ensanche		V ₆₀	8			
	Edificación abierta		V ₈₀	20	V80	V80	V80
	Unifamiliar		V ₈₅	27			
	Industrial		V ₈₀	20			
	Terciario		V ₈₀	20			
	Tabla 9. Criterios de dimensionamiento por tipología edificatoria.				20 mm	20 mm	20 mm
					0%	100%	0%
				Percentil	Vx = 20,00 mm		

Figura 69. Dimensionamiento volumétrico del DBDI del Sector 2 “El Tossalet” de Bèlgida según la guía de la ciudad de València (Fuente: elaboración propia).

A su vez, este dimensionamiento se puede comparar con los diseños realizados anteriormente según los diferentes modelos empleados, resultando:

		Volumen (m ³)	% s/Dim.Vol	Vx (mm)
Predimensionamiento C=1, lluvia 20'		5.816 m ³	121,50%	44,30 mm
Modelo producción de escorrentía tc		2.732 m ³	4,04%	20,81 mm
Modelo producción de escorrentía 3h		10.372 m ³	294,97%	78,99 mm
Dimensionamiento volumétrico		2.626 m³	0,00%	20,00 mm
DBDI (balsa) Bèlgida		10.700 m ³	307,47%	81,49 mm

Figura 70. Comparación de métodos de diseño en el caso del DBDI del Sector 2 “El Tossalet” de Bèlgida (predimensionamiento, modelos, volumétrico y DBDI final).

De la comparativa anterior se comprueba que, en líneas generales, el dimensionamiento mediante métodos volumétricos de este DBDI en el caso de Bèlgida se ajusta bien al realizado a partir del modelo hidrológico-hidráulico utilizado, que ha consistido en el empleo de la metodología de la norma 5.2-IC y la implementación del modelo de producción de escorrentía superficial del USDA, modelos aptos para un entorno de interfaz urbana-rústica con el que difiere en torno a un 4% si se considera el tiempo de concentración de la cuenca.

Por su parte, el dimensionamiento final de este DBDI, como hipótesis más conservadora de diseño y del lado de la seguridad, ha adoptado un volumen muy superior al necesario según los diferentes métodos utilizados, superándolos más del 300%, volumen que se sitúa en torno al percentil 97 de la ciudad de València, es decir, aquél no superado por el 97% de los eventos de precipitación acumulada, todo ello para minimizar posibles episodios de inundación en la zona y afección al entorno. A ello hay que añadir, asimismo, que la permeabilidad del terreno, aunque baja, no se ha considerado en los cálculos, con lo que se estaría aún más del lado de la seguridad; de la misma manera, tampoco se ha considerado el aliviadero previsto en el punto bajo de la balsa de laminación, con capacidad suficiente y que permitirá disminuir los caudales en la balsa de manera controlada, evacuando las escorrentías a los elementos de drenaje existentes en el entorno de manera laminada. Esta notable mayoración final del volumen será discutida seguidamente, junto con los resultados obtenidos para los otros 2 casos de estudio.

7. RESULTADOS

La última fase de la metodología sintetiza los resultados obtenidos en el apartado anterior y, a partir de estos, proporciona unas directrices para la implementación y optimización del sistema de alcantarillado en los casos analizados que, en la medida de lo posible, puedan ser extrapolables a otros con características similares.

7.1. Presentación de los resultados

Los 3 casos analizados, aun tratándose de nuevos desarrollos urbanos con características muy diversas en cuanto a localización geográfica, pluviometría de la zona, usos globales, superficie total y tipologías edificatorias, han permitido comprobar cómo la implementación de SUDS en los sistemas de alcantarillado, en particular, elementos tipo DBDI, puede resultar ser muy beneficiosa en términos de capacidad hidráulica de estos sistemas, sostenibilidad ambiental y costes de sus obras de urbanización. En efecto:

- En el caso de Torrent, el empleo exclusivo de los sistemas tradicionales no es posible sin precisarse la ejecución de grandes y costosas obras complementarias de drenaje que, a su vez, afectarían a otros ámbitos externos y tendrían importantes consecuencias para la población del entorno, sin garantizarse la eliminación de los actuales problemas de inundabilidad pluvial en esta zona del municipio. En cambio, la intercalación de elementos de laminación tipo DBDI, además de reducir los caudales punta y, en consecuencia, los costes de construcción asociados a dichas obras externas precisas, también permite mejorar la calidad del agua de lluvia y los problemas ambientales que puede provocar su contaminación, así como su posible reutilización para otros usos, con los consiguientes beneficios ambientales.
- Por su parte, contemplar únicamente sistemas tradicionales en el nuevo polígono de Candeleda incumpliría con las limitaciones establecidas por el plan hidrológico de cuenca, ya que las escorrentías generadas podrían afectar de manera notable a los drenajes existentes en los puntos de vertido, precisándose extensas y costosas obras externas de vertido. Sin embargo, la incorporación de balsas de laminación reduce los volúmenes de escorrentía urbana asociados al nuevo polígono, eliminándolos en la mayoría de los episodios de lluvia, con lo que se minimizan los riesgos de inundación en un entorno rústico, además de mejorar la calidad de las aguas pluviales. Asimismo, se evita la construcción de importantes obras de drenaje externas que, además de un importante coste económico, podrían generar un impacto ambiental en un entorno natural de elevado valor.

- Finalmente, Bèlgida se trataría de un caso intermedio entre los 2 anteriores, es decir, un nuevo polígono industrial en una zona de pluviometría muy elevada situada cercana al casco urbano, pero fuera de éste, donde la única utilización de sistemas tradicionales de alcantarillado, además de incumplir con lo dispuesto en el RDPH, tampoco es posible sin precisarse la ejecución de grandes obras complementarias de drenaje y afectar, en última instancia, a los drenajes existentes en el punto de vertido. Por el contrario, la ejecución de una balsa de laminación al final del sistema de drenaje tradicional evita la extensión de la escorrentía generada en el polígono fuera de su ámbito y mejora la calidad de las aguas pluviales con su tratamiento en el propio DBDI, a la par que supone una mejora en la integración paisajística y ambiental del polígono con su entorno, y permitiría la reutilización del agua tratada en el propio ámbito o su entorno agrario.

En la siguiente tabla resumen se comparan, en líneas generales, los resultados obtenidos en los 3 casos de estudio desde una triple visión: social, ambiental y económica:

	Sector residencial 6 “Marxadella” de Torrent		Sector industrial SUR-3 “Carrascales” de Candeleda		Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida	
	Sin SUDS	Con SUDS	Sin SUDS	Con SUDS	Sin SUDS	Con SUDS
Social	Afección a población externa al ámbito	Minimización de la afección a la población externa. Reducción inundabilidad	Afección a elementos externos al ámbito del polígono	Afección del polígono únicamente a su ámbito propio interno	Afección a caminos y espacios agrarios externos al ámbito	Minimización de la afección a la población externa
Ambiental	Problemas de inundabilidad. Contaminación del medio por la mala calidad de las aguas pluviales	Reducción inundabilidad. Mejora de las aguas de lluvia con su tratamiento. Reutilización de aguas	Problemas de inundabilidad y mala calidad de las aguas pluviales. Afección a espacios naturales.	Eliminación de problemas inundabilidad y afección a espacios naturales externos.	Contaminación del medio por la mala calidad de las aguas pluviales	Mejora de la calidad de las obras y posible reutilización en otros usos. Integración urbana
Económico	PEM obras externas > 350.000 - 400.000 € (más obras adicionales)	PEM DBDI \cong 250.000 € (reducción costes 30%)	PEM obras externas \cong 750.000 € (sin expropiar)	PEM DBDI \cong 200.000 € (reducción costes 73%)	PEM obras externas \cong 400.000 €. (más obras adicionales)	PEM DBDI < 350.000 € (reducción costes > 13%)

Figura 71. Tabla resumen resultados (Fuente: elaboración propia).

Para completar el análisis coste-beneficio de ambas soluciones (sin y con SUDS) en los 3 casos analizados es necesario considerar, asimismo, los restantes costes de construcción no detallados en apartados anteriores. En ese sentido:

- En el caso de Torrent, además de los 400.000 € estimados en la solución sin SUDS hay que añadir aquellos costes adicionales necesarios para adecuar el punto de vertido existente para tratar los nuevos caudales aportados, que se estima en otros 100.000 €.
- Para el polígono de Candeleda hay que incluir una partida de 50.000 € para gastos de expropiaciones, servidumbres y/o adecuación del punto de vertido, adicional a los 750.000 € estimados para el colector exterior de la solución sin SUDS.
- Por último, para comparar adecuadamente Bèlgida habría que: en primer lugar, incluir una partida de 50.000 € para gastos de adecuación del punto de vertido, adicional a los 400.000 € estimados para el colector exterior preciso sin SUDS; en segundo, deducir de los costes de construcción de la balsa aquellos que igualmente se tendrían que ejecutar según la ordenación urbana prevista, es decir, 3.800 m² de zonas verdes y otros 1.500 m² de viales. Considerando unas ratios de ejecución material de, respectivamente, 15 y 140 €/m², el coste de urbanización de esta zona ascendería a unos 267.000 €, a deducir de los 350.000 € previstos para ejecutar completamente la balsa de laminación.

En definitiva, para Torrent el análisis coste-beneficio de la solución sin SUDS y con SUDS supone en torno un 50% de mejora, que asciende hasta el 75% en el caso de Candeleda y hasta el 82% en Bèlgida al comparar mejor los costes de construcción:

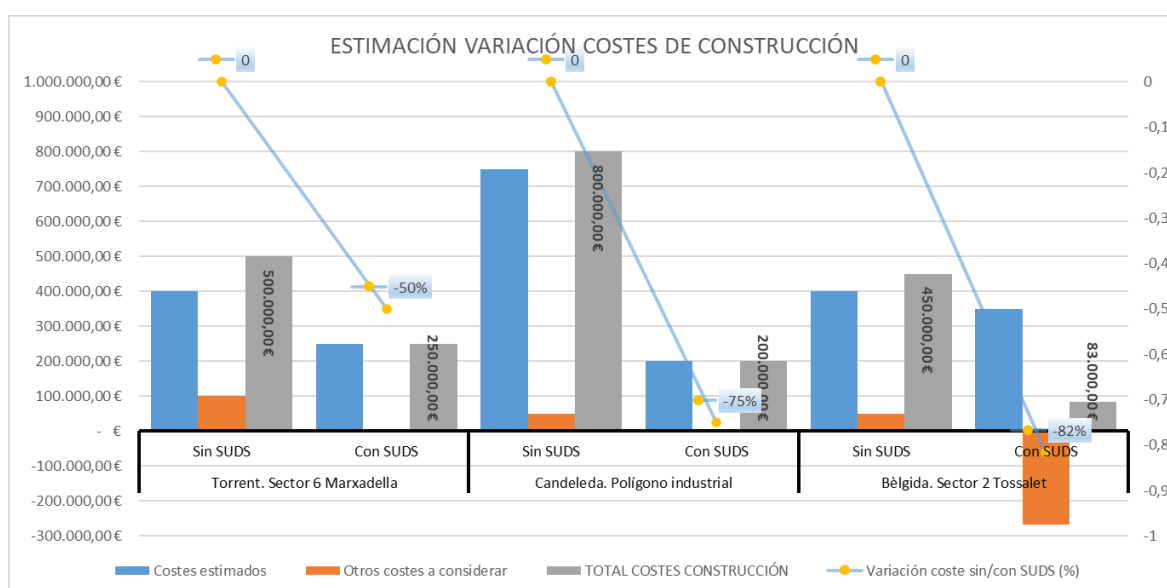


Figura 72. Tabla resumen resultados económicos (Fuente: elaboración propia).

De la misma manera, el diseño global planteado en los 3 casos se corresponde, en líneas generales, con el establecido normativamente para los PIGSS, a partir del diagnóstico inicial del estado del sistema y sus puntos críticos, el establecimiento de objetivos, la planificación global posterior del sistema de saneamiento y su comprobación mediante modelos en diferentes hipótesis y, por un último, con la determinación de las actuaciones precisas para lograr el mejor rendimiento del sistema, tanto desde el punto de vista económico como ambiental y social.

Aunque obviamente los casos analizados en este trabajo no representan todos los posibles tipos de sistemas de alcantarillado que se precisan en nuevos desarrollos urbanos, ni así tampoco de remodelación de redes existentes en entornos urbanos ya consolidados, los resultados obtenidos en apartados anteriores sí indican que la introducción de elementos tipo DBDI en los sistemas de alcantarillado tradicional resultan ser muy beneficiosos desde el punto de vista económico y ambiental, así como también para los habitantes afectados por estas actuaciones, situación que se ha comprobado para diferentes tipologías y usos urbanos (ya sean residenciales o productivos), valores de pluviometría y torrencialidad, incluso localización de los sistemas de alcantarillado en diferentes tipos de entornos urbanos y/o rústicos, mejorando notablemente el funcionamiento de los sistemas de alcantarillado tradicionales a partir de su ejecución conjunta y complementaria con SUDS.

En cualquier caso, cabe apuntar que esta casuística se ha comprobado para nuevos desarrollos urbanos con una superficie total en torno a las 10 Ha, por lo que su generalización precisaría de un análisis mayor que el realizado en el presente trabajo que, a su vez, abarcase otras extensiones superficiales diferentes, e incluso para entornos urbanos ya consolidados. Las primeras líneas aquí apuntadas parecen indicar que los beneficios económicos, ambientales y sociales logrados con la introducción de SUDS también serían alcanzables en dichos casos.

