UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN

AREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) UTILIZANDO RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

AUTOR: Ginés Moyano Collado

TUTOR: Luis Ángel Sañudo Fontaneda

JUNIO, 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expresar mi agradecimiento a la Cátedra de COGERSA de Economía Circular por la confianza puesta en mi para llevar a cabo esta investigación mediante la concesión de la convocatoria de prácticas extracurriculares para estudiantes a través de la Fundación Universitaria de Oviedo (FUO) para el estudio de RCD en SUDS con referencia CAT-005-18 en el curso 2020-2021, así como la ya depositada para la realización de otro estudio anterior sobre la aplicación de RCD en el diseño de gaviones en el curso 2019-2020.

Especial mención a mi tutor de Trabajo Final de Máster (TFM), el doctor Luis Ángel Sañudo Fontaneda por sus consejos y apoyo durante la realización del estudio, así como su ayuda y seguimiento durante mi trayectoria en la Escuela Politécnica de Mieres (EPM) desde los estudios en el Grado de Ingeniería Civil, hasta estos dos últimos años durante los estudios del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Gracias a COGERSA por facilitar datos sobre la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en sus instalaciones, información sobre las características de aquellos objeto de estudio en el presente documento y por permitir extraer muestras del vertedero para realizar los ensayos planteados. Del mismo modo, gracias a la empresa EXCADE SL por agilizar los trámites para la adquisición y transporte de los RCD estudiados desde el vertedero de residuos inertes hasta las instalaciones de la EPM en Mieres.

Por último, gracias a todas aquellas personas que me han ayudado con el trabajo y que me han acompañado durante esta aventura, familiares y amigos por su cariño y apoyo.

RESUMEN

Toda actividad llevada a cabo por el ser humano tiene como resultado la generación de residuos, siendo los más frecuentes aquellos que son sólidos. Todos se encuentran regulados por normativa, tanto general como específica, y son sometidos, en función de su naturaleza, a una gestión y tratamiento según sus características intentando seguir siempre la jerarquía de gestión (Prevenir, Reutilizar, Reciclar, Valorizar y Eliminar). En el presente estudio se centra la mirada en los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y su situación en Asturias, donde COGERSA es la empresa encargada de su gestión y tratamiento. Estos residuos son transportados a la planta RCD y allí se decide qué hacer con ellos, destinándose en el último año un 18% al vertedero de residuos inertes (VRI). Los vertederos cumplen la función de depósito y su capacidad es limitada a pesar de estar previstos para varios años, por lo que uno de los objetivos que se propone es reducir las acumulaciones de material en estos y lograr alargar su vida útil y evitar inversiones en remodelaciones. Como solución a esta problemática, se propone el diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) con RCD en aquellas capas granulares que permiten la infiltración del agua de lluvia en las ciudades. Estos sistemas pretenden simular el ciclo hidráulico natural y evitar así grandes escorrentías superficiales, mejorar la calidad del agua y lograr un servicio capaz de soportar los eventos de lluvia que se producen. Por lo tanto, lo que se va a conseguir es un producto doblemente comprometido con el medio ambiente y que además fomenta la economía circular al reincorporar en el mercado aquellos materiales que llegan a la planta en forma de RCD. Para justificar si es competente con un material estándar empleado en España destinado como capa drenante, en este caso zahorra drenante ZAD 0/20 según el PG-3, se realizan ensayos en el laboratorio que permitan conocer el comportamiento hidráulico de dichos materiales funcionando como capa de sub-base en firmes permeables y como relleno en drenes filtrantes, enfocando el estudio en estos sistemas al ser los más utilizados y que además pueden funcionar en conjunto. Los ensayos consisten en la medición de tasas de infiltración de secciones compuestas por grava (CONTROL), RCD de origen hormigón (RCDH) y RCD de origen mixto (RCDM), ante un evento de lluvia generada con un simulador de lluvia diseñado y calibrado en el laboratorio, que proporciona un caudal en función de la intensidad y área estudiada de las secciones durante un tiempo establecido. Se configuran 3 muestras para cada material y se obtienen unos valores medios que sean representativos de los ensayos. Como resultado de las discusiones, se consigue conocer el tiempo mínimo que necesita cada material para comenzar a producir flujo de salida, tiempo para alcanzar el caudal pico, tiempo que tarda en dejar de proporcionar caudal tras el fin de la lluvia y el volumen total proporcionado. Se cumple el objetivo de caracterizar a nivel hidrológico los RCD estudiados, comparándolos con un material estándar, y justificando su aplicación como parte de la estructura de estos sistemas de drenaje. Además, se recopila información acerca de las granulometrías de los materiales para conocer su compatibilidad con los SUDS, el aprovechamiento que tiene el material y las modificaciones que fuesen necesarias. La posibilidad de estudiar este comportamiento en otros SUDS, así como la realización de ensayos con otras características o para el conocimiento de otros parámetros, se plantean como líneas de investigación futuras.

ABSTRACT

When humans carry on activities, they produce waste, being solids the most frequents. All of them are regulated and controlled under general and particular normative which indicate the kind of management and treatment they should receive. Nevertheless, it is pretended to follow the Waste Management Hierarchy (Reduce, Reus, Recycle, Energy Recovery and Disposal). This studio is focused on the Construction and Demolition Waste (CDW) and the situation in Asturias, where COGERSA is the responsible of CDW management and treatment. This waste is transported to the CDW plant to decide what to do with them. Last year, 18% of CDW was deposited on inert waste landfill (IWL). Landfills are created to storage waste, but their capacity is limited. As consequence, one objective is focused to reduce the waste stored to extend their life and prevent inversions to increment the capacity. The solution proposed is to design Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) with CDW as granular layer to let the water infiltration in cities. These systems pretend to simulate the natural hydraulic cycle, prevent the generation of runoff, improve the water quality, and offer a service that support the rain events. This solution has as result a product with double compromised with environment and foment circular economy. To justify if CDW is competent with standard material in Spain as drainage layer (ZAD 0/20), it was tested on laboratory to know the hydraulic behaviour as sub-base into permeable pavements and as filler into filter drains. These are the most utilized drainage systems, and they can work connected. The tests consisted of measuring the infiltration tases from different sections composed by gravel (CONTROL), CDW from concrete (RCDH) and mixed CDW (RCDM) against rain events generated with a simulator. This one was designed and calibrated on laboratory to get the flow required from intensity and area studied during a period of time. From the 3 samples created for each material, average values were gotten as representatives. As a result from the tests, the minimum period to get flow, get higher flow, stop getting flow and total volume of water provided are known for each material. Consequently, the main purpose of this research has been achieved, characterizing CDW hydrologically and demonstrating that they can be used to design SUDS. Moreover, information about material granulometry is collected to know the compatibility with SUDS, the amount of material can be used and the modifications they need. The possibility to research this behaviour into other SUDS, doing test with other characteristics or knowing other parameters are exposed as future research lines.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 7
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO 7
1.2 MARCO DEL TRABAJO 8
1.2.1 Cátedra de COGERSA 8
1.2.2 Medio ambiente 8
1.2.3 Impacto ambiental 9
1.2.4 Desarrollo sostenible 9
1.2.5 Ingeniería ambiental 10
1.2.6 Economía circular 10
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO 11
2 RESIDUOS 12
2.1 NORMATIVA 12
2.2 CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS 13
2.3 GESTIÓN DE RESIDUOS 13
2.4 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) 14
2.4.1 Regulación jurídica de los RCD 15
2.4.2 Clasificación de los RCD 15
2.4.3 Situación de los RCD en Asturias 16
2.4.3.1 COGERSA 16
2.4.3.2 Gestión de RCD 17
3 DRENAJE URBANO 21
3.1 DRENAJE URBANO CONVENCIONAL 21
3.1.1 Agua de lluvia en las ciudades 21
3.1.1.1 Problemas asociados a los sistemas de drenaje convencional 22
3.1.1.1.1 Inundaciones 22
3.1.1.1.2 Contaminación difusa 23
3.1.1.1.3 Falta de servicio 24
3.1.1.2 Causas 25
3.1.1.2.1 Impermeabilización del suelo 25
3.1.1.2.2 Carencias del sistema de drenaje 26
3.1.1.2.3 Cambio climático 26
3.1.1.2.4 Falta de sensibilidad social 26
3.1.1.3 Soluciones 26
3.2 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) 27
3.2.1 Drenaje sostenible 27

3.2.2 Corrientes de pensamiento ... 28
3.2.3 Filosofía de los SUDS ... 28
3.2.4 Normativa relacionada ... 29
3.2.5 Tipologías de SUDS ... 30
3.2.5.1 Sistemas de infiltración ... 30
3.2.5.1.1 Cubiertas verdes ... 30
3.2.5.1.2 Firmes permeables ... 31
3.2.5.1.3 Pozos y zanjas de infiltración ... 31
3.2.5.1.4 Depósitos de infiltración ... 32
3.2.5.2 Sistemas de captación y transporte ... 32
3.2.5.2.1 Drenes filtrantes ... 32
3.2.5.2.2 Cunetas verdes ... 33
3.2.5.2.3 Franjas filtrantes ... 33
3.2.5.3 Sistemas de tratamiento pasivo ... 34
3.2.5.3.1 Depósitos de detención ... 34
3.2.5.3.2 Estanques de retención ... 34
3.2.5.3.3 Humedales artificiales ... 34
3.2.6 Áridos empleados en SUDS ... 35
4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL ... 37
4.1 JUSTIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS SUDS OBJETO DE ESTUDIO ... 37
4.1.1 Firmes permeables ... 37
4.1.2 Drenes filtrantes ... 38
4.2 SIMULADOR DE LLUVIA ... 38
4.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS ... 40
4.4 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO ... 42
4.4.1 Condiciones y etapas del ensayo ... 42
4.4.2 Características de los materiales ensayados ... 44
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN ... 45
5.1 SECCIÓN CONTROL ... 45
5.2 SECCIÓN RCDH ... 46
5.3 SECCIÓN RCDM ... 48
5.4 COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS DE LAS SECCIONES ... 49
6 CONCLUSIONES ... 51
7 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ... 52
8 REFERENCIAS ... 53

1 INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La mayoría de las actividades que desarrolla el ser humano en su día a día tienen como resultado la generación de sustancias o productos que debe desechar. Estos se conocen comúnmente como residuos, y deben de ser gestionados correctamente en función de sus características, para lograr que el impacto medioambiental sea mínimo o nulo. Para ello, los organismos competentes cuentan con una clasificación detallada y asequible sobre los residuos que se producen [1].

Aquí, en el Principado de Asturias, es COGERSA quien se encarga de la gestión de todos los residuos sólidos que se generan. Durante muchos años, no se le ha dado importancia al destino final de estos productos, siguiendo un ciclo de vida lineal y depositándolos en su mayoría en vertederos. Por eso, el futuro de este consorcio pasa por abordar el agotamiento de la capacidad del vertedero central de Asturias para recibir residuos.

De entre todos los residuos existentes, para este estudio son de interés los Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Estos tienen bajo riesgo para la salud humana y ambiental en relación con los residuos sólidos urbanos, considerándose en su mayoría inertes. La principal problemática que poseen en cuanto a gestión es el gran volumen y costos de transporte que suponen . Todos estos son transportados y tratados en COGERSA, donde se cuenta con una planta de RCD, pero que también supone rechazos que son depositados principalmente en el vertedero de inertes, contribuyendo así con el agotamiento de su capacidad.

En el sector de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AIC), se debe de implantar una construcción sostenible, es decir, que sea respetuosa con el medio ambiente mediante el uso eficiente de energía, agua, recursos y materiales [2]. Entre los distintos principios que sigue este tipo de construcción, se encuentra el uso de materiales sostenibles y el uso racional de los recursos que se tienen. Por lo tanto, con el objetivo de reducir el volumen de RCD acumulados en vertedero y el uso de nuevos materiales, se puede estudiar la posibilidad de reutilizar residuos generados en ciertas obras, cumpliendo los mismos requisitos que la técnica tradicional. Se consigue por lo tanto introducir un material nuevamente en el mercado y fomentar una economía circular.

Por otra parte, a lo largo de los años, el ser humano ha tenido una gran influencia sobre el medio ambiente modificando su aspecto y adaptándolo a sus necesidades para lograr un lugar de confort en el cuál vivir cómodamente. Sin embargo, con el paso del tiempo surge un aumento de preocupación respecto al deterioro ambiental, buscando soluciones para poder realizar actuaciones en las que se coordine la naturaleza y la forma de vida de las personas. Surge así el término de urbanismo sostenible o desarrollo urbano sostenible.

Un factor importante en las ciudades es la gestión del agua de lluvia. Con el crecimiento de estas, el ciclo hidrológico natural se ve afectado por la impermeabilización, suprimiendo la fase de infiltración y generando por lo tanto grandes volúmenes de escorrentía superficial [3–9]. Esta situación genera la necesidad de colectores mucho mayores y una saturación en las depuradoras, que se ocuparán del tratamiento de un agua que inicialmente estaba limpia. Como solución, se empiezan a desarrollar nuevas técnicas conocidas como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que pretenden simular el comportamiento del terreno natural para reducir el volumen de escorrentía, así como los contaminantes que puede arrastrar. Pueden ser técnicas constructivas o no constructivas, pero en este documento se hace hincapié en las primeras que, en su mayoría, requieren la presencia de material granular para permitir que el agua pluvial se infiltre y no se produzca la escorrentía superficial.

Dicho esto, es de interés tratar en conjunto las dos problemáticas ambientales comentadas en el presente documento. Por lo tanto, lo que se propone es un estudio sobre la posibilidad de emplear los RCD generados como material granular en los SUDS, con el objetivo de perseguir un elemento sostenible y que favorezca la economía circula. De esta manera se actúa simultáneamente sobre dos factores ambientales que han aumentado la preocupación del ser humano.

1.2 MARCO DEL TRABAJO

1.2.1 Cátedra de COGERSA

Debido a la necesidad de expandir la concienciación sobre el cuidado del medio ambiente para llegar a los mayores puntos posibles, se crea la Cátedra de COGERSA de Economía Circular. Surge en 2018 tras la firma de un convenio entre la Universidad de Oviedo y COGERSA. Estará gestionada desde el Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente localizado en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI-Gijón).

Los principales objetivos que se plantea son:

- Sensibilización y formación en el ámbito de los residuos, fomentando el análisis y debate sobre temas relacionados con la gestión de residuos en el ámbito de la Economía Circular.
- Fomento de la I+D orientada a la prevención y gestión de residuos haca la Economía Circular.

El primer punto al que se aplican medidas y donde se quiere aumentar la concienciación es en la propia Universidad de Oviedo. Se controla la huella de carbono, los puntos de recogida de residuos y la gestión de estos.

Como bien se indica en uno de los principios, se pretende implantar una formación en el ámbito de los residuos. Por ello, se acude a los estudiantes de la Universidad para darles la oportunidad de trabajar en ello, aprovechando así los conocimientos que estos tienen y adquiriendo experiencia. En este caso, se presenta este proyecto al tener el perfil de estudiante del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (ICCP) en la Escuela Politécnica de Mieres (EPM). La formación que se recibe es bastante completa para el tema que se quiere tratar gracias a los conocimientos adquiridos en cuanto a gestión y tratamiento de residuos, así como aspectos relacionados con el sector de la ingeniería y la construcción que refuerzan el estudio de una posible aplicación de los residuos en nuevas técnicas para el drenaje de agua de lluvia en las ciudades.

1.2.2 Medio ambiente

El medio ambiente se entiende como un sistema global constituido por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por acción humana o natural, que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus manifestaciones [1].

Está claro que la actividad productiva es uno de los pilares del desarrollo económico. El problema está en la generación de residuos que conlleva y los recursos naturales consumidos. Con estas acciones, el ser humano ha ido deteriorando el medio ambiente, sin darle importancia a la sostenibilidad, modificando su entorno desde los inicios [11]. Tal ha sido el alcance, que se le ha comenzado a dar más peso al estudio ambiental a la hora de diseñar procesos y tomar decisiones, pues las empresas se han motivado de manera interna por ser responsables con la ecología pero sin perder la relación con la sociedad ni restarle importancia al problema a solucionar [11,12].

1.2.3 Impacto ambiental

No cabe duda del impacto que tiene el humano desde el momento que interactúa con el medio ambiente y que aumenta con la producción de productos dando lugar a modificaciones en el ecosistema [12].

Cuando se habla de impacto ambiental, se hace referencia a la calidad del medio ambiente producida por la actividad humana. Este será por lo tanto un tema muy subjetivo y se deben de realizar unos estudios previos que determinen si se ha producido o no, en función de la zona estudiada.

***Figura 1**.Residuos acumulados (Fuente: elcomercio.es)*

Con todas las acciones sobre el medio ambiente realizadas por los humanos, no se es consciente de la gran fuente de recursos que se está perdiendo y el sumidero de residuos que se genera [13], aunque la magnitud de ambas características dependerá del contexto socio-económico del lugar.

1.2.4 Desarrollo sostenible

Uno de los pilares fundamentales para dirigirnos hacia un mundo mejor, es seguir un desarrollo sostenible. Este concepto está muy presente hoy en día, y consiste en poder disfrutar de los recursos que poseemos, pero de una manera conservadora, permitiendo que las generaciones futuras también puedan disfrutarlos.

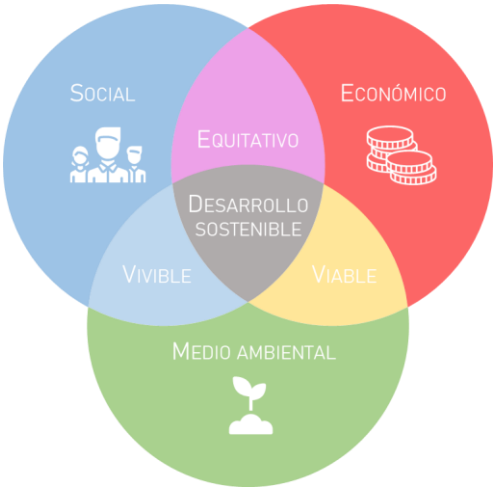


***Figura 2**. Representación de desarrollo sostenible*

El término desarrollo sostenible, sustentable o perdurable surge en 1987 en el documento Nuestro Futuro Común, conocido como informe Brundtland, fruto de los trabajos de la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas. En la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Cumbre de la

Tierra, 1992) se emplea este concepto en el tercer principio, que indica que el derecho al desarrollo debe responder equitativamente a las necesidades ambientales y de desarrollo de las generaciones presentes y futuras [6,7].

Como consecuencia de dicho desarrollo y del cambio de mentalidad por parte de la sociedad, se producen cambios en el entorno social, político, económico y empresarial. La aparición de nuevas preocupaciones y leyes da lugar a nuevos obstáculos en el desarrollo de procesos productivos en muchas organizaciones [14].

1.2.5 Ingeniería ambiental

La sobrepoblación, el cambio climático y la contaminación del medio ambiente en exceso son problemas que se deben de corregir para que el modo de vida de las personas sea perdurable y sostenible a largo plazo. Debido a ello, la sociedad se conciencia cada vez más y demanda soluciones al respecto [15].

En el sector de la Ingeniería surge la necesidad de adaptarse a este nuevo movimiento o pensamiento social y no mantenerse al margen. Tiene lugar entonces la aparición de una rama de la ingeniería que aporta sus conocimientos para poder ayudar a conservar la naturaleza en la medida de lo posible. Esto es lo que se conoce como ingeniería ambiental, que es el área encargada de controlar y reducir el impacto ambiental de la actividad humana a través del diseño y aplicación de medidas tecnológicas y de gestión [11].

Este concepto afecta también a la toma de decisiones en diseño y ejecución de las obras ejecutadas en el sector de la Ingeniería Civil. El coste medioambiental se ha vuelto un factor limitante, suceso que anteriormente no ocurría pues no se le prestaba casi atención. Este cambio de pensamiento da lugar al desarrollo de nuevas soluciones que pueden permitir mejorar las condiciones ambientales o integrar aspectos naturales en el entorno urbano.

1.2.6 Economía circular

En los últimos años se ha iniciado una transición de economía lineal a economía circular y eficiente en el uso de residuos y recursos [16]. Este modelo, permitirá reducir la dependencia de materias primas y energía, al tener dicha función esos residuos y recursos que se han generado.

Por lo tanto, se entenderá como economía circular al modelo productivo que permite un negocio sostenible, en el que los bienes se diseñan para que se puedan usar más tiempo, reutilizados, desmontados, remanufacturados o reciclados con el fin de evitar la extracción de nuevos recursos [17].

Para que la economía circular se considere como tal y sea efectiva, se basa en los siguientes pilares [18].

- La eco-concepción. Considera los impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción
- La ecología industrial y territorial. Establecimiento de un modo de organización industrial en un mismo territorio caracterizado por una gestión optimizada de los *stocks* y de los flujos de materiales, energía y servicios.
- La economía de la "funcionalidad". Privilegiar el uso frente a la posesión, la venta de un servicio frente a un bien
- El segundo uso. Reintroducir en el circuito económico aquellos productos que ya no se corresponden a las necesidades iniciales de los consumidores.
- La reutilización. Reutilizar ciertos residuos o partes de estos, que todavía pueden funcionar para la elaboración de nuevos productos.
- La reparación. Encontrar una segunda vida a los productos estropeados.
- El reciclaje. Aprovechar los materiales que se encuentran en los residuos.
- La valorización. Aprovechar energéticamente los residuos que no se pueden reciclar.

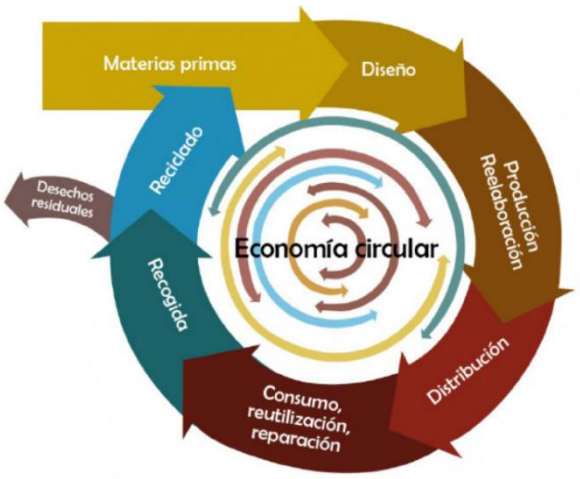


***Figura 3**. Representación de la economía circular* [16]

Dichos pilares, pueden agruparse dentro de los principios de la economía circular. Estos son [16]:

- Preservar y mejorar el capital natural, controlando los stocks y equilibrando los flujos de recursos renovables
- Optimizar el rendimiento de los recursos, mediante la circulación de los productos, componentes y materiales en uso, a su máxima utilidad en todo momento en ambos ciclos, técnico y biológico.
- Fomentar la eficiencia del sistema mediante la revelación y el descarte de las externalidades negativas

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo que se persigue en el presente estudio es reincorporar en el mercado aquellos residuos que son rechazo en las plantas de tratamiento de RCD y que se depositan en vertedero en COGERSA, empresa encargada de su gestión y tratamiento en Asturias, logrando así fomentar la economía circular al suponer un ahorro de materia prima y reducción de acumulaciones de residuos.

La solución que se pretende estudiar es el diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) utilizando Residuos de Construcción y Demolición (RCD), profundizando en su aplicación como tratamiento de agua de lluvia en las ciudades, para mitigar sus problemas y sustituir a los sistemas convencionales que hoy en día existen. Los RCD se sitúan en la estructura granular, por lo que se analizará qué técnicas requieren de dicha capa y las características de estas.

Una vez determinados los sistemas objeto de estudio, se realizan ensayos de laboratorio en los que se configuran secciones para cada material y se simula una intensidad de lluvia que permita estudiar el comportamiento hidráulico de cada muestra y compararlo a una sección CONTROL que contiene un material estándar empleado en España.

Por lo tanto, el fin que se tiene al realizar este estudio es hacer un repaso en el ámbito de la gestión de residuos, concretamente en los RCD, y en el ámbito del drenaje urbano profundizando en las técnicas SUDS, empleando esta información para determinar si los materiales reciclados estudiados son competentes con los comúnmente empleados y por lo tanto pueden ser utilizados en SUDS, logrando así un elemento sostenible gracias a la reutilización de material y a las características aportadas por estas técnicas de drenaje que abogan por la sostenibilidad y la mejora de la gestión de agua de lluvia en las ciudades. Con esta idea, también se pretende que el presente documento pueda servir como base para futuros estudios relacionados con la temática y ampliar el conocimiento de las personas en busca de construcciones más sostenibles.

2 RESIDUOS

Según la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados vigente en España [19] se entenderá como residuo a "*cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar"*. Un producto se convertirá en residuo en función del espacio y del tiempo, pudiendo incluso darse el caso inverso. Por eso se dice que la condición de residuo no es inamovible [10]. La generación de residuos y su gestión serán de los grandes problemas medioambientales de las sociedades, principalmente las más industrializadas. A mayor nivel adquisitivo, mayor cantidad de residuos se originan.

2.1 NORMATIVA

El Marco Legislativo de residuos en la UE es:

- Directiva 1996/61 "Prevención y Control integrados de la Contaminación –IPPC".
- Directiva 1999/31 "Vertido de Residuos".
- Decisión de la Comisión 2000/532/CE, que establece una lista de residuos de conformidad con la Directiva 75/442/CEE, y sus modificaciones, efectuadas mediante la decisión de la comisión 2001/119/CE.
- Decisión 738/2000 "Aplicación de la Directiva 1999/31"
- Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y el anexo II de la Directiva 1999/31/CE.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 19 de Noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas
- Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre residuos
- Directiva 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos

El Marco Legislativo general aplicado en España es:

- Orden APM/1007/2017, de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para su utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquéllas en las que se generaron. Inerte adecuado.
- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.
- Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos
- Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.
- Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- La Decisión de la Comisión, de 22 de enero de 2001, que modifica la Decisión 2000/532/CE de 3 de mayo de 2000.
- Plan Estatal de Inspección en materia de Traslados Transfronterizos de Residuos 2021-2026 (PEITTR)

2.2 CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS

No hay una manera fija de clasificar los residuos. Una clasificación que no entra mucho en detalle es según el estado físico del residuo:

- Líquido
- Sólido
- Pastoso
- Gaseoso

La clasificación más estricta es según su peligrosidad, determinados en el RD 646/2020 [20]:

- Peligrosos. Son aquellos que requieren un tratamiento específico debido a que posee características tóxicas o peligrosas. Se les debe de realizar un control periódico de sus efectos.
- Inertes. No experimentan transformaciones significativas una vez se depositan en el vertedero, cumpliendo además los criterios de lixiviación.
- No peligrosos. No forman parte de ninguno de los otros grupos, y no se incluyen en la definición del artículo 3 de la Ley 22/2011.

Otra posibilidad es realizar la clasificación según la Ley 22/2011 [19]:

- Domésticos. Generados en hogares e industrias y servicios
- Comerciales. Generados por la actividad propia del comercio al por mayor y menor, restaurantes y otros sectores de servicios.
- Aceites usados. Aceites minerales o sintéticos, industriales o de lubricación, que hayan dejado de ser aptos para el uso originalmente previsto, así como los aceites de motores de combustión, aceites de cajas de cambios, aceites lubricantes, aceites para turbinas y aceites hidráulicos.
- Biorresiduos. Es biodegradables. Son alimentos, residuos de jardines y residuos comparables procedentes de plantas de procesado de alimentos.
- Industriales. Resultan de procesos de fabricación, de transformación, de limpieza…
- Residuos peligrosos. Presentan características peligrosas enumeradas en el anexo III, así como los recipientes que lo hayan contenido.

Otra clasificación más amplia y genérica, es según su origen:

- Urbanos
- Industriales
- Hospitalarios
- De construcción o demolición
- Agropecuarios
- Lodos de depuradora
- Residuos radiactivos
- Residuos mineros
- Residuos procedentes de la obtención de energía

Por último, existe la Lista Europea de Residuos (LER) donde se realiza una clasificación exhaustiva de los residuos dividiéndolos en 20 grupos compuestos por subgrupos [21].

2.3 GESTIÓN DE RESIDUOS

Para gestionar un residuo se debe de diseñar una estrategia de gestión. Esto consiste en controlar su generación, almacenaje, recogida, transferencia y transporte, tratamiento y evacuación de los residuos [10].

Para facilitar dicha tarea, se crea lo que se conoce como jerarquía de la gestión de los residuos que permite priorizar las actuaciones según los criterios ambientales [19].

***Figura 4**. Pirámide invertida que representa la jerarquía de gestión de residuos.*

Estas actuaciones consisten en [19]:

- Prevención. Medidas adoptadas antes de que la sustancia se convierta en residuo. Se quiere reducir la cantidad de residuos e impactos adversos, y disminuir el contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.

- Reutilización. Operación para utilizar de nuevo los productos componentes que no sean residuos, de manera que se empleen con la misma finalidad.

- Reciclado. Operación por la que los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, con cualquier finalidad distinta a la original. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en combustible.

- Valorización. El resultado principal es conseguir que el residuo se destine para otra finalidad al sustituir materiales que se habrían utilizado para cumplir una función particular.

- Eliminación. Operación distinta a reutilizar, reciclar o valorizar, incluso cuando implique secundariamente un aprovechamiento de la sustancia o energía.