7.2. Discusión de los resultados obtenidos

Atendiendo a las características generales de los 3 casos analizados, la modelización de sus sistemas de alcantarillado se ha realizado fundamentalmente determinando el caudal máximo a partir de método racional contenido en la norma 5.2 – IC Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras, puesto que se trata de un método relativamente sencillo, de aplicación rápida y muy contrastado para la estimación del caudal pico en el diseño de pequeñas cuencas, como son estos casos, por lo que se considera adecuado para el alcance del presente trabajo. En cualquier caso, también se ha complementado con otras metodologías, como es el Modelo de Producción de Escorrentía Superficial del USDA, que permite estimar la escorrentía superficial

para diferentes tiempos de concentración o duración de la tormenta y, con ellos, el volumen total de la cuenca que se precisa laminar cuando se supera el umbral de escorrentía.

A su vez, como se presentó en apartados anteriores y se muestra nuevamente en las siguientes figuras, dichos modelos hidrológico-hidráulicos (en sombreado naranja) se han comparado con los resultados alcanzados mediante otras metodologías de predimensionamiento disponibles (en gris), así como con los resultados obtenidos a partir de los dimensionamientos volumétricos (en verde), calculados estos últimos según lo establecido por las guías disponibles que, por proximidad, resulten de mejor aplicación a cada caso analizado. Todo ello se compara, a su vez, con el volumen finalmente adoptado (en granate) para cada DBDI.

- Para el caso de Torrent se ha comprobado que, en líneas generales, el dimensionamiento mediante métodos volumétricos del DBDI analizado se ajusta bien al realizado a partir de modelos hidrológico-hidráulicos, con los que difiere menos de un 10%. El volumen final se ha sobredimensionado, por seguridad, cerca del 50%, minimizando así posibles riesgos en el sistema de alcantarillado de la localidad.

	Volumen (m ³)	% s/Dim.Vol	Vx (mm)
Predimensionamiento concesionaria	900 m ³	29,95%	30,54 mm
Método racional 5.2-IC	666 m ³	-3,86%	22,59 mm
Método racional calibrado Valencia	735 m ³	6,17%	24,95 mm
Dimensionamiento volumétrico	693 m ³	0,00%	23,50 mm
DBDI (Depósito nº 1) Torrent	1.037 m ³	49,73%	35,19 mm

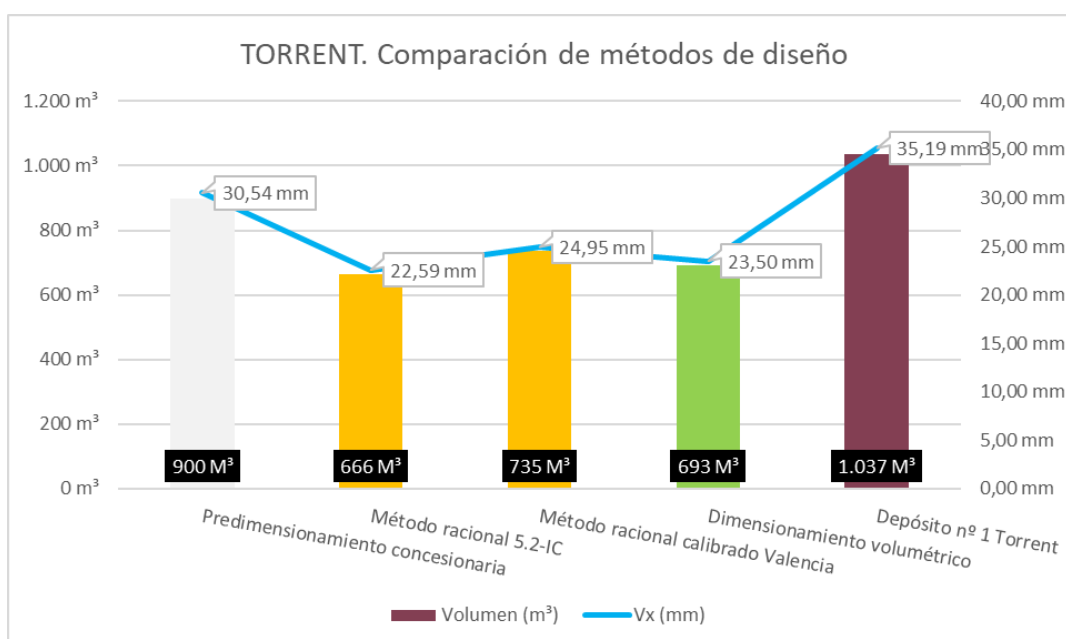


Figura 73. Gráfica comparativa de los métodos de diseño empleados en el caso del depósito nº 1 del Sector 6 de Torrent (Fuente: elaboración propia).

- En el caso de Candeleda, se ha comprobado también que el dimensionamiento mediante métodos volumétricos de la balsa de laminación planteada se ajusta bien al realizado a partir de modelos hidrológico-hidráulicos, con el que difiere en torno a un 8%, no así con otros métodos de predimensionamiento, con los que sí existen notables diferencias. El volumen final se ha sobredimensionado, por seguridad, cerca del 140%, adoptando una duración de lluvia de 2 h en lugar del tiempo de concentración de la cuenca, que era de unos 15 minutos, minimizando así posibles riesgos ambientales en los drenajes existentes en el entorno. Esta última discusión se apunta posteriormente.

	Volumen (m ³)	% s/Dim.Vol	Vx
Predimensionamiento art.34.2 PHTDH	89 m ³	-88,23%	1,20 mm
Predimensionamiento MR, escorrentía 1	1.631 m ³	114,64%	21,88 mm
Modelo de producción de escorrentía tc	698 m ³	-8,19%	9,36 mm
Dimensionamiento volumétrico	760 m³	0,00%	10,19 mm
DBDI (balsa) Candeleda	1.812 m³	138,50%	24,31 mm

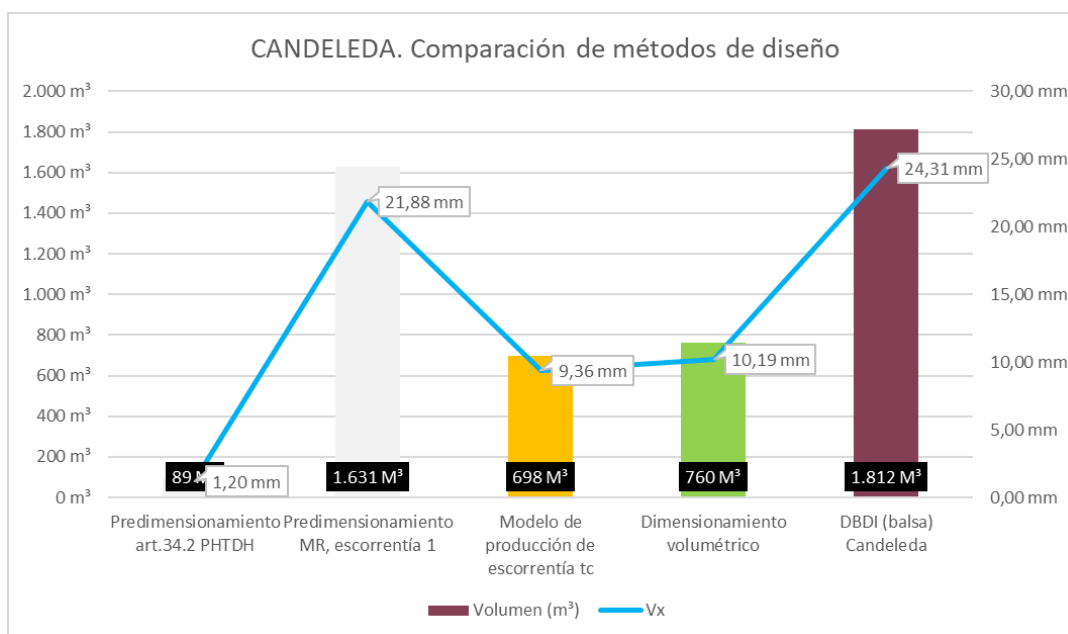


Figura 74. Gráfica comparativa de los métodos de diseño empleados en el caso del DBDI del Sector industrial SUR-3 de Candeleda (Fuente: elaboración propia).

- Por último, para el caso de Bèlgida se ha comprobado igualmente que el dimensionamiento mediante métodos volumétricos de la balsa de laminación planteada se ajusta bien al realizado a partir de modelos hidrológico-hidráulicos, con el que difiere en torno a un 4%. El volumen final se ha sobredimensionado, por seguridad, en torno al 300%, adoptando una duración de lluvia de 3 h en lugar del tiempo de concentración de la cuenca, que era de unos 30 minutos, aprovechando los espacios libres del sector y minimizando así posibles riesgos ambientales al entorno.

	Volumen (m ³)	% s/Dim.Vol	Vx (mm)
Predimensionamiento C=1, lluvia 20'	5.816 m ³	121,50%	44,30 mm
Modelo producción de escorrentía tc	2.732 m ³	4,04%	20,81 mm
Modelo producción de escorrentía 3h	10.372 m ³	294,97%	78,99 mm
Dimensionamiento volumétrico	2.626 m³	0,00%	20,00 mm
DBDI (balsa) Bèlgida	10.700 m³	307,47%	81,49 mm

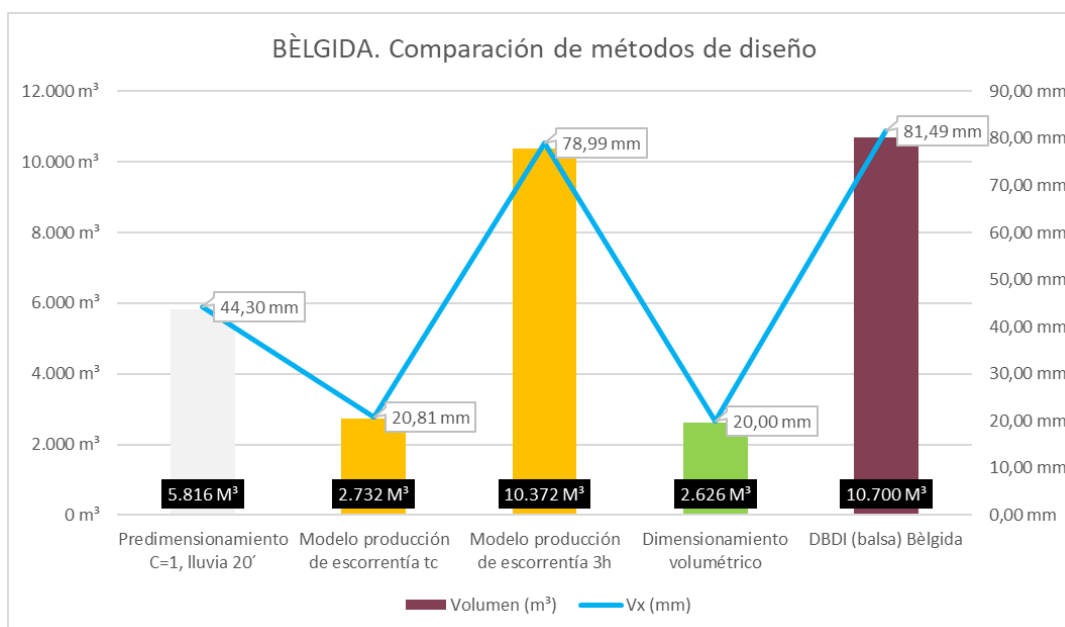


Figura 75. Gráfica comparativa de los métodos de diseño empleados en el caso del DBDI del Sector industrial 2 "El Tossalet" de Bèlgida (Fuente: elaboración propia).

Nótese que, en los 3 casos analizados, los resultados obtenidos a partir de modelos hidrológico-hidráulicos (en sombreado naranja) y de dimensionamiento volumétrico (en sombreado verde) son muy similares, sin diferenciarse más de un 10% (Torrent \cong 5%; Candeleda \cong 8%; Bèlgida 4%), cifras que demuestran el buen ajuste preliminar de este tipo de metodologías de dimensionamientos para nuevos desarrollos urbanos como los aquí analizados. En consecuencia, para los casos analizados se puede concluir que, en líneas generales, los métodos de dimensionamiento volumétricos incluidos en las diferentes guías locales se ajustan bastante bien al resultado obtenido a partir de los modelos hidrológico-hidráulicos empleados.

Sin embargo, más allá de adoptar este tipo de métodos de dimensionamiento para el cálculo volumétrico de elementos tipo DBDI, también es necesario considerar otros factores adicionales que pueden influir notablemente en su diseño final en relación a la red de drenaje, fundamentalmente las consecuencias ambientales, sociales y económicas que se derivarían en caso de eventos de precipitación extremos que sobrepasaran la capacidad para la que se han dimensionado los sistemas de alcantarillado. En ese sentido, tal y como se muestra en los resultados presentados, en los casos aquí analizados se ha optado por sobredimensionar de

distinta manera los elementos SUDS previstos en sus respectivas redes de drenaje para laminar las escorrentías. En ese sentido, este sobredimensionamiento o coeficiente de seguridad, no sólo ha atendido a las consecuencias antes citadas, sino también los datos pluviométricos de la zona, que advierten de la intensidad de la lluvia, y la ordenación de cada una de las actuaciones urbanas, que permite disponer de unos espacios concretos para situar en ellos estos elementos de laminación, ya sean intercalados en las redes de alcantarillado, como el caso de Torrent, o al final de las mismas, como así se ha previsto en los polígonos de Candeleda y Bèlgida.

Así pues, aunque los sistemas de alcantarillado tradicionales y, en consonancia con estos, también los SUDS se dimensionen para un determinado periodo de retorno y mediante una determinada metodología más o menos ajustada a la realidad, es aconsejable que los DBDI incluyan unos coeficientes de seguridad que, además de factores ambientales, sociales y económicos, consideren los espacios urbanos disponibles y los eventos de lluvia extrema, permitiendo así laminar mayores caudales que los inicialmente estimados y, en consecuencia, disminuir también las consecuencias derivadas una vez sobrepasada la capacidad de las canalizaciones de drenaje. La siguiente figura muestra cómo se han tenido en cuenta en este trabajo otros factores para el dimensionamiento de los DBDI, en particular, sus datos de precipitación, que se han comparado con los valores de precipitación adoptados.