2.4 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

La industria de la construcción y todos los espacios modificados por el ser humano son los mayores consumidores de recursos naturales y energía. Además, se generan cantidades inaceptables de residuos [22]. La rápida urbanización llevada a cabo, conlleva que estas fuentes de residuos cobren más importancia [23]. Los residuos más abundantes generados en este campo se denominan Residuos de Construcción y Demolición (RCD), que serán en su mayoría residuos inertes.

Su producción y gestión se regulará según el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero [24]. Este define los RCD como *"cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de «Residuo» incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, se genere en una obra de construcción o demolición"*. Hay que tener en cuenta que

actualmente está vigente la Ley 22/2011 en lugar de la mencionada, pero dicho RD está redactado en base a la anterior.

Habrá ciertos residuos producidos que no se consideren como RCD, y que por lo tanto no sean ámbito de aplicación del RD 105/2008. Estas excepciones son [24]:

- Tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas, cuando se reutilicen
- Tierras y piedras contaminadas por sustancias peligrosas
- Residuos de industrias extractivas reguladas por la Directiva 2006/21/CE de 15 de marzo
- Lodos de dragado no peligrosos reubicados en el interior de aguas superficiales
- Residuos de construcción o demolición con legislación específica y estén mezclados con otros RCD.
- Residuos generados por la industria auxiliar de la construcción, no ligada a una obra en particular

Figura 5. *Ejemplo de fracciones de RCD separadas en obra* [27]

2.4.1 Regulación jurídica de los RCD

En primer lugar, se crea el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (I PNRCD) 2001-2006 [25]. Dicho Plan, introduce de manera obligatoria un principio de orden para la gestión de los RCD: prevenir, reutilizar, reciclar, valorizar y por último depositar en vertedero. Fueron varios los objetivos ecológicos que se propusieron, destacando que, al acabar el Plan, en 2006, se esperaba el reciclaje o reutilización del 60% de los RCD producidos hasta la fecha. Los resultados no fueron los deseados, pues las toneladas de RCD generadas fueron superiores a las que se habían planteado, siendo incluso mayores que al inicio del Plan. Ante dicha situación, se redacta el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD) 2008-2015 [26].

El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los RCD [24], se redacta enmarcado en el II PNRCD. Surge de la necesidad de corregir la situación en la que se encontraba la gestión de los RCD, y es que el problema de estos se encuentra en el gran volumen generado, pero también en su mal tratamiento [27] produciendo impactos ambientales principalmente asociados a contaminación del suelos y acuíferos en vertederos incontrolados. En él, se describe que el régimen de control de la producción, posesión y gestión de RCD dependerá de la colaboración de las CCAA y entidades locales. Además, define 3 agentes implicados: el productor de residuos, el poseedor de residuos y el gestor de residuos.

2.4.2 Clasificación de los RCD

Los RCD vendrán clasificados en el capítulo 17 “Residuos de la construcción y demolición” de la Lista Europea de Residuos (LER)[21]. Los subgrupos son:

***Tabla 1**. Clasificación de RCD a partir de lo indicado en* [21].

RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)	
17.01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
17.02	Madera, vidrio y piedra
17.03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros
17.04	Metales
17.05	Tierra, piedras y lodos de drenaje
17.06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción con amianto
17.08	Materiales de construcción a base de yeso
17.09	Otros

2.4.3 Situación de los RCD en Asturias

2.4.3.1 COGERSA

Hasta los años 80, cada ayuntamiento gestionaba sus residuos mediante vertederos locales que en muchos casos solo "escondían" esa basura sin pensar en los daños al medio natural. Como solución, en 1982 se crea el Consorcio para la Gestión de los Residuos Sólidos de Asturias (COGERSA) por iniciativa del Gobierno del Principado y varios Ayuntamientos con el objetivo de solucionar los problemas de los residuos urbanos. A mediados de dicha década, se forma la instrumental Compañía para la Gestión de los Residuos Sólidos de Asturias, Sociedad Anónima (COGERSA, SA), para dotar al consorcio de una herramienta más versátil para abordar la gestión de instalaciones y recursos [28].

<<A pesar de que inicialmente se crea para la gestión de residuos urbanos, se ve la oportunidad de aprovechar sus activos para abordar la correcta gestión de otros residuos. En materia de gestión y tratamiento de RCD, se cuenta con una planta de selección RCD a la que entran aquellos residuos que cumplen dichas características. Una vez allí, se seleccionan y se toman decisiones sobre el tratamiento que se les dará. Aquellos que no puedan ser reciclados, se destinan al vertedero habilitado, bien de inertes o de no peligrosos, en función de sus condiciones. Estas instalaciones se encuentran en el recinto correspondiente al Centro de Tratamiento de Residuos de Asturias localizado en Serín (Gijón).

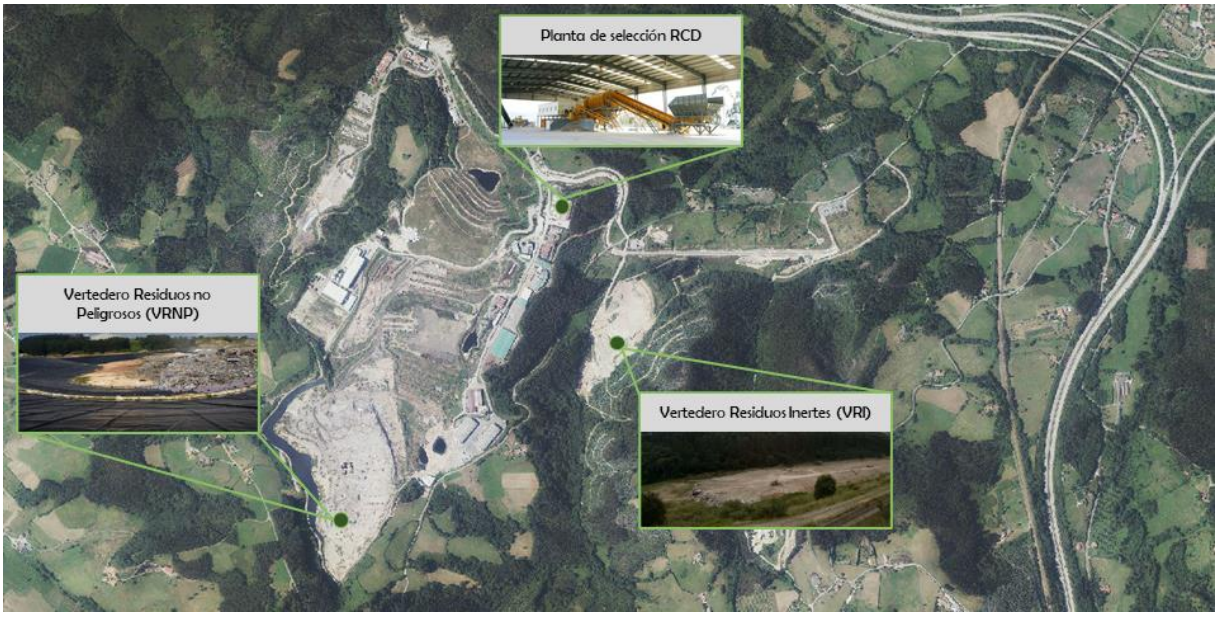


***Figura 6**. Ortofoto de las instalaciones del Centro de Tratamiento de Residuos de Asturias en Serín (Gijón), destacando las destinadas a RCD.*

2.4.3.2 Gestión de RCD

En Asturias, los residuos han estado regidos hasta 2010 por el **Plan Básico de Gestión de Residuos en Asturias 2001-2010**. Este fue redactado conforme a la antigua Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. Tras la finalización del Plan y la entrada en vigor de la Ley 22/2011 se redactó un nuevo Plan. Este se llamaría Plan Estratégico de Residuos del Principado de Asturias 2014-2024. Tras varios tramites y modificaciones, se realizó una nueva versión que es la vigente actualmente: **Plan Estratégico de Residuos del Principado de Asturias (PERPA) 2017-2024** [29].

A raíz del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos en vertederos, todos los vertederos de RCD se clausuran y entra en vigor en 2003 el único vertedero autorizado, situado en el Centro de Tratamiento de Residuos de COGERSA [29]. La gestión de RCD en Asturias se realiza a través de los siguientes canales:

- En pequeñas obras domiciliarias, se entrega en los puntos limpios, desde donde se traslada al Centro de Tratamiento de Residuos de COGERSA
- En la mayoría de los casos, se entrega a empresas de contenedores autorizadas. Estas lo entregaran a las plantas de tratamiento autorizadas
- Algunas veces, las empresas constructoras entregan los RCD directamente a empresas gestoras con planta de tratamiento autorizadas.
- En grandes obras de demolición, se pueden instalar, con previa autorización, plantas móviles de tratamiento de RCD

Para explicar en profundidad el procedimiento que se sigue en Asturias, se utiliza como base el documento proporcionado por COGERSA en su página web[30]. Lo primero que se necesita para que el reciclado sea viable, es un buen control de los residuos que llegan a la planta. Para impulsar la previa selección de los residuos, se aplica un sistema de tarificación en función del RCD y que sirve para penalizar cuando los residuos no lleguen bien clasificados. Previo a la descarga del material, el transportista mostrará el documento cumplimentado para conseguir así que cada RCD reciba el tratamiento adecuado.

Los residuos se depositan en función de su naturaleza, haciendo la primera selección para separar materiales de gran tamaño. El resto, se depositan en una tolva para pasar por un trómel donde se produce una separación:

- Fracción 0-35 mm que se deposita por gravedad en contenedores o pilas libres
- Fracción 35-150 mm y mayores de 150 mm pasaran a cintas de triaje donde los operarios separan manualmente los plásticos, maderas y otras impurezas
- Materiales férricos extraídos con electroimán

Los áridos seleccionados se conducen por las cintas hasta las pilas de salida de material según la granulometría. La fracción de árido más pequeña (0-35 mm) será destinada a rellenos o asientos en zanjas. La fracción mayor se tritura en una trituradora con molino de impactos y separador de férricos para obtener una zahorra de alta calidad. Posteriormente se criba llegando a obtener hasta 4 granulometrías diferentes según la demanda. Esto último se consigue combinando mallas de distintas luces (0-10 mm, 10-30 mm, 30-50 mm y mayor de 50 mm)

El trato final de todos los materiales obtenidos en la gestión de RCD es:

- La madera será acopiada para ser triturada y destinada a la venta o la planta de compostaje.
- Los plásticos se gestionan con el reciclador final o si son envases se llevan a la planta de selección.
- Los cartones y papeles se llevan a la propia línea de clasificación.
- El metal se vende.
- Los áridos se almacenan hasta su empleo en obra civil, labores de explotación de vertederos o se venden a clientes.
- Los materiales no clasificados serán el rechazo del proceso y se destinan al vertedero de inertes o al área de residuos peligrosos, según la naturaleza.

Tolva de alimentación

Trituradora móvil

Trommel

Criba móvil

Cinta de triaje

Trituradora voluminosos

Desde COGERSA, se establecen diferentes categorías para clasificar los RCD que llegan a la planta. Indirectamente, esto va a permitir llevar un control de las cantidades anuales recibidas, las cuales se recogen y representan en la siguiente tabla y gráfica respectivamente. Ambas se han creado con datos directos proporcionados por la empresa.

Tabla 2. *Entradas anuales a la planta de tratamiento RCD en toneladas.*

Materiales	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011
RCD muy mezclados	38.846	37.384	39.120	34.567	26.471	29.026	26.508	20.241	22.706	29.429
RCD parcialmente mezclados	27.159	28.463	34.897	33.440	29.115	28.604	15.873	9.666	9.774	17.267
RCD con pretratamiento	986	1.100	910	665	1.094	538	533	431	401	549
Mezcla Madera/Cartón/Plástico	1.064	772	497	475	473	324	381	502	334	451
Mezcla Escombro + M.O.	4.823	3.862	2.134	2.925	6.365	4.458	4.478	3.719	4.079	1.177
Hormigón, Piedra, Tabiques	61.660	94.132	79.493	80.710	93.330	75.862	63.564	27.147	46.724	46.382
Hormigón	9.115	20.718	15.779	15.113	11.956	14.325	14.475	4.050	7.675	8.387
Hormigón armado sin mezclar	11.633	14.783	8.917	8.083	10.981	6.618	4.193	1.215	3.513	5.121
Piedra / Grava	24	243	1.918	162	87	180	12	5	0	60
Mezclas bituminosas*	4.556	6.412	9.600	9.196	9.654	9.754	4.841	952	1.169	4.977
Materiales de aislamiento*	0	0	0	93	270	154	183	231	77	39
RCD a partir de yesos o mezclas con mucho yeso*	0	0	0	270	816	673	621	138	162	1.898
TOTAL	159.866	207.869	193.265	185.699	190.612	170.516	135.662	68.297	96.614	115.737

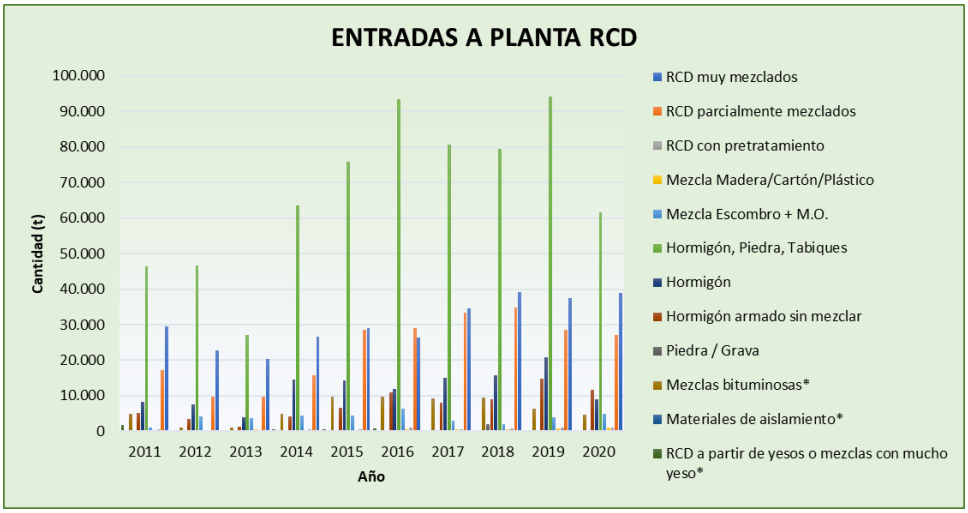


Figura 7. Entradas anuales a la planta de tratamiento RCD en toneladas.

Todos estos son residuos no peligrosos depositados en la planta de RCD y son procesados. Sin embargo, existe una serie de residuos indicados en la tabla con un asterisco (*) que reciben otro tratamiento:

- Mezclas bituminosas. Se descargan en el vertedero de residuos no peligrosos y desde allí son procesados para su posterior aprovechamiento.
- Materiales de aislamiento. Son descargados directamente en el vertedero de residuos no peligrosos.
- Yesos. Se descargan en el depósito de seguridad.