	Precipitación máx (T=25)		Percentil de lluvia Vx (mm)		
	Pd (mm)	Id (mm/h)	Vx (modelo)	Vx (volum.)	Vx (Final)
Torrent	157,35	6,56	23,50	23,77	35,19
Candeleda	164,54	6,86	9,36	10,19	24,31
Bèlgida	227,48	9,48	20,81	20,00	81,49

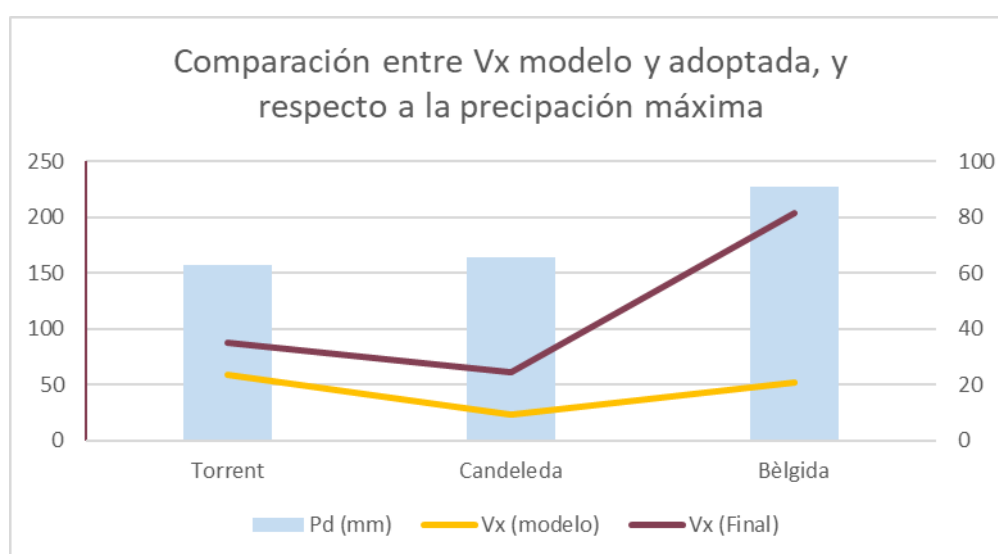


Figura 76. Gráfica comparativa de los datos de precipitación y el valor de precipitación Vx (l/m²) estimado en modelos y adoptado en cada caso (Fuente: elaboración propia).

Este sobredimensionamiento ha de considerar, entre otros factores, los de tipo social, ambiental, económico y urbanístico, así como el creciente impacto del cambio climático que, como se ha adelantado anteriormente, ha incrementado la frecuencia e intensidad de las lluvias extremas, con los consiguientes problemas derivados de inundaciones pluviales en zonas urbanas. En ese sentido, se propone la continuación de este trabajo con un análisis multicriterio que, en última instancia, proponga unos coeficientes de seguridad para los elementos tipo DBDI en entornos urbanos, de manera análogo a como se regulan normativamente en otro tipo de elementos constructivos.

Por último, en lo que respecta al periodo de retorno a considerar para el dimensionamiento de los sistemas de alcantarillado cabe añadir que, aunque en España no exista una regulación única para todo el territorio, las diversas normativas existentes generalmente adoptan periodos de 25 años, máxime teniendo en cuenta el creciente impacto del cambio climático y la intensificación de los eventos pluviómetros extremos. En línea con ello los casos aquí analizados también han adoptado dicho periodo.

7.3. Recomendaciones para futuras mejoras del sistema

A continuación, se presenta una serie de propuestas generales surgidas fundamentalmente del estudio del estado del arte y de los resultados obtenidos de los tres casos analizados, todo ello con el objetivo general de continuar con la mejora de la gestión de los sistemas de saneamiento urbano mediante la integración de SUDS en los sistemas tradicionales:

1. Optimización continua del sistema, adaptando los diseños a los desarrollos urbanos que se planteen y, sobre todo, a los nuevos escenarios climáticos.

Aunque los DBDI demuestran ser eficaces en actuaciones urbanas como las analizadas, su comportamiento puede variar ante escenarios de cambio climático, modificaciones en los desarrollos urbanos o variaciones en los patrones de precipitación, con aumento de los eventos extremos y de su intensidad.

Recomendaciones:

- ✓ Realizar revisiones periódicas de los sistemas ejecutados para verificar su adecuado comportamiento hidráulico y minimizar los posibles riesgos asociados.
- ✓ Actualizar los modelos de simulación hidrológica-hidráulica con nuevos datos pluviométricos y/o cambios en la urbanización.

- ✓ Implementar, en caso de que sea posible, estrategias de diseño adaptativo que permitan ampliar la capacidad de los DBDI o incorporar nuevas soluciones sostenibles si las condiciones lo requieren.
 - ✓ Adoptar coeficientes de seguridad en el dimensionamiento de las instalaciones en función, entre otros, de factores sociales, ambientales, económicos, urbanísticos y meteorológicos.
2. Implementación de estrategias de mantenimiento de los SUDS y monitoreo de los principales puntos de los sistemas de alcantarillado, esenciales para asegurar su funcionalidad y sostenibilidad.

La eficacia a medio y largo plazo de los sistemas de alcantarillado depende, en buena medida, de su correcto funcionamiento y mantenimiento, así como del conocimiento preciso de su estado en tiempo real, lo que precisa su monitoreo y revisión continua.

Recomendaciones:

- ✓ Establecer protocolos claros de inspección, limpieza periódica y mantenimiento del sistema (retirada de sedimentos, revisión de registros, etc.).
 - ✓ Instalar sistemas de monitorización remota en los principales puntos del sistema de saneamiento, e integrar los datos conseguidos en tiempo real en un sistema de gestión digital municipal que permita la toma de decisiones.
 - ✓ Realizar la mejora continua de los protocolos de limpieza e inspección y de los sistemas de monitoreo, en línea con los continuos avances tecnológicos.
3. Revisión y adaptación de los dimensionamientos volumétricos a los casos concretos, conforme a los datos pluviométricos y su evolución.

Como se ha comprobado con los casos analizados los métodos volumétricos presentan, en general, buenos resultados, pero deben ser adaptables al mayor tipo de casos posibles, y revisados periódicamente en función de la experiencia acumulada y, sobre todo, el posible cambio de las condiciones climáticas y la modificación de los eventos pluviométricos.

Recomendaciones:

- ✓ Desarrollar criterios volumétricos adaptados a la climatología concreta de cada cuenca urbana de diseño.

- ✓ Evaluar periódicamente si los volúmenes de laminación estimados inicialmente bajo unas determinadas condiciones, continúan siendo aceptables ante cambios en los usos del suelo o aumento de la superficie urbanizada, estableciendo unos parámetros o coeficientes de seguridad.
- ✓ Considerar la inclusión de coeficientes de seguridad en zonas con mayor riesgo hidráulico y/o consecuencias para la población, siguiendo principios de resiliencia urbana e introduciendo el factor riesgo.

4. Fortalecimiento del enfoque PIGSS en la planificación de sistemas de alcantarillado.

Los PIGSS van a configurarse como los instrumentos fundamentales para diagnosticar y planificar la mejora continua de los sistemas de saneamiento urbano. A través de estos planes se podrá identificar de forma sistemática el estado de las redes, la existencia y características de VDSS y, en su caso, las necesidades de intervención a partir de los objetivos previamente establecidos. La integración de los SUDS dentro del marco de los PIGSS permite una gestión más eficiente, resiliente y alineada con los objetivos ambientales y la optimización de los costes económicos.

Recomendaciones:

- ✓ Integrar el diseño e implantación de SUDS como parte de las medidas prioritarias dentro de los PIGSS.
- ✓ Establecer indicadores de seguimiento específicos para los DBDI en el marco de estos planes, tanto en términos hidráulicos como de calidad del agua.
- ✓ Incluir protocolos de mantenimiento y actualización en los PIGSS.
- ✓ Promover la coordinación efectiva entre operadores, administraciones y usuarios para una gobernanza eficaz del sistema.

8. CONCLUSIONES. RECOMENDACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

8.1. Principales conclusiones alcanzadas

Con el presente trabajo se ha profundizado en el conocimiento, análisis y aplicación práctica de los SUDS como una alternativa eficaz frente a los crecientes problemas derivados del drenaje urbano, en particular, a partir de elementos de laminación DBDI que complementen a los sistemas de alcantarillado tradicional. A lo largo del mismo se ha evidenciado que esta tipología de SUDS puede proporcionar a dichos sistemas un suplemento eficaz y, a su vez, una solución resiliente frente al aumento de los eventos extremos de precipitaciones asociados al cambio climático, la impermeabilización del suelo en las ciudades y el consiguiente incremento de la escorrentía urbana, y el deterioro progresivo de la calidad de las aguas pluviales, mejorando la sostenibilidad ambiental de los sistemas de alcantarillado y contribuyendo, a su vez, a la consecución de diversos ODS de la Agenda 2030.

En primer lugar, se ha constatado que los SUDS presentan ventajas significativas respecto a los sistemas tradicionales de drenaje, especialmente en lo que respecta al control de caudales y minimización de sus puntas durante los episodios de precipitación, mejora de la calidad del agua y los correspondientes beneficios ambientales y económicos asociados a estas utilidades, como se ha comprobado, por ejemplo, en Torrent. Además, soluciones como las balsas o depósitos de laminación y, en su caso, infiltración permiten una mayor integración con el entorno urbano, fomentan la biodiversidad, contribuyen a la mejora del paisaje urbano y favorecen el bienestar ciudadano, mejorando en definitiva la integración paisajística y ambiental de la creciente urbanización de las ciudades, como también se ha comprobado en los polígonos de Candeleda y Bèlgida. Las simulaciones realizadas en los 3 casos de estudio, así como las comparativas entre escenarios sin DBDI y con estos, han puesto de manifiesto una reducción y mejora en el control de caudales punta, una minimización de los impactos ambientales asociados al drenaje urbano y una reducción en los costes de urbanización.

Otro aspecto relevante del presente trabajo ha sido la identificación de las barreras aún existentes para lograr una implantación más amplia de los SUDS en los entornos urbanos, entre las que destacan la escasa formación en esta materia de los decisores municipales, la falta en no pocas ocasiones de conocimiento técnico específico y, en el caso español, la ausencia de una normativa común y específica que regule y fomente el uso de SUDS de forma generalizada, especialmente elementos DBDI para la laminación de puntas de caudal y mejora de la calidad de las escorrentías urbanas. En ese sentido, después de más de medio siglo de análisis e implementación de este tipo de soluciones sostenibles, estas limitaciones no hacen más que

reforzar la necesidad de trabajar desde una perspectiva interdisciplinar y transversal, integrando la planificación urbana, la ingeniería civil, el medio ambiente, la participación ciudadana y, no menos importante, la formación e involucración de los decisores de alto nivel, en particular los municipales, puesto que estos últimos son los que finalmente resuelven la implementación de SUDS en los sistemas de alcantarillado de nuestras ciudades.

Por otra parte, el uso de herramientas informáticas resulta actualmente fundamental para el análisis hidrológico-hidráulico de los sistemas de alcantarillado, mediante el desarrollo e implementación de modelos de simulación más o menos complejos, según se precise en cada caso. Estas herramientas han permitido validar finalmente la viabilidad técnica del sistema implementado y su posterior comparación económica en los casos analizados, evidenciando que su aplicación práctica es factible y que, a su vez, puede ser también extensible a otros contextos urbanos de similares características, y que los criterios de dimensionamiento volumétricos son aptos para esta tipología de desarrollos urbanos, aunque sería recomendable extender el presente trabajo para analizar y comprobar si es también escalable a otro tipo de casos, tanto en espacios de reurbanización como nuevos desarrollos de dimensiones mayores. La incorporación de elementos tipo DBDI en los casos analizados ha logrado cumplir con los criterios técnicos y normativos, y ha mostrado una mejora ambiental y paisajística significativa, a la par que ha permitido reducir los costes de construcción asociados al precisarse infraestructuras de drenaje de menores dimensiones, siempre que la urbanización planteada haya previsto los espacios necesarios para situar estos elementos sostenibles. Como principales conclusiones de los casos analizados se tiene que:

- ✓ La introducción de elementos DBDI en los sistemas de alcantarillado ha evidenciado en todos los casos una mejora significativa en la laminación de escorrentías, una reducción muy significativa de los caudales punta en las canalizaciones, la mejora de la calidad del agua y el cumplimiento de la normativa vigente. De la misma manera, se ha logrado una reducción generalizada de los costes de construcción asociados, en particular, en los casos de Torrent y Candeleda, donde la disminución resulta ser muy significativa respecto a los sistemas de alcantarillado tradicional.
- ✓ Se ha validado que los métodos simplificados de dimensionamiento volumétrico, comparados con modelos hidrológico-hidráulicos más complejos, ofrecen un ajuste adecuado (diferencias <10%) para nuevos desarrollos urbanos de unas 10 Ha de superficie total, como son los 3 casos analizados. Sería importante extender dicho análisis a otro tipo de tipologías urbanas y, con ello, validar hasta qué superficies y/o

características estos métodos simplificados son adecuados para realizar el predimensionamiento de este tipo de infraestructuras sostenibles.