No obstante, hay otra porción de residuos que se determinan como rechazo debido a que por su grado de mezcla o sus características no pueden ser valorizados. Estos son llevados hacia el vertedero de residuos inertes siempre que cumplan con las restricciones impuestas en el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Según se indica este documento [20], el vertedero para residuos inertes solo albergará a aquellos que cumplan con la definición de residuo inerte y los criterios de valores límite de lixiviación y parámetros orgánicos que indica el propio Real Decreto. No obstante, el residuo debe ser un flujo único de un residuo, o en caso de haber residuos conjuntos, tendrán como origen la misma fuente. En caso de duda, se procede a la caracterización básica indicada en la normativa.

En el caso de COGERSA, los datos de entradas a vertedero de residuos inertes son los que se recogen a continuación:

Tabla 3. Entradas anuales al vertedero de inertes en toneladas.

Materiales	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011
Rechazo en planta RCD	30.158	37.908	27.957	27.887	32.379	29.375	18.966	15.621	13.968	31.282
Rechazo en plantas externas	0	0	0	0	394	381	2.599	6.228	8.050	14.807
Vidrio plano	401	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	30.559	37.908	27.957	27.887	32.773	29.756	21.565	21.849	22.018	46.089

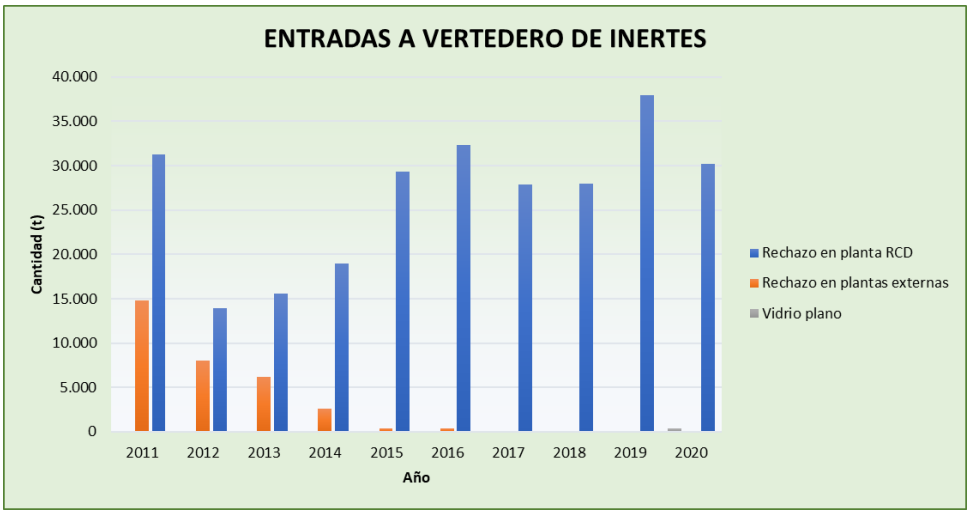


Figura 8. Entradas anuales al vertedero de inertes en toneladas.

Observando ambas gráficas, se observa que entorno al 18% de los residuos que llegan a la planta de RCD, son depositados en el vertedero de residuos inertes por imposibilidad de valorización. Cierto es que dicho porcentaje hace 10 años se situaba en un 27%, por lo que se están cumpliendo los objetivos. No obstante, para reducir este porcentaje y poder reincorporar dichos materiales en el mercado, se plantea como solución la posibilidad de emplearlos en las capas granulares de las técnicas SUDS. En el presente documento, se incluye un estudio inicial al respecto, considerando los RCD de origen hormigón y mixto, ambos de granulometría 0-32.

3 DRENAJE URBANO

3.1 DRENAJE URBANO CONVENCIONAL

Según [7] el drenaje urbano es la gestión del agua de lluvia precipitada sobre una zona urbanizada. Sin embargo, el sistema convencional conocido por todos que se implanta en la mayoría de las ciudades para gestionar tanto aguas pluviales como residuales, presenta problemas relacionados con calidad, cantidad y servicio, que no son reconocidos como evidentes y que se deben a su utilización generalizada [5]. Estos deben ser mitigados para buscar el bienestar social, urbano y ambiental.

El sistema de drenaje en las ciudades se ha diseñado durante años para conducir el agua rápidamente, de manera que las alcantarillas se dimensionan para ser capaces de recibir todo el agua de escorrentía superficial. Debido a este planteamiento, actualmente los ríos han perdido su riqueza natural y la capacidad de respuesta ante crecidas, así como se pueden observar que los sistemas de drenaje instalados no son capaces de atender a las necesidades en las zonas de nuevo desarrollo [31].

3.1.1 Agua de lluvia en las ciudades

Es un hecho que en el ámbito urbano se está experimentando un crecimiento exponencial de las ciudades, convirtiéndose estas en megalópolis. Este desarrollo afecta al ciclo del agua mediante la impermeabilización de los suelos, que se traduce en la pérdida de la capacidad de infiltración del terreno originando así una mayor escorrentía superficial. Supone una pérdida de las zonas verdes en el entorno urbano y ocasiona una intervención en el ciclo hidrológico evitando algunos procesos como filtración, escorrentía subsuperficial o evapotranspiración y pudiendo diferenciar dos ciclos del agua según indica [7]:

- Ciclo natural del agua. La precipitación es interceptada por la vegetación antes de tocar suelo. Cuando la fracción no interceptada llega al terreno se infiltra hasta saturar el medio y originar escorrentía superficial, subsuperficial y acumulaciones en superficie. El agua llega a ríos y arroyos para posteriormente alcanzar el mar o los embalses. Todo el ciclo va seguido por procesos de evapotranspiración y evaporación que devuelve el agua a la atmósfera.
- Ciclo del agua en ciudades. Apenas se intercepta la precipitación de la lluvia por cobertura vegetal, existiendo superficies con bajo umbral de escorrentía. Esto implica la generación de escorrentía superficial inmediata y originar grandes caudales punta que saturan los sistemas de drenaje instalados.

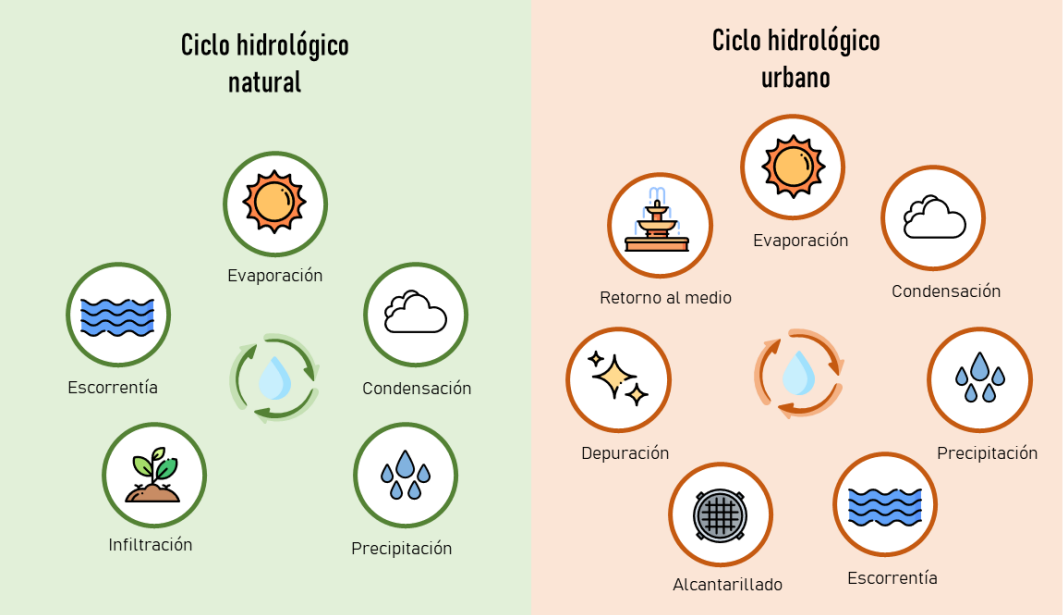


Figura 9. *Esquema del ciclo hidrológico natural y el ciclo hidrológico urbano*

Con el paso de tiempo, los sistemas de drenaje urbano han vivido diferentes etapas hasta llegar a los que actualmente conocemos. Cada una de ellas viene marcada por la aparición de problemas en la ciudad con la gestión de las aguas. El último problema es el de la calidad de las escorrentías urbanas en tiempo de lluvia y el impacto de sus vertidos en el medio receptor, incrementándose el problema cuando se trata de una red unitaria [4].

Estas últimas forman la mayoría de la infraestructura de drenaje en las áreas urbanas como herencia del planteamiento y diseño que se hacía tradicionalmente. Como se indica en [32] son redes que en tiempo seco transportan aguas residuales y en tiempo lluvioso incorporan también las pluviales siendo mezcladas en la misma conducción. Este sistema, que supone un ahorro a nivel constructivo, se traduce en un mayor gasto de mantenimiento para evitar la contaminación en el medio receptor debido a los posibles reboses en tiempos lluviosos por la presencia de patógenos, metales, sólidos…

3.1.1.1 Problemas asociados a los sistemas de drenaje convencional

El desarrollo urbano supone importantes cambios en los usos del suelo, alterando así el ciclo hidrológico y agravando problemas relacionados con drenaje y gestión de aguas pluviales [3]. Un papel importante es el que juega la impermeabilización de las calles, que provoca la acumulación de la lluvia y su concentración, arrastrando gran cantidad de sustancias y contaminantes [7]. Las zonas verdes en las ciudades han disminuido dramáticamente en los últimos años. Esto da lugar a que se cree mucha escorrentía superficial, provocando la sobrecarga de los sistemas de drenaje urbano que se traduce en la inundación de las zonas cercanas [9].

Este efecto de urbanización junto con el sistema convencional de drenaje urbano instalado en la mayoría de las ciudades provoca unos efectos negativos que no suelen mostrarse y que inciden en los aspectos fundamentales del desarrollo sostenible: economía, medio ambiente y sociedad. Los efectos en cada una de las partes se recogen en [7] y según indica, los problemas pueden resumirse en: inundaciones, contaminación difusa y falta de servicio.

3.1.1.1.1 Inundaciones

El desarrollo urbano experimentado en las ciudades en los últimos años ha dado lugar a un desbordamiento de los sistemas de drenaje en época de lluvia, debido a falta de capacidad. Esto se traduce en daños económicos asociados tanto a cantidad del agua como a los daños que producen las inundaciones.

Figura 10. *Inundación urbana por temporal lluvioso (Fuente: lavozdeasturias.es)*

Los volúmenes de aguas de lluvia de zonas impermeables se van sumando hasta sobrepasar la capacidad de las instalaciones de drenaje presentes en las ciudades. Dada esta situación, el hidrograma de escorrentía de lluvia en una cuenca urbana es distinta al de una cuenca natural de mismo área diferenciándose principalmente por la punta de caudal, la cual se genera más rápido en el primer caso por un gran porcentaje de suelo impermeable [6].

La presencia de acumulaciones superficiales en el medio urbano origina una serie de problemas en las ciudades que comprometen la comodidad y seguridad del ciudadano, así como el buen estado y la eficacia de los sistemas de drenaje urbanos por la presencia de olores, acumulación de sedimentos, inundaciones u otros accidentes que, además, suponen un fuerte impacto ambiental.

3.1.1.1.2 Contaminación difusa

El hecho de que se esté llevando a cabo una impermeabilización de los suelos en las ciudades, no solo supone que en periodos de lluvia se produzcan inundaciones por desbordamiento de los sistemas de drenaje convencional, sino que la escorrentía superficial generada potencia la erosión de la superficie por las altas velocidades del flujo, arrastrando a su paso contaminantes que contaminan dicho agua [33]. Debido a distintos factores como señala [32], las características de la escorrentía superficial generada son altamente variables de un lugar a otro, lo que hace difícil poder identificar exactamente donde se encuentra el problema de la calidad. Siguiendo lo que dice [7], las principales fuentes de contaminación se pueden dividir en 5 categorías:

- Contaminación atmosférica promovida mayoritariamente por el uso de combustibles fósiles. Origina contaminantes como dióxido de carbono, monóxido de carbono, cloro, plomo, etc. además de una gran variedad de gases reactivos.
- Residuos animales que aportan patógenos como bacterias, protozoos y virus que causan enfermedades a los seres humanos.
- Basura esparcida, ya sea plásticos, papeles o vegetales, que se puede degradar física o químicamente y ser arrastrada por la escorrentía.
- Erosión y/o lavado de superficies que proporciona contaminantes procedentes de superficies y mobiliario urbano erosionado por agentes atmosféricos o las obras civiles. Pueden ser piedras, tierra, asfalto, hormigón, metales, etc.
- Otras causas, principalmente por vertidos accidentales y puntuales en mantenimiento de carreteras, actividades agrícolas, tráfico y aparcamiento de vehículos y lixiviados de vertederos.

Figura 11. Acumulación de basura en ciudades (Fuente: ecoportal.net)

La pérdida de calidad del agua es uno de los problemas ambientales más preocupantes, ya que, a mayor contaminación, más exigente será su tratamiento a realizar previo vertido al medio receptor. Además de esto, de cara a la sociedad, genera un malestar entre los ciudadanos por la presencia de olores o contaminantes que dificulten el tránsito por las calles de la ciudad. Tanto la calidad medioambiental como la urbana se verán afectadas.

3.1.1.1.3 Falta de servicio

En los centros urbanos, los sistemas de recogida de aguas residuales y pluviales consiste en una red de colectores que transporta el flujo desde el alcantarillado municipal hasta la estación depuradora [34]. Este tipo de gestión conlleva problemas como carencias funcionales y estéticas, falta de comodidad y de seguridad, aumento de temperatura urbana, etc [7].

El mayor problema que se presenta por falta de servicio en relación con el agua de lluvia en las ciudades es la pérdida de valor sin poder ser reutilizada. El abastecimiento del agua a las ciudades cada vez es más complicado por el aumento de la demanda, sometiendo a los acuíferos y ríos a sobreexplotaciones, estando cerca del agotamiento. Debido a esto, los efectos de la sequía cada vez son peores implicando restricciones o cortes en el suministro, como menciona [6]. En paralelo, se desperdicia el agua de lluvias en las ciudades que podrían ser reutilizadas en varios campos dada su calidad. En vez de ser aprovechadas, se mezclan con las aguas residuales, siendo contaminadas por las mismas e incrementando así el volumen a depurar. Este último hecho, sumado a los cambios meteorológicos a lo largo de los años, hace que las instalaciones presentes actualmente sean insuficientes para el tratamiento de un volumen de agua tan elevado.

Otro efecto producto del rápido drenaje del agua de lluvia en las ciudades es lo que se conoce como "isla de calor". Lo que ocurre, es que la ciudad tiene una temperatura más elevada que la de sus áreas de alrededor comprometiendo las condiciones de vida en el medio urbano cuando se dan temporales muy calurosos [35]. Este problema, surge debido a las actividades humanas y modificaciones en el suelo que eliminan o reducen su capacidad para retener el agua y refrescar el ambiente de forma natural. Implica por lo tanto unos gastos energéticos en climatización [7].

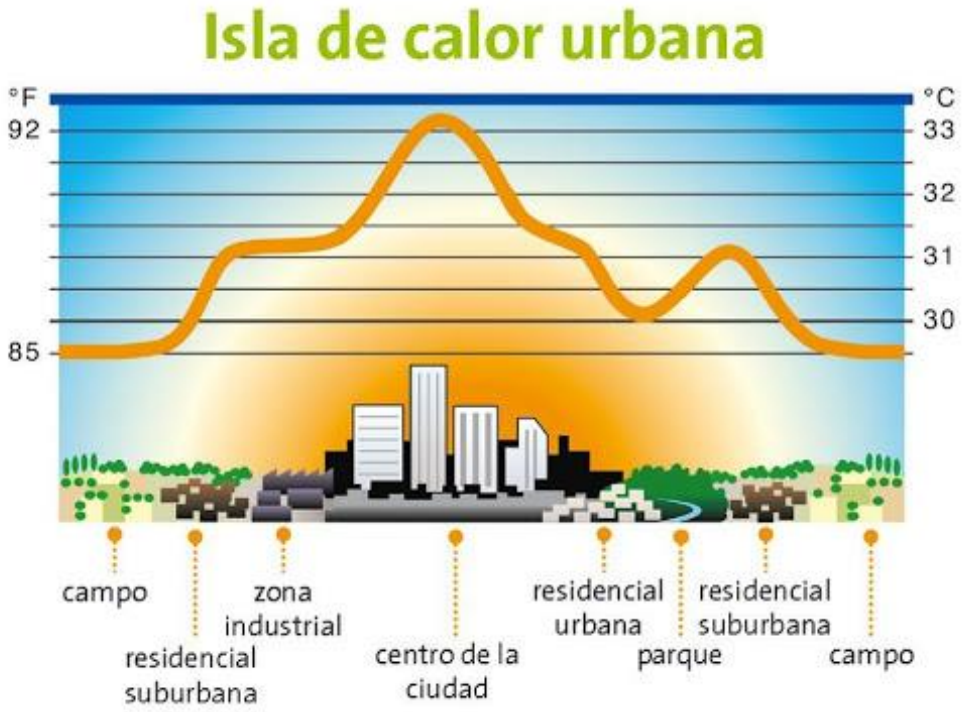


***Figura 12**. Efecto isla de calor urbana (Fuente: urbanismoytransporte.com)*

Por último, a consecuencia de la desnaturalización del terreno, se rompe la cadena trófica y se pone en riesgo la biodiversidad y los ecosistemas. El suelo se deseca hasta el punto de sufrir una pérdida edafológica y provocar el desplazamiento de las especies a otras zonas [7].

3.1.1.2 Causas

Para poder atajar los problemas anteriormente expuestos, se debe de conocer el origen de estos. Las causas por las que el agua actualmente genera afecciones en el medio urbano son las que se recogen en [7]:

- Impermeabilización del suelo
- Carencias del sistema de drenaje
- Cambio climático
- Falta de sensibilidad social

3.1.1.2.1 Impermeabilización del suelo

Se entiende por permeabilidad a la capacidad que tiene un medio para permitir el paso de un fluido sin modificar su estructura. Gracias a este propiedad, el terreno natural permite la infiltración del agua y continuar con el ciclo hidrológico. Sin embargo, la urbanización avanzada que se aprecia hoy en día, se está llevando a cabo una reducción se áreas permeables que limita los procesos naturales en las ciudades [36].

La impermeabilización es la principal causa del aumento de los problemas en relación a la gestión del agua de lluvia en las ciudades, influyendo tanto en la generación de inundaciones como en los vertidos deslocalizados de contaminantes [7]. Al hablar de impermeabilización en las ciudades, no solo hay que referirse a los pavimentos por los que transitan vehículos y personas, sino que también hay que contar con las cubiertas de los edificios.

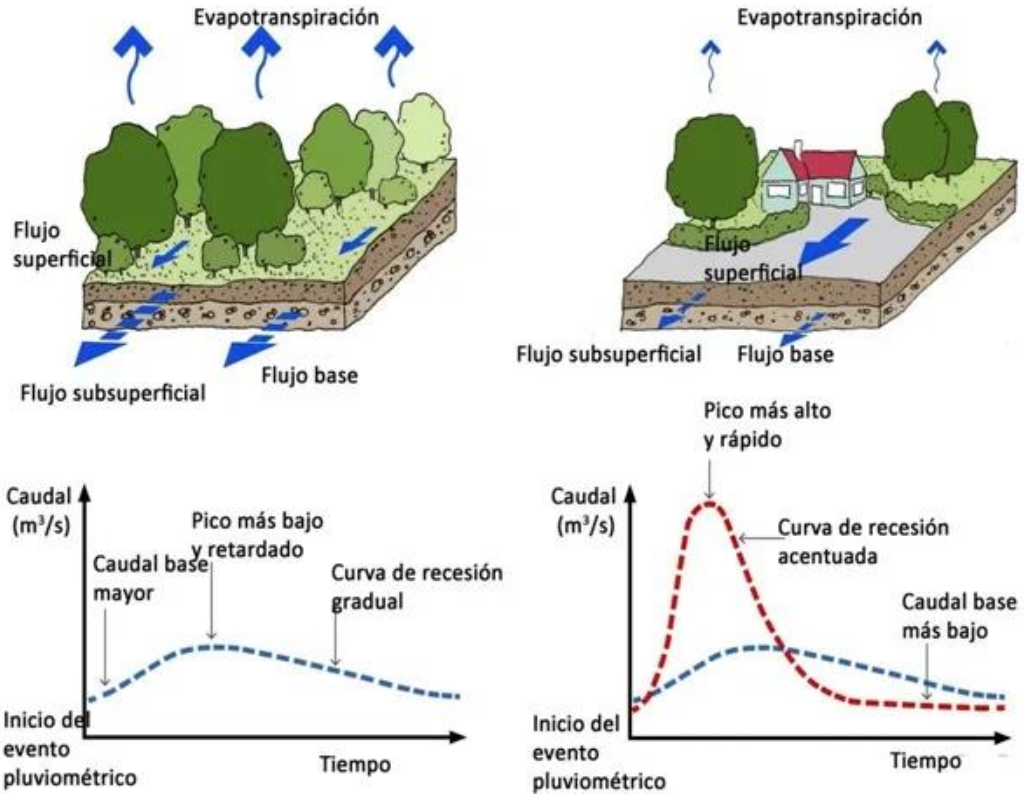


Figura 13. Esquema del impacto de urbanización en la cantidad de escorrentía (Fuente:sudsostenible.com)

El motivo por el cual se recurre a esta solución en las ciudades es la comodidad de mantenimiento de las superficies al suponer fácil limpieza y reducir la erosión. Además, de cara a la filosofía de drenaje tradicional, permite una rápida evacuación del agua reduciendo el tiempo de concentración. Por contrapartida, el volumen de agua generado es mayor y se requiere un sistema de drenaje que pueda hacer frente a las exigencias que se demandan.

3.1.1.2.2 Carencias del sistema de drenaje

El objetivo primordial en las ciudades, en cuanto a drenaje se refiere, es evacuar el agua de los espacios urbanos lo más rápido posible. En consecuencia, durante muchos años se ha dado preferencia a la instalación de conducciones subterráneas muy extensas y complejas, conectadas a elementos de alcantarillado encargados de captar el máximo volumen de agua posible.

Figura 14. *Desbordamiento del alcantarillado (Fuente: vigoe.es)*

Sin embargo, las variaciones pluviales que provocan un aumento de la escorrentía en las ciudades dan lugar a la necesidad de intervenir en dichas canalizaciones sustituyendo los elementos ya existentes por otros de mayor tamaño. Esta solución se basa en la idea de conducir todo el agua a plantas de tratamiento, asumiendo su contaminación y dejando de lado los riesgos sociales y ambientales.

3.1.1.2.3 Cambio climático

Es conocido que el medioambiente presenta una degradación notable, a la cual se le presta cada vez más atención. Es un problema global generado tanto por causas de origen natural como de origen antropogénico.

Entre las diferentes consecuencias que presenta este fenómeno, se encuentran los cambios en las frecuencias e intensidades de los eventos de lluvia. Dichas variaciones, provocan errores en los cálculos hidráulicos realizados en las canalizaciones urbanas, ya que muchos métodos están basados en datos recogidos entre 1971 y 2000, que no reflejan valores atribuidos al calentamiento global [7].

3.1.1.2.4 Falta de sensibilidad social

Para que las actuaciones realizadas en las ciudades con el objetivo de evacuar el agua hacia la periferia sean efectivas, es muy importante que la sociedad tenga conciencia de la problemática que se presenta en cuanto al agua de lluvia.

Existe una falta de conocimiento o sensibilización por parte de los ciudadanos respecto a la importancia del ciclo de agua y la conservación de los sistemas sanitarios. Los contaminantes que se presentan son de diversos orígenes, pero la mayoría se puede atribuir a actividades irresponsables de la ciudadanía. Por lo tanto, la lluvia que precipita en los espacios urbanos va a cumplir la función de lavado de las calles, traduciéndose en una mayor exigencia de mantenimiento en las conducciones, así como mayor volumen de agua que llega a las plantas de tratamiento.

3.1.1.3 Soluciones

Tradicionalmente, tal y como refleja [32], las medidas tomadas para solucionar los problemas mencionados se clasifican según 2 criterios: grado de intervención en la estructura de la red (no estructurales o estructurales) y lugar del sistema de alcantarillado donde se aplique (en origen o en vertido). En general ambos criterios

relacionan entre sí las técnicas en el orden que se indican (no estructurales-en origen y estructurales-en vertido). Estas medidas se centran en la reducción de contaminantes de la escorrentía para mejorar su calidad. Sin embargo, será insuficiente, pues como se ha reflejado, los problemas generados van más allá de la calidad de las aguas y surge la necesidad de nuevas metodologías de actuación, que da lugar a un tratamiento integral de distintos aspectos asociados al agua de lluvia [5]:

- Cantidad. Debido al aumento de impermeabilización en entornos urbanos aumenta la cantidad de agua de escorrentía y las problemáticas asociadas.
- Calidad. A medida que discurren las aguas pluviales se mezclan con las aguas negras y genera la necesidad de tratamiento en depuradoras.
- Servicio. La urbanización supone una pérdida de gran parte de los espacios naturales, provocando una pérdida de estética urbana y trascendiendo al servicio de la ciudad.

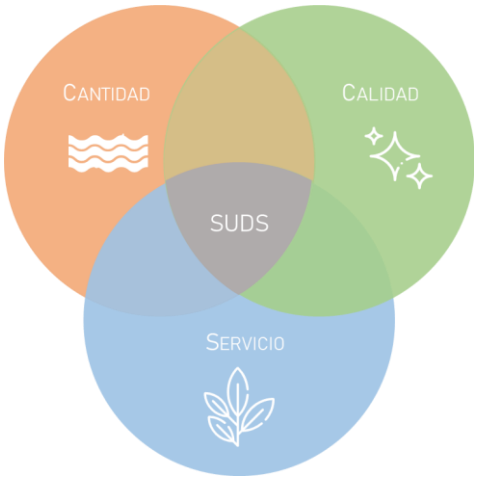


***Figura 15**. Aspectos de la visión integral del drenaje sostenible.*

Las intervenciones realizadas para eliminar o mitigar los problemas que supone la actual gestión de agua de lluvia en las ciudades tienen como punto final el desarrollo sostenible. Como indica [7], se ha demostrado que los recursos naturales no son ilimitados y por lo tanto se ha creado un nuevo pensamiento social que nos hace más cuidadosos a la hora de intervenir en el medio ambiente. Se desarrollan una serie de documentos, leyes y normativas que impondrán unos criterios, mayoritariamente medioambientales debido a la falta de atención en este ámbito, que permitan llevar a cabo intervenciones sostenibles. Como fruto de esta metodología nacen 2 términos que han ganado importancia en la gestión del agua de lluvia en áreas urbanas: drenaje sostenible y Sistemas Urbanos de Desarrollo Sostenible (SUDS).

3.2 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

3.2.1 Drenaje sostenible

Dentro del desarrollo sostenible anteriormente mencionado, se pueden englobar unas soluciones que completen y mejoren el drenaje urbano actual para mitigar los problemas identificados.

Las medidas tomadas se fundamentan principalmente en la laminación y control de la cantidad de agua, la mejora de la calidad con procesos naturales y el servicio al ciudadano incorporando el agua en el paisaje urbano, y recuperación de hábitats naturales dentro de las ciudades [7]. No solo se aplica en ciudades, sino en puertos, carreteras, aeropuertos o cualquier zona urbanizada que requiera de un sistema de drenaje [6].

Para alcanzar un drenaje sostenible, se debe partir de un buen planteamiento urbano. Este debe tener en cuenta aspectos como los estándares de diseño, sistema socioeconómico, financiabilidad o innovación [37].

Añadido a esto, el estudio ambiental ha cogido un fuerte peso, siendo esencial para realizar un planteamiento que persiga un desarrollo sostenible.

El objetivo será conseguir una buena gestión del agua a través de la integración del ciclo hidrológico en el entorno urbano, es decir, elaborar un diseño urbano que sea sensible al agua [38]. Entre sus beneficios se encuentra la protección y mejora de los sistemas naturales de agua, la integración del tratamiento de aguas pluviales en el paisaje, la mejora de la calidad del agua, la reducción de la escorrentía superficial y la minimización de los costes de la infraestructura de drenaje [39].

Gracias a esta evolución, a la aparición de esta nueva filosofía de diseño, de pensar y comprender la ciudad, se ha dejado de un lado la instalación de un drenaje urbano capaz de llevar toda la cantidad de agua posible [31] y se ha buscado una gestión del agua pluvial con sentido. Aparecen así los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que pretenderán proteger y mejorar la calidad del agua evitando altas escorrentías superficiales.

3.2.2 Corrientes de pensamiento

Dada la gran afección medioambiental producida por el desarrollo urbano y la nueva tendencia social en busca de un desarrollo sostenible mediante la integración del ámbito natural en el urbano, se debe de cambiar la perspectiva de visualización de la ciudad, entenderla como un organismo vivo. Surge así el termino de biourbanismo, dando paso a un estudio de la ciudad más profundo en el marco de las ciencias de la naturaleza y sus avances más recientes, en conjunto con aspectos técnicos. Seguirá una filosofía que considera el tejido urbano como composición de diferentes capas interconectadas [40]. Vendrá respaldado por otras filosofías o términos como puede ser la permacultura, centrándose en la aplicación de éticas y principios de diseños que buscarán el desarrollo sostenible y que tiene los ejes centrales indicados en [41] los cuales serán importantes para cumplir los objetivos. Se conseguirá pues, cubrir todas las necesidades humanas con la participación de la naturaleza.