- ✓ Se ha revelado que sobredimensionar los DBDI ofrece mayor seguridad frente a los eventos extremos de precipitación, en línea con los efectos del cambio climático, disminuyendo los riesgos ambientales y para la población derivados de estos eventos, siempre que los respectivos planes urbanísticos ofrezcan los espacios mínimos necesarios para posibilitar la implantación de este tipo de elementos. Por ello, se recomienda extender el presente trabajo con el análisis del establecimiento de unos coeficientes de seguridad para los elementos tipo DBDI en entornos urbanos, que pondere la minimización de riesgos con factores ambientales, económicos y sociales.

En línea con estas conclusiones, el presente trabajo propone su continuación en 3 líneas fundamentales de desarrollo: (i) extender el análisis realizado para otros ámbitos urbanos de extensiones superficiales diferentes a las aquí consideradas, de manera que se puedan obtener conclusiones para una mayor tipología de casos e incluso para entornos urbanos ya consolidados; (ii) completar el análisis anterior para los métodos de dimensionamiento volumétrico, comparando sus resultados con los obtenidos mediante modelos hidrológico-hidráulicos; (iii) realizar un análisis multicriterio que, en última instancia, permita establecer normativamente unos coeficientes de seguridad para los elementos tipo DBDI para redes de drenaje de zonas urbana, disminuyendo el riesgo.

En definitiva, con el presente trabajo se ha revelado cómo los SUDS, y su integración dentro de los nuevos PIGSS, no son únicamente una herramienta técnica que permite reproducir las técnicas naturales en la escorrentía urbana, sino una propuesta integral y complementaria a los sistemas de alcantarillado tradicional que permiten transformar y mejorar la gestión y control del drenaje en las ciudades, favoreciendo un modelo urbano más sostenible, resiliente al cambio climático y habitable para los residentes, reduciendo igualmente la contaminación asociada al drenaje urbano. Su implementación, sin embargo, requiere superar ciertas barreras todavía presentes, lo que pone de relieve la importancia de seguir investigando, innovando y formando a la ciudadanía en este ámbito, así como desarrollar un marco normativo común en España que permita la implementación efectiva de este tipo de soluciones de drenaje en todo el país, aunque adaptable a cada caso.

8.2. Recomendaciones y estudios futuros

A partir de las conclusiones obtenidas en este trabajo, se propone la apertura de diversas líneas de estudio futuras que podrían ampliar los resultados alcanzados:

- 1) **Desarrollar una legislación o guía común estatal** que integre para todo el territorio nacional un documento base para el diseño e implementación de SUDS en los entornos urbanos, particularizando cada zona en función de sus características morfológicas y pluviométricas, así como su adaptación ante diferentes escenarios de cambio climático, a modo de cómo se realiza en la norma 5.2-IC para realizar el dimensionamiento del drenaje de las carreteras.
- 2) Como alternativa a lo anterior, y de manera similar a cómo se ha realizado en el Anexo V de la Directiva (UE) 2024/3019 para los PIGSS, **aprobar una normativa estatal que detalle el contenido mínimo que han de contemplar las guías locales para el diseño de SUDS**, y qué aglomeraciones urbanas han de realizar y aprobar este tipo de guías y en qué plazos.
- 3) En línea con lo anterior, y análogamente a lo realizado en Reino Unido [véase referencia 47] y Singapur (Programa ABC), **analizar la posibilidad de establecer unos estándares mínimos de SUDS para los nuevos desarrollos urbanos**, de manera similar a los diferentes estándares urbanísticos (zonas verdes, equipamientos y dotaciones urbanas, características del viario, servicios públicos, etc.) que han de cumplir los nuevos desarrollos en atención a lo regulado por las correspondientes legislaciones en materia de urbanismo y ordenación del territorio. Estos estándares deberían centrarse fundamentalmente en la normalización de reservas de espacios para la implantación de este tipo de elementos de drenaje y el empleo de diversas tipologías de SUDS en atención a los usos urbanos previstos, tanto en los espacios públicos como en aquellas tipologías privativas que permitan disponer espacios comunes no edificados, todo ello para disminuir en origen las escorrentías urbanas y mejorar la calidad de estas aguas antes de su retorno al medio.



- 4) **Participación ciudadana y formación específica a los decisores de alto nivel.** Se propone, por una parte, explorar el papel de la ciudadanía en los SUDS y su integración en la infraestructura verde urbana, lo cual podría mejorar la percepción social de este tipo de soluciones sostenibles y su eficacia en los sistemas de alcantarillado a medio y largo plazo, y por otra, involucrar directamente a los decisores de alto nivel (sobre todo a los municipales) en el diseño, implementación, mantenimiento, monitoreo y renovación de estos SUDS, puesto que de ellos depende directamente su efectividad al

tratarse de los responsables últimos de su puesta en funcionamiento inicial y su posterior mantenimiento y efectividad.

- 5) **Integración con estrategias de adaptación al cambio climático.** Dado que los SUDS pueden resultar una herramienta clave para la resiliencia urbana frente al cambio climático, una posible línea de desarrollo podría centrarse en su vinculación con los Planes de Acción por el Clima y la Energía Sostenible (PACES), y cómo pueden ayudar los SUDS a disminuir los efectos derivados de los eventos climatológicos extremos, fundamentalmente en la contribución a la reducción del efecto isla de calor en las ciudades y la minoración de las inundaciones urbanas.
- 6) Tal y como se está realizando en otros países, como EE.UU., Alemania o Reino Unido, **fomentar en origen la gestión de las aguas pluviales dentro de las propiedades** mediante la introducción de bonificaciones fiscales en las ordenanzas municipales. De este modo, se podría estudiar una regulación nacional que analice qué beneficios económicos se pueden trasladar a aquellos propietarios privados que, en la medida de lo posible, minimicen sus vertidos a los sistemas de alcantarillado y, en consecuencia, disminuyan los costes de construcción y mantenimiento de estos, y la necesidad posterior del tratamiento de las aguas pluviales y/o residuales.
- 7) Estudiar la **mejora de la financiación de las redes de aguas pluviales**, mediante la incorporación en las tarifas de agua del coste de mantenimiento y renovación de este tipo de redes y aquellos SUDS que se precisen para optimizar su funcionamiento, según se detalle en los correspondientes PIGSS de cada aglomeración urbana, en línea a como se está realizando en otros países europeos.
- 8) **Desarrollar plataformas digitales** que permitan a técnicos, gestores y ciudadanos visualizar y simular distintas soluciones SUDS en sistemas de alcantarillado de manera colaborativa, logrando una mejora continua de los modelos de simulación hidrológico-hidráulica en diferentes casos y escenarios, y con ellos la efectividad de los SUDS en el entorno urbano.



- 9) **Completar el análisis realizado para DBDI en el presente trabajo a otros ámbitos urbanos de extensiones superficiales diferentes**, de manera que se puedan obtener conclusiones para una mayor tipología de casos e incluso para entornos urbanos ya consolidados. En definitiva, validar las líneas aquí apuntadas de este tipo de SUDS para

otras casuísticas no analizadas, justificando si los beneficios logrados también serían extrapolables a dichos casos.

- 10) **Extender la validación de los criterios de dimensionamiento volumétricos** para otra tipología de desarrollos urbanos, tanto para zonas urbanas consolidadas en las que se contemple su reurbanización o modificación de usos y/o tipologías edificatorias, como para otra clase de desarrollos urbanos de diferentes magnitudes que las analizadas en el presente trabajo, a partir igualmente de la comparación de los resultados obtenidos con modelos de simulación hidrológico-hidráulica y los alcanzados mediante criterios volumétricos.
- 11) **Regular normativamente unos coeficientes de seguridad para los elementos tipo DBDI**, a partir de la realización de algún análisis multicriterio, o similar, basado fundamentalmente en factores de tipo social, ambiental, económico, urbanístico y pluviométrico, de manera que se establezca cómo realizar el sobredimensionamiento de este tipo de SUDS para minimizar las consecuencias o riesgos asociados a posibles eventos pluviométricos extremos.
- 12) **Estudio comparativo a otras tipologías de SUDS**. Ampliar el análisis realizado en el presente trabajo a otro tipo de SUDS (como los pavimentos permeables, zanjas o pozos de infiltración, etc.) permitiría comparar igualmente su eficiencia hidráulica, económica y ambiental en contextos urbanos diversos, y así poder establecer unos criterios de selección más específicos para cada tipo de SUDS y su aplicación generalizada a diversos entornos urbanos.



En definitiva, a partir de estas recomendaciones y estudios futuros se apunta la necesidad de aprobar una normativa estatal clara y unificada que clarifique, fomente y regule el diseño e implementación de los SUDS en los sistemas de alcantarillado, teniendo en cuenta las particularidades locales (clima, morfología urbana, etc.) y los escenarios de cambio climático, o se plantea la alternativa de establecer unos requisitos mínimos obligatorios para el desarrollo de las guías locales, de manera similar a cómo se ha regulado para los PIGSS.

De la misma manera, se destaca la importancia de establecer unos estándares mínimos para los nuevos desarrollos urbanos, asegurando la integración física de los SUDS desde la planificación urbana. Se propone igualmente fomentar la participación ciudadana y la formación de los decisores municipales, para garantizar la aceptación social y la efectiva

implantación y posterior gestión y mantenimiento de estas infraestructuras, de manera que su efectividad perdure a medio y largo plazo.

También es importante subrayar la necesidad de explorar incentivos fiscales que promuevan la gestión de las aguas en origen, en las propiedades privadas, o se mejore la financiación de las redes de saneamiento mediante el incremento de las tarifas de agua para incluir el coste de mantenimiento y renovación de las redes de drenaje.

Por último, se propone la extensión de las conclusiones alcanzadas en el presente trabajo a otro tipo de ámbitos urbanos o, más allá de los DBDI, a otras tipologías de SUDS, desplegar la validación del dimensionamiento volumétrico en distintos entornos urbanos, con el fin de mejorar la eficacia y aplicabilidad de los SUDS, y promover una regulación normativa de los coeficientes de seguridad de este tipo de elementos previa realización de los análisis precisos.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] NÚÑEZ-COLLADO, Alba, et al. *Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Ministerio para la transición ecológica, 2019, p. 24.
- [2] 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. «BOE» núm. 208, de 31/08/2023. Link: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-18806. U.A.V: 29/01/2025.
- [3] Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. «BOE» núm. 103, de 30/04/1986. Link: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1986-10638>. U.A.V: 29/01/2025.
- [4] Anuncio de la Dirección General del Agua por el que se inicia el periodo de información pública de los Inventarios de aglomeraciones urbanas que deben elaborar los planes integrales de gestión del sistema de saneamiento correspondientes a los ámbitos territoriales gestionados por las Confederaciones Hidrográficas del Miño Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro. «BOE» núm. 154, de 26/06/2024. Link: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-B-2024-23944. U.A.V: 29/01/2025.
- [5] Pedro Gerardo Blázquez García. Universidad Europea de Madrid, Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Asignatura: Sistemas de Depuración, Tratamiento de Aguas y Residuos, Tema 1, p. 3. Curso 2023-2024.
- [6] DE LA FUENTE GARCÍA, Laura, et al. *Guía básica para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la ciudad de València*. Ajuntament de València, 2021, p. 2.
- [7] RÖDEL, S.; GÜNTHER, F. W.; BRÜGGEMANN, T. *Investigating the impacts of extraneous water on wastewater treatment plants*. Water Science and Technology, 2017, vol. 75, no 4, p. 847-855.
- [8] ANTA, José, et al. *Co-UDlabs: una red europea de grandes instalaciones de investigación en drenaje urbano*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras

hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 12-15.

[9] ANTA, José, et al. *Infraestructura de investigación en drenaje sostenible en la Universidad da Coruña*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 16-19.

[10] Extraído de: ARNAUD, Nicole, et al. *Una nueva metodología para modelar SUDS utilizando SWMM y Giswater: estudio de caso en Montjuic-Girona/España*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 56-57.

[11] BERNAL, Carlota; MÍNGUEZ, Sergio Zubelzu; ESTEVE, Paloma. *Impacto social del sistema de drenaje sostenible (SUDS): revisión sistemática de la literatura y retos de la investigación*. En VII Jornadas de Ingeniería del Agua: La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático. Libro de actas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2024. p. 124-131.

[12] Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. «BOE» núm. 227, de 20 de septiembre de 2012. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2012-11779>. U.A.V. 29/01/2025.

[13] Link: <https://aca.gencat.cat/es/laigua/proteccio-i-conservacio/regulacio-dabocaments/plans-integrals-gestio-sistemes-sanejament/index.html>. U.A.V: 29/01/2025.

[14] MARTÍN BUENO, Manuel Antonio, et al. *Baños y letrinas en el mundo romano: el caso del balneum de la Domus 1 del barrio de las termas de Bilbilis*. 2007.

[15] UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. *“Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales. El recurso desaprovechado”*. 2017.

[16] Pedro Gerardo Blázquez García. Universidad Europea de Madrid, Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Asignatura: Sistemas de Depuración, Tratamiento de Aguas y Residuos, Tema 2, p. 5. Curso 2023-2024.

- [17] DIETZ, Michael E. Low impact development practices: *A review of current research and recommendations for future directions*. *Water, air, and soil pollution*, 2007, vol. 186, p. 351-363.
- [18] Basado en: RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, Jorge, et al. *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero*. Universidad de Cantabria, 2008.
- [19] WOODS BALLARD, B., et al. *The SuDS Manual*. Ciria (753). Department for Environment Food & Rural Affairs. CIRIA. Londres 2015.
- [20] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23/10/2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. «DOCE» núm. 327, de 22/12/2000. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524>. U.A.V. 30/01/2025.
- [21] Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el RDPH, 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. «BOE» núm. 314, de 29/12/2016. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-12466>. U.A.V. 30/01/2025.
- [22] GARCÍA GIL, F. J. *Prontuario de protección del medio ambiente estatal, autonómico y municipal*. 2007.
- [23] COMÁS, Pau et al. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. *Manual de recomendaciones para el diseño de tanques de tormenta*. Septiembre 2014.
- [24] ELLIS, J. Bryan; REVITT, D. Michael; LUNDY, Lian. *An impact assessment methodology for urban surface runoff quality following best practice treatment*. *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 416, p. 172-179.
- [27] Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. «BOE» núm. 60, de 10/03/2016. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-2405>. U.A.V. 02/02/2025.
- [28] CHECA SÁNCHEZ, María Soledad, et al. *Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres*. Ayuntamiento de Madrid, 2021.

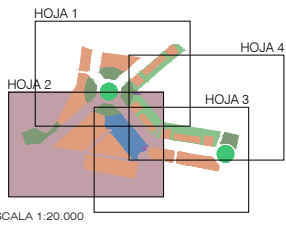
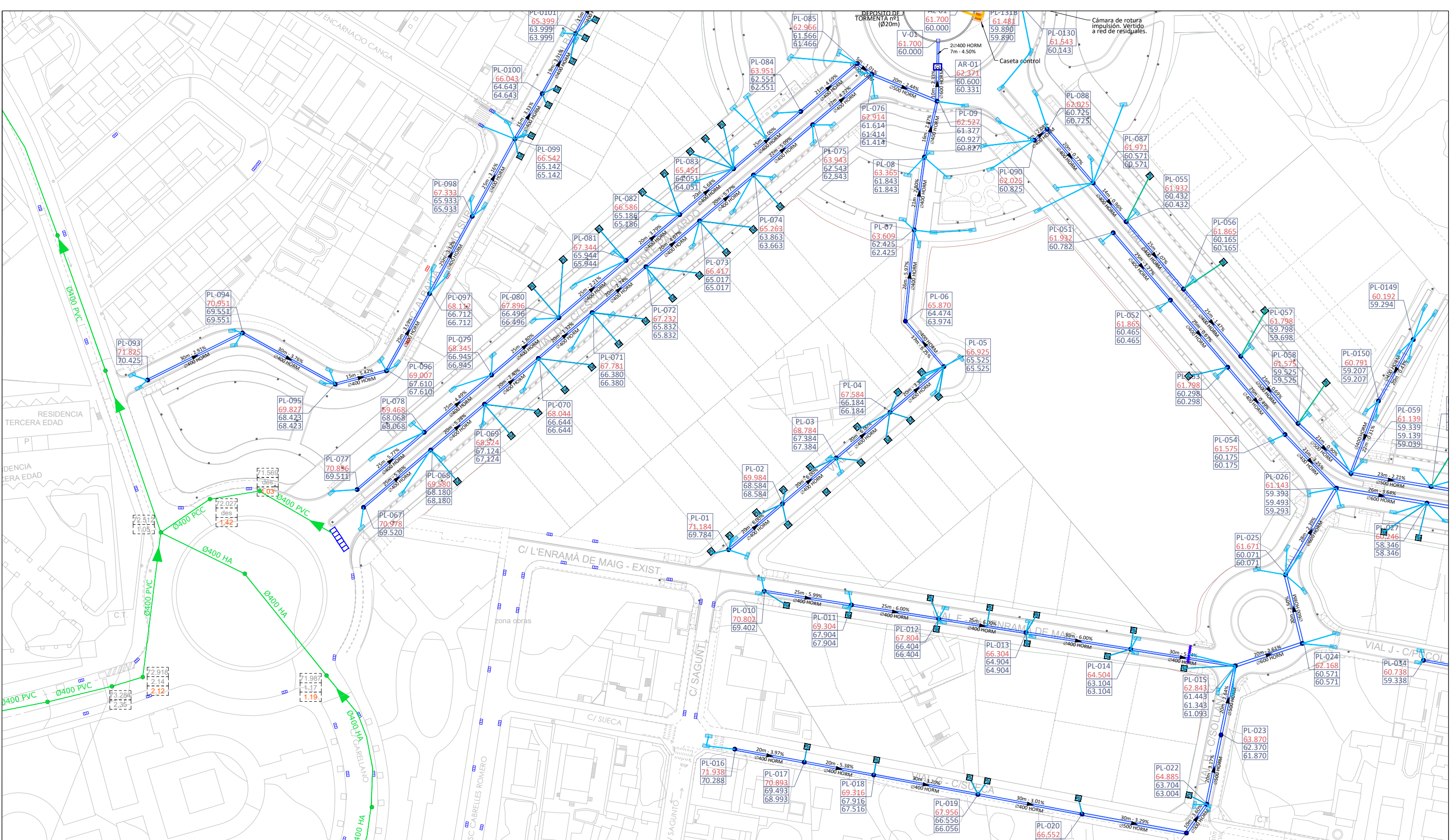
- [29] BERROZPE ULLATE, Gregorio, et al. *Recomendaciones básicas. Diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en Navarra*. Gobierno de Navarra. Consejería de Cohesión Territorial. Febrero 2023.
- [30] PERALES MOMPARNER, Sara, et al. *Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para el término municipal de Azuqueca de Henares*. Ayuntamiento de Azuqueca de Henares, septiembre de 2023.
- [31] BADIA CASAS, Eloi, et al. *Guia tècnica per al disseny de sistemes de drenatge urbà sostenible SUDS*. Ajuntament de Barcelona, Medi Ambient i Serveis Urbans. Ecologia Urbana, abril de 2020.
- [32] PERALES MOMPARNER, Sara, et al. *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el término municipal de Castelló de la Plana*. Ayuntamiento de Castelló de la Plana, noviembre 2021.
- [33] BLANCO BARQUERO, Juan Antonio, et al. *Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el término municipal de Murcia*. Ayuntamiento de Murcia / Aguas de Murcia, diciembre 2023.
- [34] ANDRÉS DOMÉNECH, Ignacio. *Evaluación probabilística de indicadores de eficiencia para el dimensionamiento volumétrico de tanques de tormenta para el control de la contaminación de escorrentías urbanas*. 2010. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València. Pág. 75 y ss.
- [35] GARCÍA, Ernesto Hontoria. *Evaluación de la contaminación por escorrentía superficial urbana*. 1985. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [36] BENEYTO GONZÁLEZ-BAYLIN, María. *Evaluación de los rendimientos de depósitos de detención-aliviadero en redes de saneamiento unitarias en cuencas de la España húmeda*. Universidade da Coruña, marzo 2004
- [37] PRIETO MARTÍN, Rafael; BELTRÁN PEDREIRA, Manuel; et al. *Normas para Redes de Saneamiento*. Versión 3. Canal de Isabel II, 2020.
- [38] BALAIRÓN, L., et al. *Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano*. CEDEX, Manuales y recomendaciones, 2008.
- [39] URBONAS, Ben; STAHR, Peter. *Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management*. 1993.

- [40] Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. «BOE» núm. 189, de 08/08/1985 (Disposición derogada). Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1985-16661>. U.A.V. 02/02/2025.
- [41] Directiva del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. «DOCE» núm. 135, de 30/05/1991. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1991-80646>. U.A.V. 02/02/2025.
- [42] Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. «BOE» núm. 312, de 30/12/1995. Link: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1995-27963>. U.A.V. 02/02/2025.
- [43] Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. «BOE» núm. 77, de 29/03/1996. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1996-7159>. U.A.V. 02/02/2025.
- [44] Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido. «BOE» núm. 268, de 05/11/2014. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2014-11411>. U.A.V. 02/02/2025.
- [45] Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. «BOE» núm. 176, de 24/07/2001. Link: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276>. U.A.V. 02/02/2025.
- [46] Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, (versión refundida). «DOUE» núm. 3019, de 12/12/2024. Link: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2024-81831>. U.A.V. 31/01/2025.
- [47] Flood and Water Management Act 2010, SCHEDULE 3 Sustainable Drainage. Link: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2010/29/schedule/3>. U.A.V. 04/02/2025.
- [48] BRADLEY, J., et al. *Using SuDS to reduce phosphorus in surface water runoff* (C808F). Department for Environment Food & Rural Affairs. CIRIA. Londres, agosto 2024.
- [49] HARROP, C., et al. *Blue roofs. A guide to implementation* (C817D). Department for Environment Food & Rural Affairs. CIRIA. Londres, noviembre 2024.



- [50] PWC (PricewaterhouseCoopers). *Estimación del déficit de inversiones en el ciclo urbano del agua en España*. AGUA (Asociación de gestores urbanos del agua), mayo 2024, p. 6. Link: <https://asociacionagua.com/wp-content/uploads/2024/06/Analisis-del-deficit-de-agua-urbano.pdf>. U.A.V. 25/05/2025.
- [51] Link: <https://climate.cityofnewyork.us/es/>. U.A.V. 28/03/2025.
- [52] Link: <https://www.portland.gov/bes/grants-incentives/clean-river-rewards#toc-about-clean-river-rewards>. U.A.V. 28/03/2025.
- [53] Link: <https://www.pub.gov.sg/-/media/PUB/PDF/Compliance/Earth-Control-Measures/Code-of-Practice-on-Surface-Water-Drainage.pdf>. U.A.V. 28/03/2025.
- [54] Primera versión: MOCKUS, Victor, et al. National engineering handbook. *US Soil Conservation Service: Washington, DC, USA*, 1964, vol. 4.
- [55] KELLAGHER, R. The Wallingford Procedure-for design and analysis of urban storm drainage. 1981.
- [56] Aprobado por el Real Decreto 35/2023, de 24 de enero (BOE núm. 35, de 10 de febrero de 2023). Link: <https://www.boe.es/boe/dias/2023/02/10/pdfs/BOE-A-2023-3511.pdf>. U.A.V. 24/04/2025.

DOCUMENTACIÓN ANEXA**Red de drenaje del Sector residencial 6 “Marxadella” de Torrent (Valencia)**

- DA-1_01: Caso de estudio Torrent. Planos de planta de la red de pluviales de la zona central del Sector 6 Marxadella y conexión a la red existente.
- DA-1_02: Caso de estudio Torrent. Modelo de cálculo de la central este del Sector 6 Marxadella sin la aplicación de SUDS.









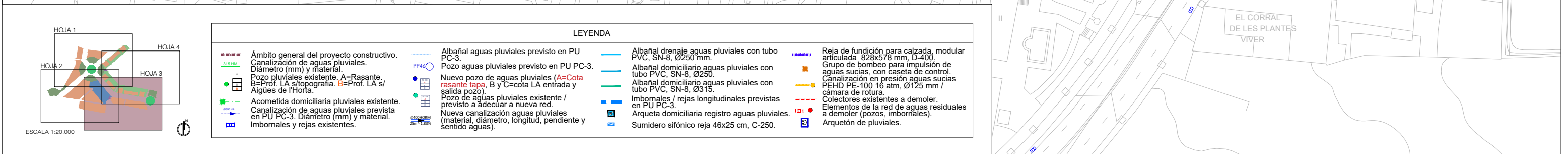
LEYENDA


 Ámbito general del proyecto constructivo.
 Canalización de aguas pluviales.
 Diámetro (mm) y material.
 Pozo pluviales existente. A= Rasante.
 B=Prof. LA s/topografía. B=Prof. LA s/
 Aigües de l'Horta.

 Acometida domiciliaria pluviales existente
 Canalización de aguas pluviales prevista
 en PU PC-3. Diámetro (mm) y material.
 Imbornales y rejillas existentes.

Albañal aguas pluviales previsto en PU PC-3.
 Pozo aguas pluviales previsto en PU PC-3
 Nuevo pozo de aguas pluviales (A=Cota rasante tapa, B y C=Cota LA entrada y salida pozo).
 Pozo de aguas pluviales existente / previsto a adecuar a nueva red.
 Nueva canalización aguas pluviales (material, diámetro, longitud, pendiente y sentido aguas).

- Albañal drenaje aguas pluviales con tubo PVC, SN-8, Ø250 mm.
- Albañal domiciliario aguas pluviales con tubo PVC, SN-8, Ø250.
- Albañal domiciliario aguas pluviales con tubo PVC, SN-8, Ø315.
- Imbornales / rejas longitudinales previstas en PU PC-3.
- Arqueta domiciliaria registro aguas pluviales
- Sumidero sifonico reja 46x25 cm, C-250.

-  Reja de fundición para calzada, modular articulada 828x578 mm, D-400.
-  Grupo de bombeo para impulsión de aguas sucias, con caseta de control.
-  Canalización en presión aguas sucias PEHD PE-100 16 atm, Ø125 mm / cámara de rotura.
-  Colectores existentes a demoler.
-  Elementos de la red de aguas residuales a demoler (pozos, imbornales).
-  Arquetón de pluviales.