La filosofía SUDS se basa en reproducir el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización, permitiendo revalorizar y recuperar áreas urbanas mejorando su desarrollo estético. Por todo ello, se trata de un enfoque más amable con la naturaleza, actuando desde el origen, de una manera más racional y sostenible [39].

A consecuencia de las nuevas oportunidades de intervención en el drenaje urbano una vez identificados los problemas, son varias las corrientes de pensamiento que se desarrollaron y que engloban las medidas tomadas en la persecución de un drenaje sostenible, para transmitir sus objetivos y enfoques más integrados. Los nombres que se utilizan comúnmente son [6,42]:

- Desarrollo de Bajo Impacto o Low Impact Development (LID)
- Diseño y Desarrollo de Bajo Impacto Urbano o Low Impact Urban Design and Development (LIUDD)
- Diseño Urbano Sensible al Agua (DUSA) o Water Sensitive Urban Design (WSUD)
- Gestión Integrada de Agua Urbana o Integrated Urban Water Managment (IUWM)
- Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) o Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)
- Buenas Prácticas Ambientales (BPAs) referidas al agua de lluvia, o Stormwater Best Managment Practices (BMPs)
- Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TEDUS)
- Mejores Prácticas de Control (MPC) de la escorrentía superficial.
- Técnicas alternativas de drenaje

3.2.3 Filosofía de los SUDS

Según [43] los SUDS pueden definirse como elementos participantes en el drenaje de las ciudades que, además de reducir el caudal circulante en superficie, consiguen disminuir la cantidad de contaminantes que arrastre el agua de escorrentía. Es una definición amplia que no implica que dichos elementos sean estructurales,

englobando así técnicas que por ejemplo eviten la contaminación de las vías. Por lo tanto, incluye elementos estructurales y elementos no estructurales.

Los SUDS son de las principales soluciones en las últimas décadas para llevar a cabo la gestión del agua de lluvia, reforzado por los pensamientos anteriormente mencionados. Persiguen maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos de la escorrentía de aguas en una superficie estudiada [35]. Permiten gestionar el agua de lluvia reduciendo el volumen de escorrentía, aumentando el tiempo de concentración y mejorar por lo tanto la capacidad de los sistemas de drenaje [44]. Los SUDS difieren de los métodos tradicionales de conducciones subterráneas para la evacuación rápida de grandes cantidades de agua, fomentando la integración de una gestión natural del agua en zonas urbanas, algo que no siempre es posible debido principalmente a los usos de los suelos [45].

Los SUDS serán diseñados en base a 4 pilares:

- Cantidad. Se debe de controlar la cantidad de agua de la escorrentía que se origina para evitar inundaciones, y proteger y conservar el ciclo natural del agua.
- Calidad. Realizar una buena gestión de la escorrentía para prevenir la contaminación urbana.
- Confort. Con su implantación, se pretende diseñar y crear lugares que resulten amenos para la población.
- Biodiversidad. Es importante que estos nuevos espacios creados sean también de calidad a nivel ambiental, integrando en la ciudad espacios naturales respetables que permitan desarrollar nuevos hábitats y favorezcan los ecosistemas.

3.2.4 Normativa relacionada

La normativa aplicada a nivel europeo es la siguiente:

- "*Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo*", Documento de trabajo de la Comisión Europea 2012, que como medidas de mitigación del sellado del suelo establece: Utilización de materiales y superficies permeables, diseño urbanístico inspirado en el concepto de Infraestructura Verde o sistemas naturales de captación de agua.
- Directiva Marco 2000/60/CE por la que se establece el marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva sobre inundaciones del 2007, tiene como objetivo reducir y gestionar los riesgos que las inundaciones representan para la salud humana, el medio ambiente, patrimonio cultural y la economía.
- La Directiva de las Aguas Subterráneas, establece unos estándares de calidad e introduce medidas para prevenir o limitar las entradas de contaminantes en las aguas subterráneas.
- La Directiva de Aguas Residuales Urbanas 1991.

A nivel nacional, en España, la normativa aplicada es el Real Decreto Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueban las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas:

- 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. Modificado por RD 2116/1998, de 2 de octubre. Y con la correspondiente corrección de errores.
- Resolución de 28 de abril de 1995, de la Secretaría de estado de Medio Ambiente y Vivienda por la cual se dispone la publicación del acuerdo del consejo de ministros de 17 de febrero de 1995, en la que se aprueba el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales.
- 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. Y en su artículo 259 ter "Desbordamientos de sistemas de saneamiento en episodios de lluvia", apartado a, indica que los

proyectos de nuevos desarrollos urbanos deberán plantear medidas que limiten la aportación de aguas de lluvia a los colectores.

- Real Decreto Legislativo 1/2001. Texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 233/2013, de 5 de abril, por el que se regula el Plan Estatal de fomento del alquiler de viviendas, la rehabilitación edificatoria, y la regeneración y renovación urbanas. En su artículo 26, como actuaciones subvencionables incluye cubiertas verdes, las de reducción del uso de agua potable y riego, las de gestión sostenible de las escorrentías urbanas…
- Real Decreto 400/2013, de 7 de junio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental. En su artículo 56.1 indica "que Las nuevas urbanizaciones, polígonos industriales, desarrollos urbanísticos e infraestructuras lineales que puedan producir alteraciones en el drenaje de la cuenca o cuencas interceptadas deberán introducir sistemas de drenaje sostenible (uso de pavimentos permeables, tanques o dispositivos de tormenta, etc.)

Respecto a las normativas de saneamiento, cada ciudad tiene sus propios cánones de diseño. Aunque a nivel nacional no hay normativa pertinente, sí que hay recomendaciones respecto al uso de SUDS mencionadas (pero no de forma explícita con ese nombre) en:

- La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto (Comité de Expertos en Sequía del Ministerio de Medio Ambiente, 2007):
  - Libro Verde de Medio Ambiente Urbano (Comité de Expertos en Sequía del MMA, 2007)

3.2.5 Tipologías de SUDS

Son varias las técnicas SUDS que existen, cada una de ellas con diferentes estructuras, funcionamiento y estructura. Todas estas tipologías, pueden ser agrupadas como propone [6] y que se recoge en la siguiente tabla.

Tabla 4. Clasificación de tipologías de SUDS.

Medidas preventivas	Sistemas de infiltración	Sistemas de captación y transporte	Sistemas de tratamiento pasivo
Legislación	Superficies permeables	Drenes filtrantes	Depósitos de detención
Formación	Pozos y zanjas de infiltración	Cunetas verdes	Estanques de retención
Inversión	Depósitos de infiltración	Franjas filtrantes	Humedales artificiales

El primer bloque también se conoce como técnicas no constructivas, y los otros como técnicas constructivas. Para estas últimas, existen unas matrices recogidas en [46] que permite al ingeniero determinar cuál es la técnica más recomendada según las características físicas del lugar, el uso de los suelos, el rendimiento del control de la calidad de aguas y por factores ambientales y sociales que intervienen.

Cabe destacar, que es muy frecuente la configuración de un sistema de drenaje sostenible compuesto por varias de estas técnicas. La gestión o tratamiento del agua mediante una cadena de drenaje sostenible es un sistema que utiliza diferentes SUDS conectados entre sí para reducir el flujo de agua de lluvia generada y reducir la cantidad de contaminantes que posee [45]. Con esto se consigue un control y tratamiento exhausto del agua de lluvia.

3.2.5.1 Sistemas de infiltración

3.2.5.1.1 Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes son áreas vegetadas que se localizan en el techo de los edificios siendo agradables visualmente, aportando valor ecológico, reducción de los gastos energéticos y disminuyendo la escorrentía superficial [35]. Se componen de distintas capas comprendidas entre la superficie inferior del último techo y el acabado en contacto con el exterior, que permiten asegurar el buen estado de la vegetación colocada, un drenaje eficiente y evitar afecciones a la cubierta del edificio en el que se disponen. Los tipos de cubiertas se clasifican según la inclinación, el uso, la ventilación y el orden de las capas.

Figura 16. *Cubierta verde (Fuente: ovacen.com)*

3.2.5.1.2 Firmes permeables

Son estructuras multicapa que captan e infiltran el agua de lluvia, compuestos por un pavimento para el tránsito peatonal o de vehículos. El agua atraviesa la superficie permeable hasta la capa inferior donde es almacenada, para posteriormente ser transportada a otro lugar o infiltrada al terreno. Se incorpora un desagüe para casos en los que se produzca un exceso de agua [31]. De esta manera, se logra interceptar la escorrentía superficial cercana a la superficie, que se traduce en una reducción de volumen y frecuencia de dicha escorrentía a la vez que se aporta un tratamiento de dicho agua [35].

Figura 17. *Estructura de un firme permeable (Fuente: sudsostenible.com)*

3.2.5.1.3 Pozos y zanjas de infiltración

Son depósitos subterráneos que recogen y almacenan el agua superficial para posteriormente infiltrarlo al terreno natural. La diferencia entre ambos son las dimensiones, de manera que en las zanjas la dimensión mayor es el largo y en los pozos es la profundidad.

En ambos casos, la perforación realizada se rellena con material granular que permita el paso del agua y su almacenamiento antes de ser infiltrada al terreno. Por ello, vendrán condicionados por el tipo de terreno en el que se realizan, atendiendo a la tasa de infiltración y la posición del nivel freático [31].

Figura 18. Vista superior de un pozo de infiltración (Fuente: hidroextrema.blogspot.com)

Figura 19. Zanja de infiltración experimental (Fuente: iagua.es)

3.2.5.1.4 Depósitos de infiltración

Los depósitos de infiltración son pequeñas depresiones permeables en el terreno que permiten el almacenamiento de la escorrentía superficial, de manera que se elimina los posibles contaminantes antes de ser infiltrada al terreno [35]. Se observa que son similares a los pozos y zanjas de infiltración, pero en este caso abarcan episodios de lluvias con unos volúmenes mucho mayores, así como prestan servicio a cuencas de mayor superficie.

Figura 20. Depósito de infiltración (Fuente: iagua.es)

Son estructuras que cuentan con una superficie y pendientes vegetadas, que sirven para prevenir erosión y funcionar como hábitat natural. Para hacer frente a excesos de agua, se necesita de un desagüe para enviar el sobrante hacia otro sistema de tratamiento.

3.2.5.2 Sistemas de captación y transporte

3.2.5.2.1 Drenes filtrantes

Los drenes filtrantes consisten en zanjas profundas rellenas de piedra o grava que permiten captar y almacenar el agua de lluvia, conduciéndola o filtrándola posteriormente al terreno [35]. Estarán recubiertos de material geosintético y además pueden contar con una tubería permeable interior que recoge el agua y colabora con su transporte. Según donde se ubique esta conducción, pueden crearse lo que se denomina dren francés.

***Figura 21**. Dren filtrante en autopista (Fuente: carnellgroup.co.uk)*

3.2.5.2.2 Cunetas verdes

Se entiende como cunetas verdes aquellos cauces naturalizados que tienen la capacidad de captar y transportar el agua de escorrentía superficial de manera controlada, oxigenando y reteniendo el fluido [7]. La ventaja frente a las cunetas convencionales es la reducción de la velocidad del flujo, de manera que se favorece la infiltración en el terreno. Además, visualmente son más agradables integrándose en el medioambiente y pudiendo funcionar como hábitat natural.

***Figura 22**. Cuneta verde seca (Fuente: sudsostenible.com)*

3.2.5.2.3 Franjas filtrantes

Las franjas filtrantes son similares a las cunetas verdes. En este caso consisten en superficies con vegetación densa y con una cierta pendiente que van a tratar la escorrentía superficial de las áreas impermeables promoviendo la sedimentación, filtración e infiltración (cuando sea posible) [35].

La vegetación que puede presentar es muy diversa, dese prados hasta pequeños bosques. Generalmente, cuanto más ancha y densa es la franja, mayor capacidad filtrante y depuración va a presentar [31].

***Figura 23.** Franja filtrante (Fuente: iagua.es)*

3.2.5.3 Sistemas de tratamiento pasivo

3.2.5.3.1 Depósitos de detención

Los depósitos de detención son depresiones del terreno normalmente secas, excepto en eventos de lluvia, que permite almacenar esta escorrentía superficial que se produce y favorecer así la sedimentación de los posibles contaminantes que arrastra y la laminación del flujo.

Se pueden interpretar como tanques de tormenta superficiales o zonas inundables controladas, con una correcta naturalización y un sistema de desagüe que permita su descarga hacia otros sistemas [6].

***Figura 24**. Depósito de detención* [35]

3.2.5.3.2 Estanques de retención

Los estanques de retención son depresiones del terreno que, a diferencia de los depósitos de detención, cuentan con un volumen de agua en todo momento que permite ocultar los sedimentos antiestéticos e incrementar el rendimiento en eliminación de contaminantes.

El agua que llega al estanque puede ser de diferentes fuentes, de manera que se debe de permitir diferentes variaciones del nivel del agua, además de tener un control del caudal de entrada y de salida. Por otra parte

***Figura 25.** Estanque de retención (Fuente: sudsostenible.com)*

3.2.5.3.3 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son muy similares a los estanques de retención, hasta el punto de que en el CIRIA son tratados en conjunto. También son superficies cubiertas de agua, las cuales son dotadas con vegetación propia de los pantanos y zonas húmedas.

A diferencia de los humedales naturales, estarán preparados para recibir directamente flujo de escorrentía superficial urbana [6]. Una ventaja que presentan frente a los estanques de retención, es que se consigue un tiempo de retención de agua superior, y por lo tanto un mayor grado de depuración [7].

Figura 26. *Humedal artificial (Fuente:economia3.com)*

3.2.6 Áridos empleados en SUDS

Muchas de las técnicas SUDS comentadas anteriormente, requieren de la presencia de áridos que permiten crear superficies permeables para simular la superficie natural y facilitar la filtración del agua y posterior infiltración al terreno.

Para conocer las exigencias de cada uno, se han consultado diferentes Guías de SUDS [47–51], principalmente el CIRIA [35], y se han recogido los datos relacionados con los áridos que se necesitan en cada técnica en la siguiente tabla. Se debe destacar que, en casos como el CIRIA, las especificaciones vienen desarrolladas en función de la normativa inglesa.