JUSTIFICACIÓN CÁLCULOS RED DE DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES

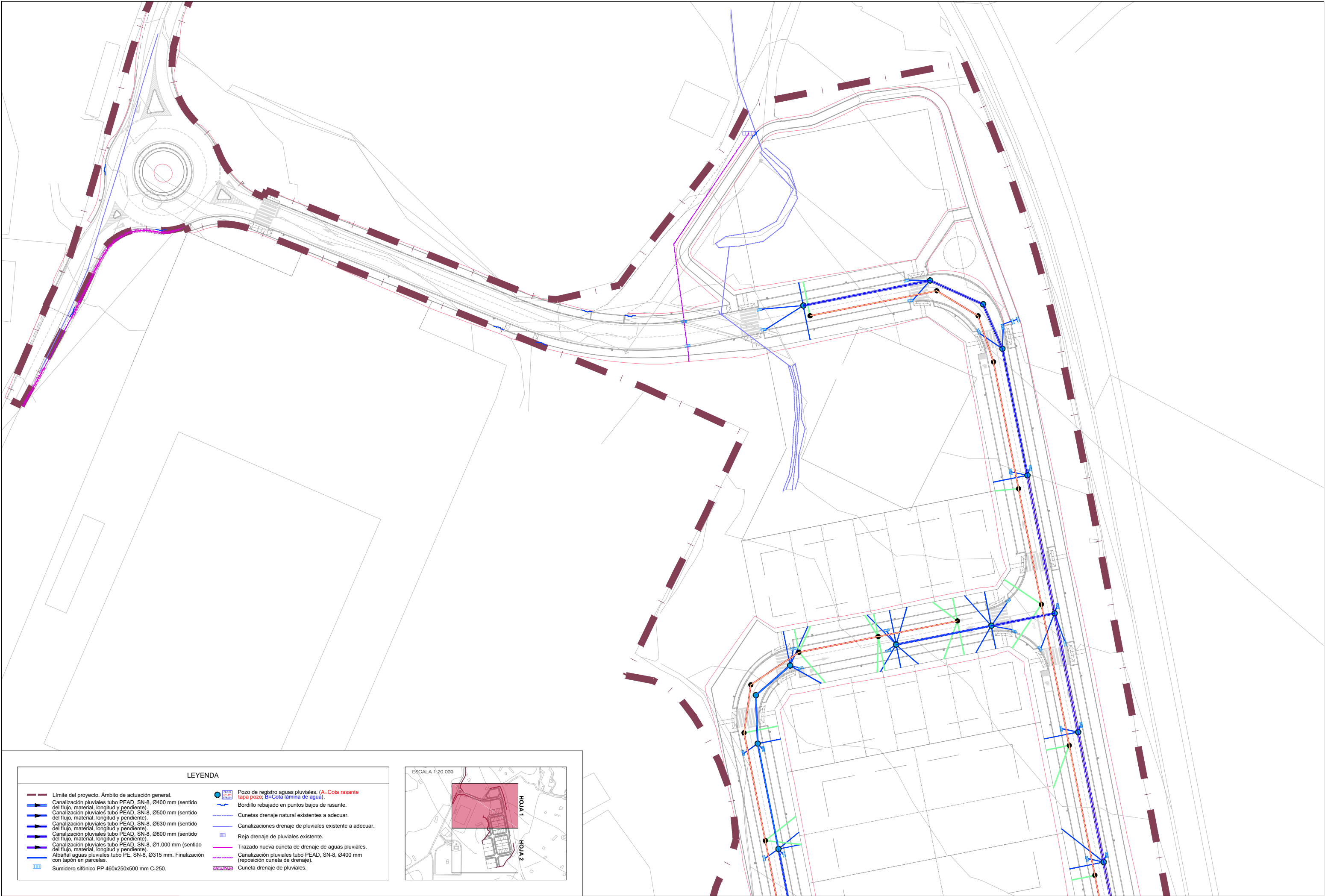
HIPÓTESIS DE CÁLCULO														
Período de retorno (T)		25 años		Coeficiente de escorrentía	Coef. Corrector	Pavimentos		Parcelas		Material: 1				
Intensidad media de precipitación (Máximas lluvias diarias en la España peninsular)	Intensidad media precipitación = Pd / 24		Id = 6.56			Umbral escorr. Po (mm)	1	Umbral escorrentía Po (mm)	8	Manning	PVC			
	Coordenadas		Pd total diaria T (mm)				Coeficiente escorrentía		0.9684			Coeficiente escorrentía		0.5587
	Coordenada X:		P media máxima (mm)			Externas (dotacional)		Zonas verdes		Material: 2				
	Coordenada Y:		Coeficiente variación Cv			Umbral escorr. Po (mm)	8	Umbral escorrentía Po (mm)	14	Manning	Hormigón			
	Huso:		Índice torrencialidad				Coeficiente escorrentía		0.5587			Coeficiente escorrentía		0.3632
										n= 0,011				
										n= 0,015				

LIMITACIONES DE VELOCIDAD		
Caudal	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)
QP	4,00	1,00

RESULTADOS OBTENIDOS CÁLCULO RED DE AGUAS PLUVIALES																																														
DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE TRAMOS																												CÁLCULOS HIDRÁULICOS				COMPROBACIONES														
TRAMO ANALIZADO				RASANTE DE LA CALLE				PARÁMETROS DE LA TUBERÍA						INT. PRECIPITACIÓN				SUPERFICIES VERTIENTES				CAUDAL AGUAS PLUVIALES (m³/s)				Q DISEÑO	CARACTERÍSTICAS TUBERÍA				VELOCIDAD				LÍNEA DE ENERGÍA											
Tramo	Nudos		Longitud parcial (m)	Longitud cauce ppal L (m)	Cota rasante		Desnive l (m)	Desnive l cauce ppal (m)	Pte. (%)	Recubrimiento		Cota clave		Desnive l (m)	Desnive l cauce ppal (m)	Pte. tramo (%)	Resaltos Interm. (m)	Pte. real (%)	Pte media cauce ppal Je	Tiempo concent. TC (h)	Int. lluvia l (mm/h)	Pavimentos (m²)		Parcelas (m²)		Externas (m²)		Zonas verdes (m²)		Paviment o	SUDS	Aporte externo	Zonas verdes	Caudal QP (m³/s)	Diámetro teórico (m)	Diámetro comercial (m)	Material utilizado	Cota lámina agua (m)		Ángulo sup. mojada Ø (rad)	Velocidad (m/s)	Cumple	Nudo inicial ni		Nudo final nf	
	Inicial-ni	Final-nf			ni	nf				ni	nf	ni	nf									ni	nf	ni	nf	ni	nf	ni	nf									ni	nf				ni	nf	ni	nf
VIALBA E	PL-01	PL-02	20,00	20,00	71,18	69,98	1,20	1,20	6,00%	1,00	1,00	70,184	68,98	1,20	1,20	6,00%	0,00	6,000%	0,06	0,03	459,18	170	170	836	836	0	0	0	0	0,0210	0,0596	0,0000	0,0000	0,0806	0,213	0,400	Hormigón	69,784	68,584	2,271	2,68	SI	70,55	SI	69,35	SI
	PL-02	PL-03	20,00	40,00	69,98	68,78	1,20	2,40	6,00%	1,00	1,00	68,98	67,78	1,20	2,40	6,00%	0,00	6,000%	0,06	0,04	365,62	138	308	969	1.805	0	0	0	0	0,0303	0,1026	0,0000	0,0000	0,1329	0,257	0,400	Hormigón	68,584	67,384	2,640	3,08	SI	69,47	SI	68,27	SI
	PL-03	PL-04	20,00	60,00	68,78	67,58	1,20	3,60	6,00%	1,00	1,00	67,78	66,58	1,20	3,60	6,00%	0,00	6,000%	0,06	0,06	318,18	217	525	975	2.780	0	0	0	0	0,0450	0,1076	0,0000	0,0000	0,1826	0,290	0,400	Hormigón	67,384	66,184	2,933	3,35	SI	68,36	SI	67,16	SI
	PL-04	PL-05	20,00	80,00	67,58	66,93	0,66	4,26	3,30%	1,00	1,00	66,58	65,93	0,66	4,26	3,30%	0,00	3,295%	0,05	0,08	284,51	206	731	1.678	4.458	0	0	0	0	0,0561	0,1974	0,0000	0,0000	0,2535	0,367	0,400	Hormigón	66,184	65,525	3,795	2,88	SI	67,01	SI	66,35	SI
	PL-05	PL-06	17,00	97,00	66,93	65,87	1,05	5,31	6,18%	1,00	1,00	65,93	64,87	1,05	5,31	6,18%	0,00	6,18%	0,05	0,09	266,15	286	1.017	621	5.079	0	0	0	0	0,0731	0,2105	0,0000	0,0000	0,2836	0,340	0,400	Hormigón	65,525	64,474	3,450	3,78	SI	66,65	SI	65,60	SI
	PL-06	PL-07	26,00	123,00	65,87	63,58	2,30	7,61	8,84%	1,50	0,75	64,37	62,83	1,55	6,86	5,96%	0,00	5,958%	0,06	0,11	244,48	0	1.017	0	5.079	0	0	0	0	0,0672	0,1935	0,0000	0,0000	0,2607	0,331	0,400	Hormigón	63,974	62,425	3,356	3,65	SI	65,05	SI	63,50	SI
	PL-07	PL-08	21,00	144,00	63,58	62,99	0,58	8,19	2,77%	0,75	0,75	62,83	62,24	0,58	7,44	2,77%	0,00	2,771%	0,05	0,12	228,98	101	1.118	0	5.079	0	0	0	0	0,0692	0,1814	0,0000	0,0000	0,2506	0,377	0,400	Hormigón	62,425	61,843	3,956	2,68	SI	63,19	SI	62,61	SI
2ºS	PL-08	PL-09	16,00	160,00	62,99	62,53	0,47	8,66	2,91%	0,75	0,75	62,24	61,78	0,47	7,91	2,91%	0,00	2,913%	0,05	0,13	219,20	0	1.118	0	5.079	0	0	1.577	1.577	0,0663	0,1738	0,0000	0,0351	0,2751	0,387	0,400	Hormigón	61,843	61,377	4,129	2,77	SI	62,63	SI	62,17	SI
PÁVILAS E	PL-067	PL-068	20,00	20,00	70,92	69,58	1,34	1,34	6,70%	1,00	1,00	69,920	68,58	1,34	1,34	6,70%	0,00	6,700%	0,07	0,03	463,25	241	241	0	0	500	500	0	0	0,0301	0,0000	0,0360	0,0000	0,0680	0,194	0,400	Hormigón	69,520	68,180	2,113	2,63	SI	70,27	SI	68,93	SI
	PL-068	PL-069	25,00	45,00	69,58	68,52	1,06	2,40	4,22%	1,00	1,00	68,58	67,52	1,06	2,40	4,22%	0,00	4,224%	0,05	0,05	347,75	326	567	497	497	0	500	0	0	0,0531	0,0269	0,0270	0,0000	0,1070	0,253	0,400	Hormigón	68,180	67,124	2,606	2,55	SI	68,91	SI	67,86	SI
	PL-069	PL-070	25,00	70,00	68,52	68,04	0,48	2,88	1,92%	1,00	1,00	67,52	67,04	0,48	2,88	1,92%	0,00	1,920%	0,04	0,07	291,55	301	868	600	1.097	0	500	0	0	0,0683	0,0498	0,0227	0,0000	0,1407	0,325	0,400	Hormigón	67,124	66,644	3,288	2,05	SI	67,74	SI	67,26	SI
	PL-070	PL-071	25,00	95,00	68,04	67,78	0,26	3,14	1,06%	1,00	1,00	67,04	66,78	0,26	3,14	1,06%	0,00	1,056%	0,03	0,10	256,17	306	1.174	600	1.697	0	500	0	0	0,0812	0,0677	0,0200	0,0000	0,1689	0,390	0,400	Hormigón	66,644	66,380	4,185	1,67	SI	67,19	SI	66,92	SI
	PL-071	PL-072	25,00	120,00	67,78	67,23	0,55	3,89	2,19%	1,00	1,00	66,78	66,23	0,55	3,69	2,19%	0,00	2,192%	0,03	0,12	233,50	297	1.471	600	2.297	0	500	0	0	0,0928	0,0836	0,0182	0,0000	0,1947	0,358	0,400	Hormigón	66,380	65,832	3,682	2,32	SI	67,05	SI	66,51	SI
	PL-072	PL-073	25,00	145,00	67,23	66,42	0,81	4,50	3,26%	1,00	1,00	66,23	65,42	0,81	4,50	3,26%	0,00	3,260%	0,03	0,13	217,75	312	1.783	600	2.897	0	500	0	0	0,1050	0,0985	0,0170	0,0000	0,2205	0,349	0,400	Hormigón	65,832	65,017	3,556	2,79	SI	66,63	SI	65,81	SI
	PL-073	PL-074	25,00	170,00	66,42	65,26	1,15	5,66	4,62%	1,00	1,00	65,42	64,26	1,15	5,66	4,62%	0,00	4,616%	0,03	0,15	206,36	279	2.062	600	3.497	0	500	0	0	0,1152	0,1127	0,0161	0,0000	0,2441	0,339	0,400	Hormigón	65,017	63,863	3,444	3,26	SI	65,96	SI	64,81	SI
PL-074	PL-075	22,00	192,00	65,26	63,94	1,32	6,98	6,00%	1,20	1,00	64,06	62,94	1,12	6,78	5,09%	0,00	5,091%	0,04	0,16	198,09	302	2.364	490	3.987	0	500	0	0	0,1269	0,1235	0,0155	0,0000	0,2658	0,344	0,400	Hormigón	63,663	62,543	3,499	3,45	SI	64,67	SI	63,55	SI	
PL-075	PL-076	22,00	214,00	63,94	62,91	1,03	8,01	4,68%	1,00	0,90	62,94	62,01	0,93	7,71	4,22%	0,00	4,223%	0,04	0,17	190,34	337	2.701	0	3.987	0	500	0	0	0,1394	0,1187	0,0149	0,0000	0,2730	0,360	0,400	Hormigón	62,543	61,614	3,700	3,23	SI	63,47	SI	62,54	SI	
PL-076	PL-078	20,00	234,00	62,91	62,53	0,39	8,39	1,94%	0,90	1,10	62,01	61,43	0,59	8,29	2,94%	0,00	2,935%	0,04	0,19	183,56	575	6.545	0	5.813	0	1.000	0	0	0,3260	0,1671	0,0287	0,0000	0,5218	0,491	0,500	Hormigón	61,514	60,927	4,252	3,24	SI	62,55	SI	61,96	SI	
PÁVILAS E	PL-077	PL-078	25,00	25,00	69,91	69,47	1,44	1,44	5,77%	1,00	1,00	69,911	68,47	1,44	1,44	5,77%	0,00	5,772%	0,06	0,03	425,91	232	232	0	0	500	500	0	0	0,0266	0,0000	0,0331	0,0000	0,0597	0,192	0,400	Hormigón	69,511	68,068	2,097	2,42	SI	70,21	SI	68,77	SI
	PL-078	PL-079	25,00	50,00	69,47	68,35	1,12	2,57	4,49%	1,00	1,00	68,47	67,35	1,12	2,57	4,49%	0,00	4,492%	0,05	0,05	334,36	360	592	0	0	500	0	0	0,0533	0,0000	0,0260	0,0000	0,0793	0,224	0,400	Hormigón	68,068	66,945	2,358	2,40	SI	68,76	SI	67,64	SI	
	PL-079	PL-080	25,00	75,00	68,35	67,90	0,45	3,02	1,80%	1,00	1,00	67,35	66,90	0,45	3,02	1,80%	0,00	1,796%	0,04	0,08	283,93	379	971	0	0	500	0	0	0,0744	0,0000	0,0221	0,0000	0,0965	0,286	0,400	Hormigón	66,945	66,496	2,898	1,82	SI	67,51	SI	67,06	SI	
	PL-080	PL-081	25,00	100,00	67,90	67,34	0,55	3,57	2,21%	1,00	1,00	66,90	66,34	0,55	3,57	2,21%	0,00	2,208%	0,04	0,10	253,17	361	1.332	327	327	0	500	0	0	0,0911	0,0129	0,0197	0,0000	0,1237	0,302	0,400	Hormigón	66,496	65,944	3,050	2,09	SI	67,12	SI	66,57	SI
	PL-081	PL-082	20,00	120,00	67,34	66,59	0,76	4,33	3,79%	1,00	1,00	66,34	65,59	0,76	4,33	3,79%	0,00	3,790%	0,04	0,11	226,98	382	1.714	333	660	0	500	0	0	0,1098	0,0244	0,0185	0,0000	0,1526	0,295	0,400	Hormigón	65,944	65,186	2,985	2,70	SI	66,71	SI	65,96	SI
	PL-082	PL-083	20,00	140,00	66,59	65,45	1,14	5,46	5,68%	1,00	1,00	65,59	64,45	1,14	5,46	5,68%	0,00	5,675%	0,04	0,12	225,41	329	2.043	203	863	0	500	0	0	0,1245	0,0304	0,0176	0,0000	0,1725	0,286	0,400	Hormigón	65,186	64,051	2,903	3,23	SI	66,12	SI	64,98	SI
	PL-083	PL-084	25,00	165,00	65,45	63,95	1,50	6,96	6,00%	1,00	1,00	64,45	62,95	1,50	6,96	6,00%	0,00	6,000%	0,04	0,14	213,46	289	2.332	310	1.173	0	500	0	0	0,1347	0,0391	0,0167	0,0000	0,1905	0,294	0,400	Hormigón	64,051	62,551	2,976	3,39	SI	65,04	SI	63,54	SI
PL-084	PL-085	21,00	186,00	63,95	62,97	0,98	7,95	4,69%	1,00	1,00	62,95	61,97	0,98	7,95	4,69%	0,00	4,690%	0,04	0,15	204,20	388	2.720	653	1.826	0	500	0	0	0,1504	0,0583	0,0160	0,0000	0,2246	0,328	0,400	Hormigón	62,551	61,566	3,316	3,22	SI	63,48	SI	62,49	SI	
PL-085	PL-076	50,00	191,00	62,97	62,91	0,05	8,00	1,04%	0,90	1,00	62,07	61,91	0,15	8,10	3,04%	0,00	3,040%	0,04	0,16	202,00	549	3.269	0	1.826	0	500	0	0	0,1789	0,0576	0,01															