Tabla 5*. Características de los áridos en técnicas constructivas de SUDS*

TIPOLOGÍA	¿LLEVA ÁRIDO?	TIPO DE ÁRIDO	UBICACIÓN ÁRIDO	FUNCIÓN ÁRIDO	TAMAÑO ÁRIDO
Alcorques	Sí	Grava	Capa modular / Capa estructural	Filtrar y almacenar	< 2 m / 20-40 mm
Cubiertas verdes	Sí	Grava	Capa drenante / Capa protectora	Drenar, tratar y retener	20-40 mm
Cunetas verdes	Opcional	Arena o Grava	Capa filtrante / Capa de transición	Tratar y transportar	< 6 mm / 3-10 mm
Depósitos de detención	No	-	-	-	-
Depósitos de infiltración	Si	Grava	Relleno drenante	Infiltrar y tratar	< 6 mm
Drenes filtrantes	Sí	Grava	Capa superior / Relleno drenante	Infiltrar y tratar	< 6 mm / 10-63 mm
Estanques de retención	No	-	-	-	-
Firmes permeables	Sí	Grava	Base / Sub-base	Filtrar, tratar, transportar, infiltrar y almacenar	4-6 mm / 20-40 mm
Humedales artificiales	No	-	-	-	-
Pozos y zanjas de infiltración	Opcional / Sí	Grava o Arena	Relleno	Infiltrar y tratar	< 6 mm

Se puede comprobar que el tipo principal de árido que suelen indicar las guías es la grava. Hay también casos como los pozos y zanjas de infiltración y las cunetas verdes, en los que se admite el uso de arena, pero serían situación muy excepcionales.

En cuanto al tamaño del árido, se han determinado en función de las indicaciones que incluye el CIRIA [35] en los apartados de cada técnica desarrollada en *Part D Technical Details*, junto a las especificaciones desarrolladas en el *Chapter 30 Materials*:

- Siguiendo los apartados mencionados, se recoge que las técnicas incluidas en el apartado *Chapter 13 Infiltration system* se componen de áridos con un tamaño máximo de 6 mm. Junto a estos, que no se mencionan en dicho apartado, se encuentran las cunetas verdes que no siempre requieren de la presencia de árido, pues su principal función será transportar el agua.
- En técnicas encasilladas como sistemas de tratamiento pasivo donde se retiene un gran volumen de agua y se produce sedimentación por decantación, no se exige el uso de un tipo específico de árido. Son sistemas que se proyectan sobre suelos que poseen características y geometrías para frenar el agua y retenerlo durante un largo periodo de tiempo. En caso de exceso, cuentan con un desagüe superior.
- Cuando se trata de firmes permeables, alcorques o cubiertas verdes, se recurre a un tamaño de 20-40 mm para las capas estructurales y que posea una buena permeabilidad, almacenamiento de agua, porosidad y resistencia a la abrasión. No obstante, se puede profundizar más en cuanto al árido empleado según las capas:
    - Los alcorques poseen unos módulos para albergar las raíces en los que se empleará un árido de tamaño < 2 mm.
    - En los firmes permeables, se debe de realizar una base que permita el drenaje y resistencia a los movimientos en superficie. La granulometría para esta capa se comprende entre 4-6 mm normalmente.

A partir de los datos recogidos sobre las técnicas constructivas de SUDS y los áridos que estas requieren en su construcción, se determina aquellas que van a ser objeto de estudio en el presente documento. Se debe de tener en cuenta que se pretende introducir RCD como sustitutos de áridos en las capas granulares que forman las diferentes técnicas mencionadas, de manera que aquellas que no contienen árido quedan directamente descartadas.

Para este estudio, se toma la decisión de realizar ensayos en laboratorio sobre el comportamiento hidráulico que tendrán los RCD estudiados como capa de sub-base en firmes permeables y como relleno en los drenes filtrantes. Ambos sistemas son los más utilizados a nivel urbano y existen varios estudios al respecto. Además, está la posibilidad de proyectar áreas donde se pueda crear una cadena de SUDS conectando las dos técnicas, como puede ser un aparcamiento de firme permeable con drenes filtrantes en sus laterales.

4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos de este estudio se realizan en la Escuela Politécnica de Mieres (EPM) que forma parte de la Universidad de Oviedo en Asturias (España). Se desarrollan ensayos que permitan una primera toma de contacto con la temática, adaptándolos a las condiciones en cuanto a recursos que posee el laboratorio del centro y con el objetivo de realizar simulaciones lo más reales posibles siguiendo la normativa nacional.

4.1 JUSTIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS SUDS OBJETO DE ESTUDIO

En este apartado se explicarán las razones y el análisis desarrollado en cuanto a granulometría en el estudio realizado con anterioridad en colaboración con la Cátedra de COGERSA sobre la posibilidad de diseñar gaviones con relleno de RCD [52].

No obstante, existe una diferencia entre aquel estudio y este, pues el material empleado va a ser de granulometría inferior, aunque misma naturaleza. Por lo tanto, las granulometrías que se exponen son las indicadas en [53,54] y se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Granulometrías de RCD empleados en el presente estudio.

	Árido grueso de origen hormigón 0/32		Árido combinado de origen mixto 0/32	
Tamiz	% pasa	% retenido	% pasa	% retenido
40	100	0	100	0
31,5	94	6	95	5
22,4	70	30	62	38
16	54	46	60	40
11,2	40	60	50	50
8	32	68	40	60
5	25	75	36	64
4	20	80	30	70
2	15	85	20	80
1	12	88	16	84
0,5	10	90	15	85
0,25	7	93	10	90
0,063	3,5	96,5	5	95

4.1.1 Firmes permeables

Los firmes permeables son un subconjunto dentro de los SUDS que se encuadran como sistemas de infiltración. Como indica [6] se han postulado como la técnica más importante y que cuenta con múltiples trabajos de investigación desarrollados.

Están formados por una estructura multicapa que en superficie cuenta con un pavimento preparado para el tráfico peatonal y vehicular, que va a permitir la infiltración del agua de lluvia a través de la superficie, pasando posteriormente por todas las capas que lo componen. El agua podrá ser almacenada, infiltrada al terreno o descargada de manera controlada [35], y en caso de exceso, se dispone de un desagüe superior o superficial. Como se puede observar, es una técnica muy completa que ofrece infiltración, captación, transporte y almacenamiento, formando por sí mismo una cadena de drenaje sostenible.

La diferencia entre las tipologías existentes está basada principalmente en el material que se utiliza en cada capa y las dimensiones de esta. Sin embargo, la estructura se mantiene por lo general y se compone de los siguientes elementos:

- **Pavimento**. Capa superficial del firme con características estéticas y resistentes, que permiten la captación de la escorrentía superficial de las áreas adyacentes.
- **Base**. Capa a continuación que cuenta con granulometría 4-6 mm normalmente.
- **Sub-base**. Capa más inferior del firme con granulometría 20-40 mm que permite el almacenamiento del agua si así se diseñase, o su infiltración al terreno.
- **Explanada**. Capa que absorbe todos los esfuerzos. En caso de que el firme tenga función de recarga del suelo adyacente, esta capa debe tener una permeabilidad que lo permita.

Tal y como se indica, la sub-base de estos suele realizarse con áridos de diámetro entre 20-40 mm. En este caso, según los materiales reflejados en [52] que poseen granulometría 40/120 [55,56], se aprovecharía la fracción que pase por el tamiz UNE 40 y quede retenida en el tamiz UNE 20, correspondiendo con un 8% en el caso del RCD de origen hormigón, y un 10% en el caso del árido combinado de origen mixto.

Sin embargo, con los nuevos materiales estudiados, se puede aprovechar material hasta el tamiz 22,4 o realizar un tamizado propio que se ajuste a los diámetros requeridos. En cualquier caso, los porcentajes de aprovechamiento rondarían el 30% para el RCD de origen hormigón y el 38% para el RCD de origen mixto. Se ve como la fracción aprovechada es mucho mayor con este material que con el anterior, aumentando casi 4 veces en ambos casos. No obstante, para realizar los ensayos en este estudio, se ha querido simular la zahorra drenante empleada en España y se ha aprovechado el 100% de la granulometría de ambos materiales.

4.1.2 Drenes filtrantes

Los drenes filtrantes son dispositivos de drenaje que consisten en una zanja lineal rellena de material que permita la filtración del agua, pudiendo almacenarla o conducirla posteriormente. Para esta última función, se suele incluir una tubería perforada que recoge el agua de lluvia y lo lleva hacia un lugar establecido en el que se encontrará otro sistema. Para evitar la transmisión de finos al dren, se reviste con un geotextil.

El agua que reciben proviene de superficies impermeables colindantes, que son tratadas por una franja vegetal. Por eso, normalmente se localizan aguas abajo de técnicas de pretratamiento que elimine parte de los contaminantes y evite la colmatación del sistema [35]. Un ejemplo claro puede ser su funcionamiento en conjunto con firmes permeables en aparcamientos, o su actuación frente a firmes impermeables en autopistas. Las principales funciones que cumplen estos sistemas son de almacenamiento, tratamiento, transporte e infiltración.

Según la configuración del dren, se emplean distintos tipos de relleno. En una de ellas, se emplea material con diámetro comprendido entre 10-63 mm. Con los áridos estudiados en [52], se puede decir que corresponde al material que pasa por el tamiz UNE 63 y queda retenido en el tamiz UNE 20, representando un 26.3% en el RCD de origen hormigón y un 37.5% en el de origen mixto. Actualmente estos mismos áridos han cambiado de porcentajes en su granulometría, bajando a 25,6% y 29,6% respectivamente.

En el caso de los nuevos materiales estudiados, solo se podría aprovechar el porcentaje entre el UNE 40 y el UNE 11,2 o realizar nuevamente un tamizado para tener datos sobre el UNE 10. Los valores obtenidos son del 60% para el RCD de origen hormigón y el 50% para el RCD de origen mixto. Nuevamente los datos se ven incrementados notoriamente. Cierto es que, en este caso, no se estaría ajustando la granulometría a lo expuesto en las guías SUDS y sería conveniente complementar con los materiales 40/120. Para este estudio, al igual que en el caso de los firmes permeables, se simula una zahorra drenante y se aprovecha el 100% de la granulometría del material.

4.2 SIMULADOR DE LLUVIA

Para llevar a cabo los ensayos, se diseña un simulador de lluvia sencillo que se adapte a las características geométricas de los recipientes, permitiendo cubrir una superficie de área 0.0693 m^2. Este simulador se compone de tres hileras extraídas de un tramo de tubo D16, los cuales se encuentran unidos mediante codos y Tes. En cada hilera se realizan 3 perforaciones en las que se van a encajar los goteros por los que saldrá el agua

que simule la lluvia. Además, en dos de las esquinas del simulador, se conectan 2 tubos procedentes de una fuente de agua para permitir la llegada del flujo. Por lo tanto, las características que posee el simulador son las siguientes:

- Rango de intensidad: 60-540 mm/h
- Superficie: 0,0459 m^2
- Número de goteros: 9 (3 por hilera)
- Diámetro del gotero: 3,5 mm

De cara al ensayo, el simulador de lluvia se va a unir mediante bridas a una estructura de plástico tipo celda como las empleadas algunas veces en sub-base. Esta cuenta con una superficie mayor a la del recipiente que permite mantener el simulador sobre estos, tal y como se muestra en las imágenes:

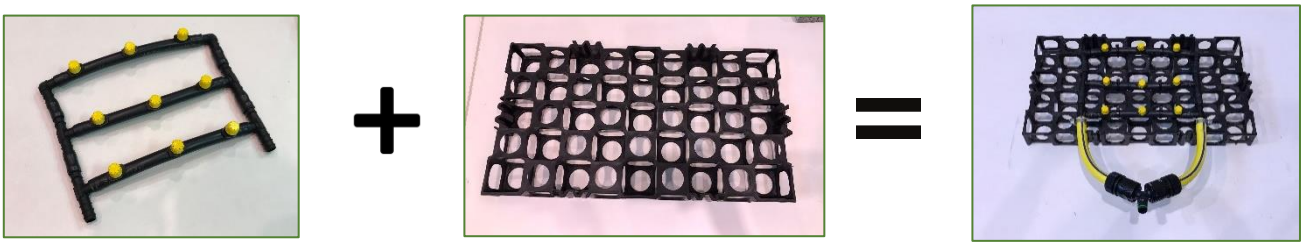


Figura 27. Simulador de lluvia empleado para la realización de los ensayos.

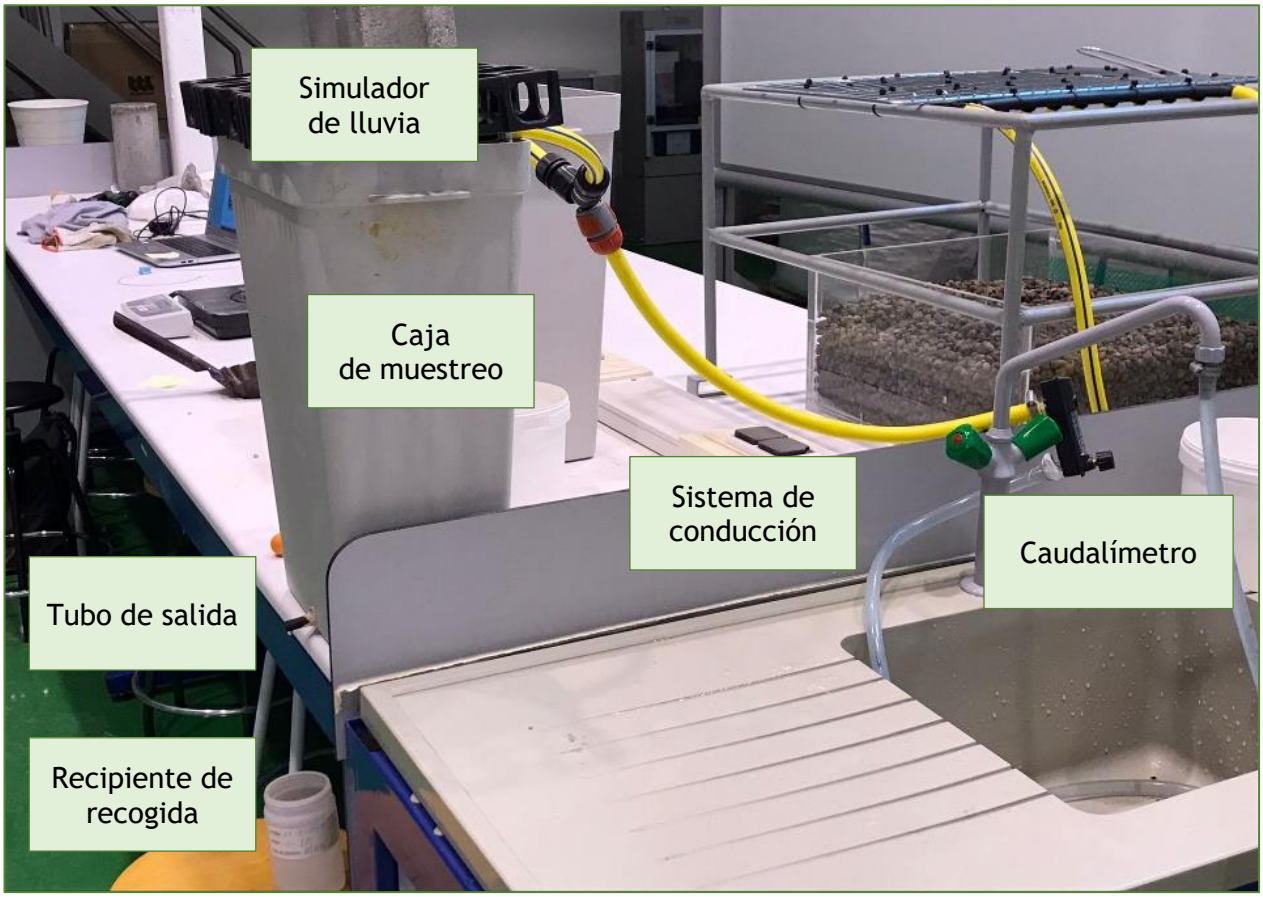


Figura 28. Configuración de elementos para realizar los ensayos.