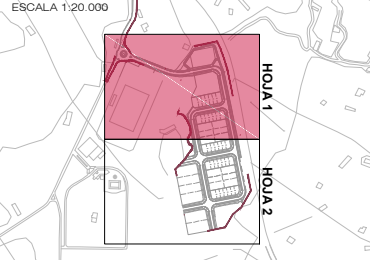
Red de drenaje del Sector industrial SUR-3 “Carrascales” de Candeleda (Ávila)

- DA-2_01: Caso de estudio Candeleda. Planos de planta de la red de pluviales del Sector industrial SUR-3 Carrascales.
- DA-2_02: Caso de estudio Candeleda. Modelo de cálculo del Sector industrial SUR-3 Carrascales.



LEYENDA

- | | | | |
|--|--|--|--|
| | Límite del proyecto. Ámbito de actuación general. | | Pozo de registro aguas pluviales. (A=Cota rasante tapa pozo; B=Cota lámina de agua). |
| | Canalización pluviales tubo PEAD, SN-8, Ø400 mm (sentido del flujo, material, longitud y pendiente). | | Bordillo rebajado en puntos bajos de rasante. |
| | Canalización pluviales tubo PEAD, SN-8, Ø500 mm (sentido del flujo, material, longitud y pendiente). | | Cunetas drenaje natural existentes a adecuar. |
| | Canalización pluviales tubo PEAD, SN-8, Ø630 mm (sentido del flujo, material, longitud y pendiente). | | Canalizaciones drenaje de pluviales existente a adecuar. |
| | Canalización pluviales tubo PEAD, SN-8, Ø800 mm (sentido del flujo, material, longitud y pendiente). | | Reja drenaje de pluviales existente. |
| | Canalización pluviales tubo PEAD, SN-8, Ø1.000 mm (sentido del flujo, material, longitud y pendiente). | | Trazado nueva cuneta de drenaje de aguas pluviales. |
| | Albañal aguas pluviales tubo PE, SN-8, Ø315 mm. Finalización con tapón en parcelas. | | Canalización pluviales tubo PEAD, SN-8, Ø400 mm (reposición cuneta de drenaje). |
| | Sumidero sifónico PP 460x250x500 mm C-250. | | Cuneta drenaje de pluviales. |



JUSTIFICACIÓN CÁLCULOS RED DE DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES

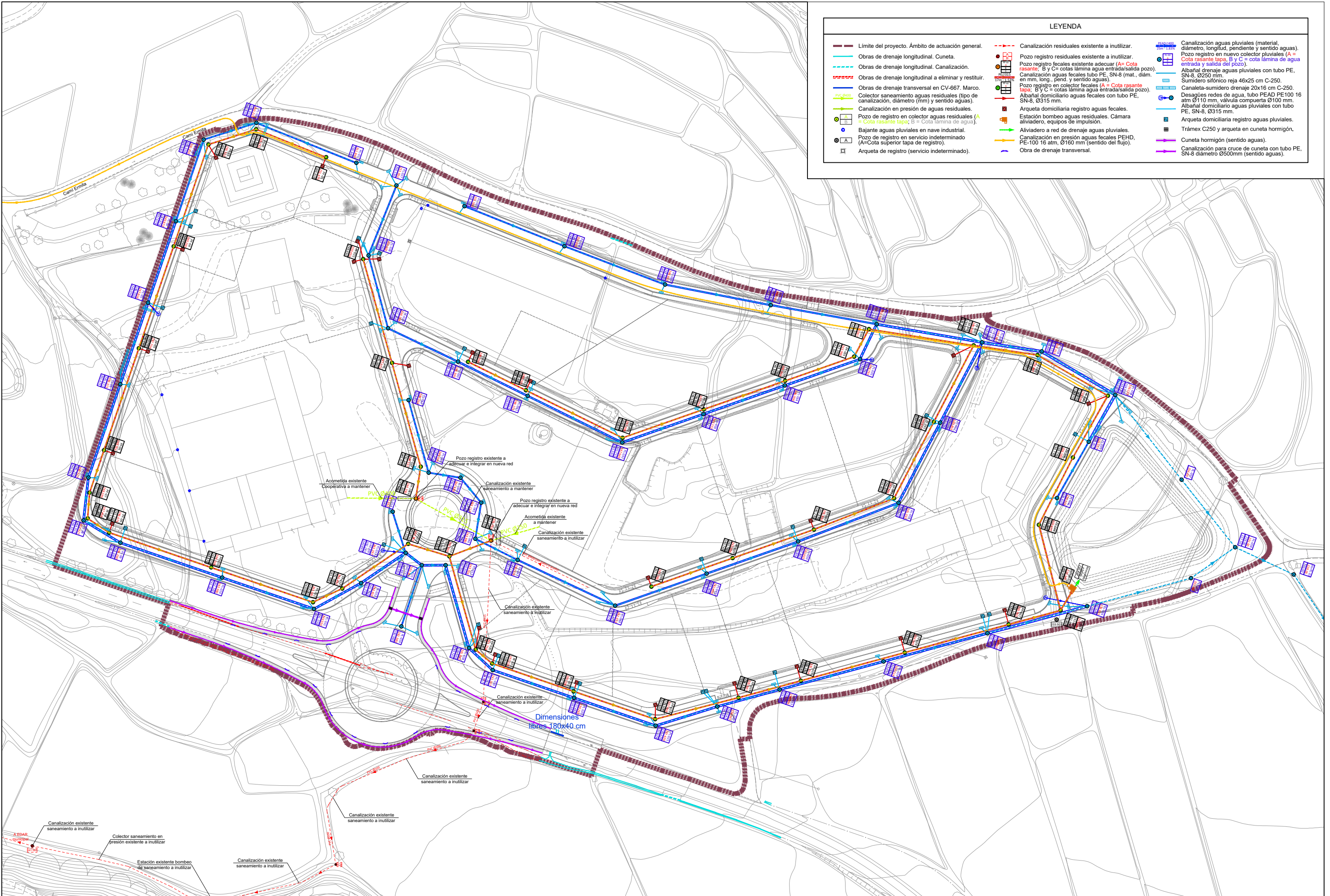
HIPÓTESIS DE CÁLCULO										
Período de retorno (T)		25 años		Coeficiente de escorrentía	Coef. Corrector	Pavimentos		Parcelas		Material: 1 Poliétileno Manning n= 0,011
Intensidad media de precipitación (Máximas lluvias diarias en la España peninsular)	Intensidad media precipitación = Pd / 24		Id = 6,86			Umbral escorr. Po (mm)	1	Umbral escorrentía Po (mm)	7	
	Coordenadas		Pd total diaria T (mm)			0,9954		Coeficiente escorrentía 0,8807		
	Coordenada X:		P media máxima (mm)							
	Coordenada Y:		Coeficiente variación Cv							
Huso:		Cuantil regional Yt		0,99		Umbral escorr. Po (mm)	24	Umbral escorrentía Po (mm)	23	Material: 2 Hormigón Manning n= 0,015
						Coeficiente escorrentía	0,5518	Coeficiente escorrentía	0,5665	

LIMITACIONES DE VELOCIDAD			
Caudal	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)	
QP	3,00	1,00	

DIÁMETRO INTERIOR (mm) APROXIMADO DE LOS TUBOS DE PVC	Ø400	347	Ø1000	968
	Ø500	433	Ø1100	1.068
	Ø630	535	Ø1200	1.164
	Ø800	768	Ø1300	1.272
	Ø900	868	Ø1400	1.368

Red de drenaje del Sector industrial 2 “El Tossalet” de Bèlgida (Valencia)

- DA-3_01: Caso de estudio Bèlgida. Planos de planta de la red de pluviales del Sector industrial 2 El Tossalet.
- DA-3_02: Caso de estudio Bèlgida. Modelo de cálculo del Sector industrial 2 El Tossalet.



LEYENDA			
	Límite del proyecto. Ámbito de actuación general.		Canalización residuales existente a inutilizar.
	Obras de drenaje longitudinal. Cuneta.		Pozo registro residuales existente a inutilizar.
	Obras de drenaje longitudinal. Canalización.		Pozo registro fecales existente adecuar (A= Cota rasante; B y C= cotas lámina agua entrada/salida pozo).
	Obras de drenaje longitudinal a eliminar y restituir.		Canalización aguas fecales tubo PE, SN-8 (mat., diám. en mm, long., pend. y sentido aguas).
	Obras de drenaje transversal en CV-667. Marco.		Pozo registro en colector fecales (A = Cota rasante tuber, B y C = cotas lámina agua entrada/salida pozo).
	Colector saneamiento aguas residuales (tipo de canalización, diámetro (mm) y sentido aguas).		Albanal domiciliario aguas fecales con tubo PE, SN-8, Ø315 mm.
	Canalización en presión de aguas residuales.		Arqueta domiciliaria registro aguas fecales.
	Pozo de registro en colector aguas residuales (A = Cota rasante tapa; B = Cota lámina de agua).		Estación bombeo aguas residuales. Cámara aliviadero, equipos de impulsión.
	Bajante aguas pluviales en nave industrial.		Aliviadero a red de drenaje aguas pluviales.
	Pozo de registro en servicio indeterminado (A=Cota superior tapa de registro).		Canalización en presión aguas fecales PEHD, PE-100 16 atm, Ø160 mm (sentido del flujo).
	Arqueta de registro (servicio indeterminado).		Obra de drenaje transversal.
			Canalización aguas pluviales (material, diámetro, longitud, pendiente y sentido aguas).
			Pozo registro en nuevo colector pluviales (A = Cota rasante tapa, B y C = cota lámina de agua entrada y salida del pozo).
			Albanal drenaje aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø250 mm.
			Sumidero sifónico rejilla 46x25 cm C-250.
			Canaleta-sumidero drenaje 20x16 cm C-250.
			Desagües redes de agua, tubo PEAD PE100 16 atm Ø110 mm, válvula compuerta Ø100 mm.
			Albanal domiciliario aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø315 mm.
			Arqueta domiciliaria registro aguas pluviales.
			Trámex C250 y arqueta en cuneta hormigón.
			Cuneta hormigón (sentido aguas).
			Canalización para cruce de cuneta con tubo PE, SN-8 diámetro Ø500mm (sentido aguas).



LEYENDA

Límite del proyecto. Ámbito de actuación general.

Obras de drenaje longitudinal. Cuneta.

Obras de drenaje longitudinal. Canalización.

Obras de drenaje longitudinal a eliminar y restituir.

Canalizaciones de drenaje longitudinal a eliminar.

Obras de drenaje transversal en CV-667. Marco.

Bajante aguas pluviales en nave industrial.

Pozo de registro en servicio indeterminado (A=Cota superior tapa de registro).

Arqueta de registro (servicio indeterminado).

Canalización aguas pluviales (material, diámetro en mm, longitud, pendiente y sentido aguas).

Pozo registro en nuevo colector pluviales (A = Cota rasante tapa, B y C = cota lámina de agua entrada y salida del pozo).

Albañal drenaje aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø250 mm.

Sumidero sifónico reja 46x25 cm C-250.

Canaleta-sumidero drenaje 20x16 cm C-250.

Desagües redes de agua, tubo PEAD PE100 16 atm Ø110 mm, válvula compuerta Ø100 mm.

Albañal domiciliario aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø315 mm.

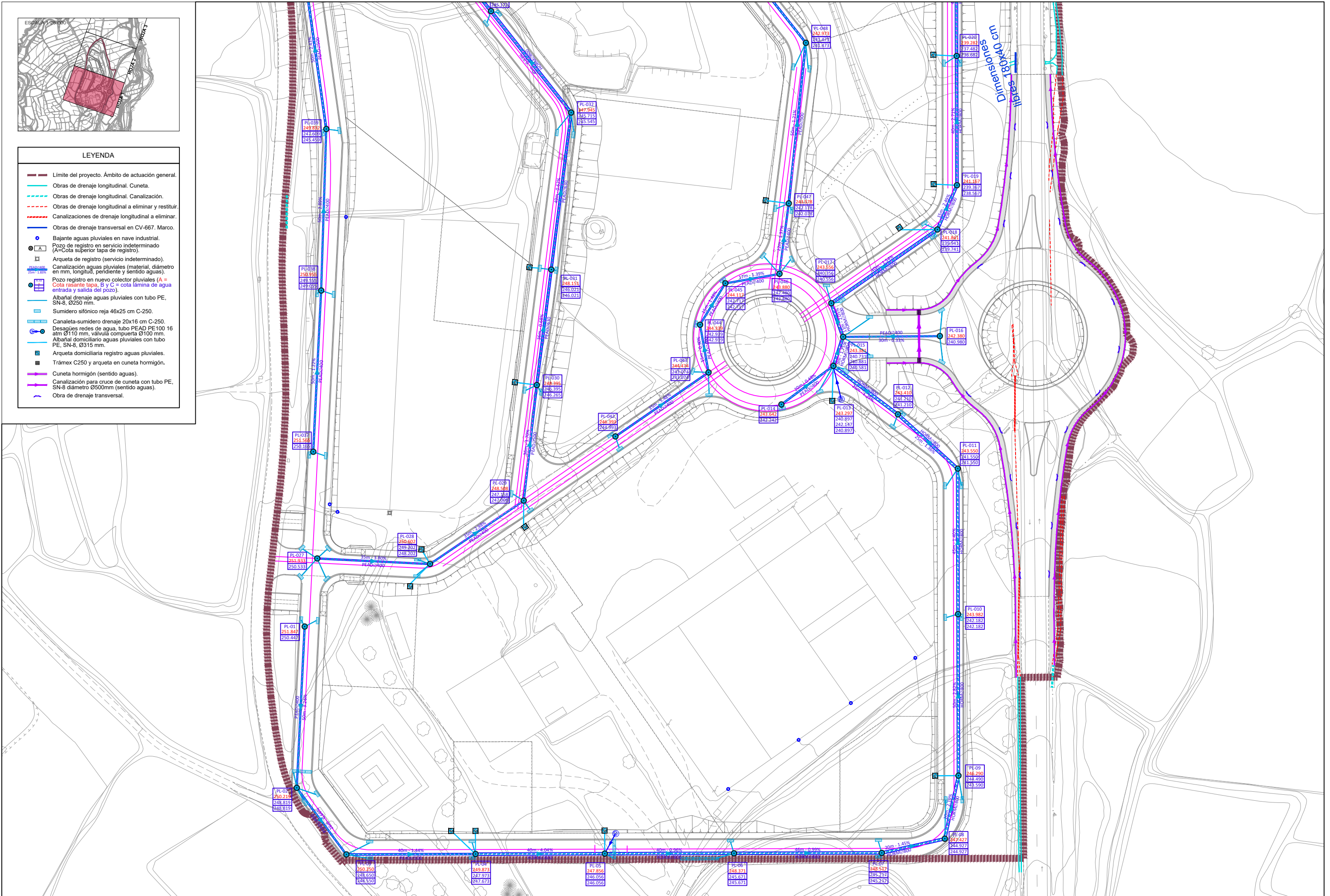
Arqueta domiciliaria registro aguas pluviales.

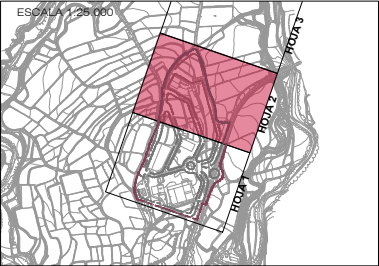
Trámex C250 y arqueta en cuneta hormigón.

Cuneta hormigón (sentido aguas).

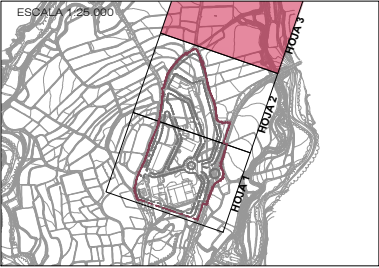
Canalización para cruce de cuneta con tubo PE, SN-8 diámetro Ø500mm (sentido aguas).

Obra de drenaje transversal.





LEYENDA	
	Límite del proyecto. Ámbito de actuación general.
	Obras de drenaje longitudinal. Cuneta.
	Obras de drenaje longitudinal. Canalización.
	Obras de drenaje longitudinal a eliminar y restituir.
	Canalizaciones de drenaje longitudinal a eliminar.
	Obras de drenaje transversal en CV-667. Marco.
	Bajante aguas pluviales en nave industrial.
	Pozo de registro en servicio indeterminado (A=Cota superior tapa de registro).
	Arqueta de registro (servicio indeterminado).
	Canalización aguas pluviales (material, diámetro en mm, longitud, pendiente y sentido aguas).
	Pozo registro en nuevo colector pluviales (A = Cota rasante tapa, B y C = cota lámina de agua entrada y salida del pozo).
	Albañal drenaje aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø250 mm.
	Sumidero sifónico reja 46x25 cm C-250.
	Canaleta-sumidero drenaje 20x16 cm C-250.
	Desagües redes de agua, tubo PEAD PE100 16 atm Ø110 mm, válvula compuerta Ø100 mm.
	Albañal domiciliario aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø115 mm.
	Arqueta domiciliaria registro aguas pluviales.
	Trámex C250 y arqueta en cuneta hormigón.
	Cuneta hormigón (sentido aguas).
	Canalización para cruce de cuneta con tubo PE, SN-8 diámetro Ø500mm (sentido aguas).
	Obra de drenaje transversal.



LEYENDA

Límite del proyecto. Ámbito de actuación general.

Obras de drenaje longitudinal. Cuneta.

Obras de drenaje longitudinal. Canalización.

Obras de drenaje longitudinal a eliminar y restituir.

Canalizaciones de drenaje longitudinal a eliminar.

Obras de drenaje transversal en CV-667. Marco.

Bajante aguas pluviales en nave industrial.

Pozo de registro en servicio indeterminado (A=Cota superior tapa de registro).

Arqueta de registro (servicio indeterminado).

Canalización aguas pluviales (material, diámetro en mm, longitud, pendiente y sentido aguas).

Pozo registro en nuevo colector pluviales (A = Cota rasante tapa, B y C = cota lámina de agua entrada y salida del pozo).

Albañal drenaje aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø250 mm.

Sumidero sifónico reja 46x25 cm C-250.

Canaleta-sumidero drenaje 20x16 cm C-250.

Desagües redes de agua, tubo PEAD PE100 16 atm Ø110 mm, válvula compuerta Ø100 mm.

Albañal domiciliario aguas pluviales con tubo PE, SN-8, Ø315 mm.

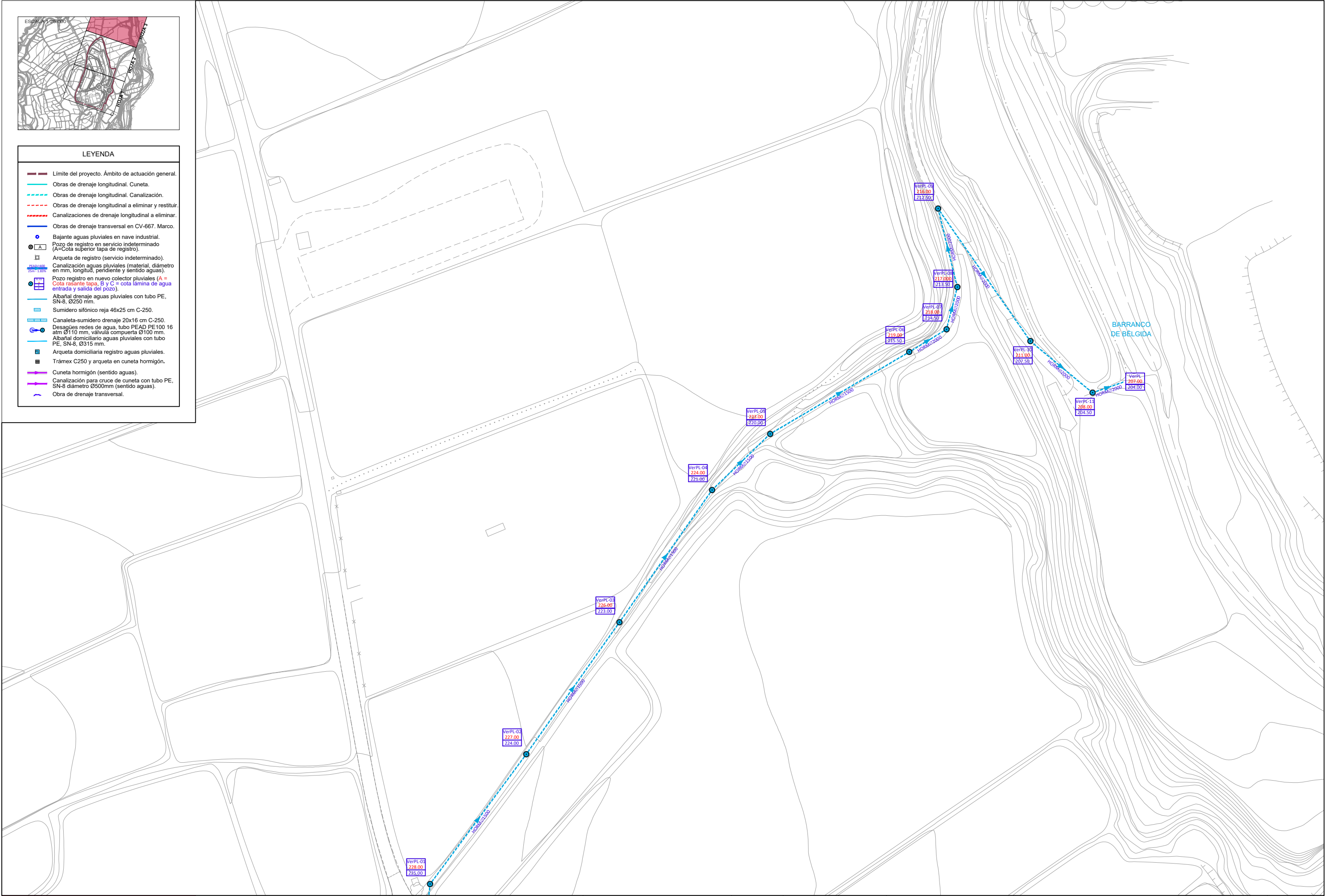
Arqueta domiciliaria registro aguas pluviales.

Trámex C250 y arqueta en cuneta hormigón.

Cuneta hormigón (sentido aguas).

Canalización para cruce de cuneta con tubo PE, SN-8 diámetro Ø500mm (sentido aguas).

Obra de drenaje transversal.



JUSTIFICACION CALCULOS RED DE DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES

HIPOTESIS DE CALCULO												
Periodo de retorno (T)		25 años		Id = 9,48		Pavimentos		Parcelas		Material: 1		
Intensidad media de precipitación (Máximas lluvias diarias en la España peninsular)	Intensidad media precipitación = Pd / 24				Coeficiente de escorrentía	Coef. Corrector	Umbral escorr. Po (mm)	1	Umbral escorrentía Po (mm)	5	Manning	Polietileno n= 0,011
	Coordenadas		Pd total diaria T (mm)	227			Coeficiente escorrentía	0,9902	Coeficiente escorrentía	0,8677		
	Coordenada X:		P media máxima (mm)	110		Cuecas externas		Zonas verdes		Manning	Material: 2	
	Coordenada Y:		Coeficiente variación Cv	0,51		2,069	Umbral escorr. Po (mm)	15	Umbral escorrentía Po (mm)			14
	Huso:		Cuántil regional Yt	2,068			Coeficiente escorrentía	0,5714	Coeficiente escorrentía			0,5949