Para controlar la lluvia del ensayo se van a emplear los caudalímetros disponibles en el laboratorio, los cuales son de aire y no de agua. Como solución se plantea una calibración que permita determinar las equivalencias entre los caudales marcados por el dispositivo frente a los reales que se proporcionan. Esta calibración consiste en medir para 3 caudales diferentes de los que se marcan en el dispositivo, el volumen de agua que sale para lluvias de 2 tiempos: 1 minuto y 5 minutos. Los resultados se recogen en la siguiente gráfica:

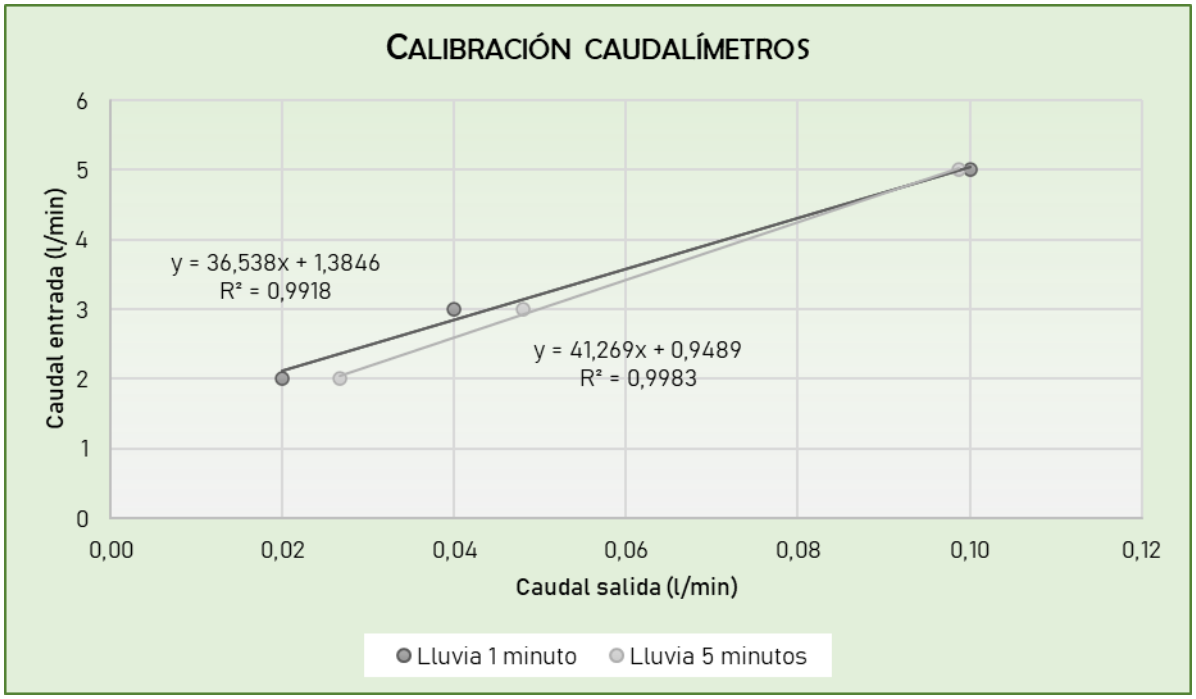


Figura 29. Gráfica de calibración de caudalímetros.

La gráfica se define tras realizar 3 pruebas para cada caudal y cada tiempo, lo que supone un total de 18 datos, y obtener una media representativa para eliminar errores estadísticos. Se observa que el caudal indicado por el dispositivo y el que realmente sale por el orificio inferior de los recipientes del ensayo difieren notoriamente. A pesar de que esto puede llevar a confusión, se determina que la calibración es correcta con el respaldo de que el conducto de salida en ningún momento estuvo a sección completa ni el recipiente aumentó su lámina de agua, indicando que todo el caudal que entraba estaba saliendo.

A partir de las ecuaciones de ajuste que se reflejan en la gráfica, se puede determinar qué caudal hay que marcar en el dispositivo para obtener el que realmente se quiere. En este caso, para la ecuación de la lluvia de 5 minutos se obtiene un caudal de 10,21 l/min, y para la lluvia de 1 minuto el caudal es de 9,59 l/min. A pesar de que el ajuste de la primera es mejor que el de la segunda, la diferencia de resultado ronda el 6% y por lo tanto se decide hacer una media entre ambos datos. Finalmente, se define que se empleará un caudalímetro en el cual se marca un caudal de 9,9 l/min aproximadamente.

4.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para la configuración de cada sección se emplean contenedores como se muestra en la imagen inferior. En este caso, se decide utilizar siempre los mismos 3 cubos para realizar al mismo tiempo los ensayos de un mismo material, y limpiarlos cada vez que se cambie. A cada uno se le realiza un agujero en la parte inferior en el que se acopla un trozo de tubería para poder evacuar el agua una vez atraviese toda la sección. A continuación, se muestra una imagen de las 9 muestras creadas e identificadas según sean de árido calizo (Control), RCD de origen hormigón (RDCH) y RCD de origen mixto (RCDM), junto con una imagen en planta de la superficie sobre la que actúa el simulador de lluvia.

Figura 30. *Recipientes de las muestras para los diferentes ensayos: (1) Muestra control, (2) Muestra RCDH y (3) Muestra RCDM.*

La configuración de las secciones viene respaldada por las siguientes simplificaciones que también pueden verse en [6,8,57] :

- En el caso de los firmes permeables, en las muestras solo se va a incluir la capa correspondiente al material estudiado, es decir, solo se estudia la capa de sub-base sin el resto de los elementos que formarían la sección completa. Para los drenes filtrantes se suprime la presencia de un tubo ranurado en su interior.
- Las granulometrías en sub-base de firmes permeables y en el relleno de los drenes filtrantes son de 10-63 mm y 20-40 mm respectivamente. A falta de normativa específica sobre SUDS, se recurre al PG-3 donde se refleja un tipo de zahorra drenante denominada ZAD 0/20 y por lo tanto las dos secciones planteadas se ajustarán a esta granulometría.
- El espesor de la sub-base en firmes suele ser de 35 cm. Los drenes filtrantes por su parte tienen profundidades de 1-2 m. Sin embargo, existe la posibilidad de reducir dicha profundidad como en [57]. Por lo tanto, en ambos casos se establecen secciones de espesor 40 cm.

De cada material se realizan 3 muestras para obtener un valor medio representativo, con una intensidad de ensayo de valor 194,4 mm/h. Dadas las simplificaciones comentadas, es posible emplear una misma muestra como representación de los drenes y de la sub-base de los firmes permeables, de manera que finalmente se simplifique el número de ensayos a la mitad y se haga un total de 9 ensayos (3 de cada material).

4.4 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

4.4.1 Condiciones y etapas del ensayo

Se pretende simular en laboratorio el comportamiento hidráulico de los firmes permeables y drenes filtrantes con diferentes materiales en la sub-base y en el relleno respectivamente. El objetivo es estudiar si el material reciclado de RCD procedente de COGERSA podría sustituir a la zahorra en las capas mencionadas, analizándolo desde un punto de vista de gestión de la cantidad de escorrentía superficial generada.

Para dicha simulación, se va a emplear una intensidad de lluvia correspondiente a las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la ciudad de Barcelona recogida en la siguiente imagen [58].

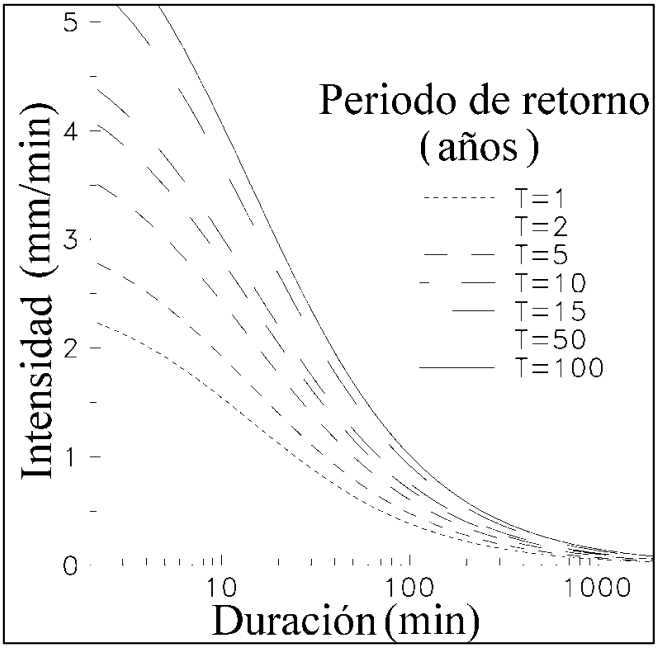


Figura 31. *Curvas IDF para la ciudad de Barcelona* [58]

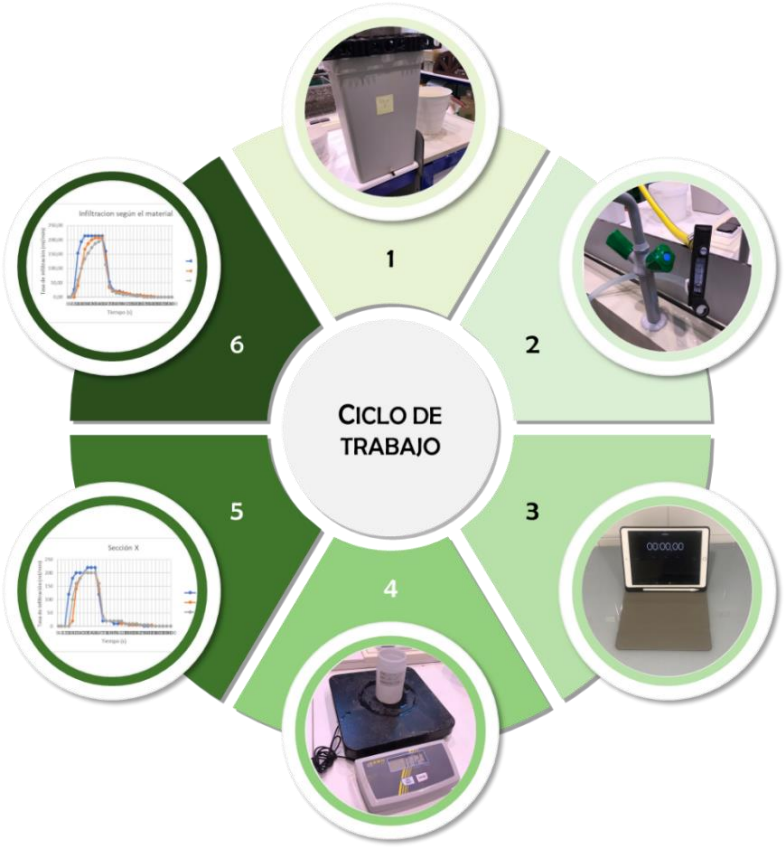
A pesar de que inicialmente se sopesó la idea de analizarlo para un período de retorno T= 10 años, finalmente se apuesta por T=25 años puesto que los firmes es habitual diseñarlos para una vida de 25 años y los drenes se incluyen en el apartado de drenaje longitudinal de la *Norma 5.2 – IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras*, la cual refleja que para su diseño se opta por un T= 25 años. En base a otros estudios desarrollados [6,8,57], se decide un tiempo de lluvia de 10 minutos que corresponde con los valores habituales. Observando las curvas anteriormente mencionadas y aplicando su ecuación generalizada [58], se obtiene una intensidad de lluvia Id = 3,2 mm/min = 194,4 mm/h, que supone una precipitación p = 32,4 mm.

Conocida el área de ensayo de los recipientes A=0,0693 m^2, optando por un coeficiente de escorrentía C=1 y con la intensidad anteriormente obtenida, se aplica el método racional para poder determinar el caudal que va a ser necesario circular por el simulador de lluvia durante los ensayos. Para llevar un control de este, se acopla un caudalímetro entre la fuente de agua y el simulador que permita regular el flujo que circula.

$$Q = C \cdot I \cdot A = 1 \cdot 194{,}4 \cdot 0{,}0693 = \mathbf{13{,}469\ l/h = 0{,}224\ l/min}$$

Conocidos estos datos de partida y con las muestras ya configuradas, se realiza el ensayo para cada una siguiendo los siguientes pasos:

1. Se sitúa el simulador de lluvia sobre la superficie del material que se desee estudiar y se pone un recipiente para recoger el agua que sale por el agujero inferior realizado al recipiente.
2. Se abre la fuente de agua y se regula el caudalímetro hasta establecer el valor anteriormente calculado.
3. Una vez comienza a salir el agua por los goteros, se acciona el cronómetro y se mide el tiempo tanto de lluvia como de descarga una vez se corta el suministro del flujo.
4. Cada minuto, se pesa el recipiente que recoge el agua para saber cuánto se infiltra desde que comienza la lluvia hasta que sale la última gota por el agujero inferior. Es necesario tener otro recipiente para seguir recogiendo agua durante el tiempo que se está pesando.
5. Con los datos recogidos de los 3 ensayos de un mismo material, se hace la media y se dibuja el hidrograma que describe.
6. Se comparan los datos medios de los material para analizar su comportamiento hidráulico.



4.4.2 Características de los materiales ensayados

Para realizar los ensayos de laboratorio, se van a configurar 3 secciones con mismos espesores de capa, pero que difieren entre ellos en el material empleado, que van a ser una caliza común que se tiene en el laboratorio (Control), RCD de origen hormigón (RCDH) y RCD de origen mixto (RCDM). Estos dos últimos proceden del vertedero de inertes de COGERSA, por lo que fue necesario acudir a la planta para su transporte y acopio en el laboratorio.

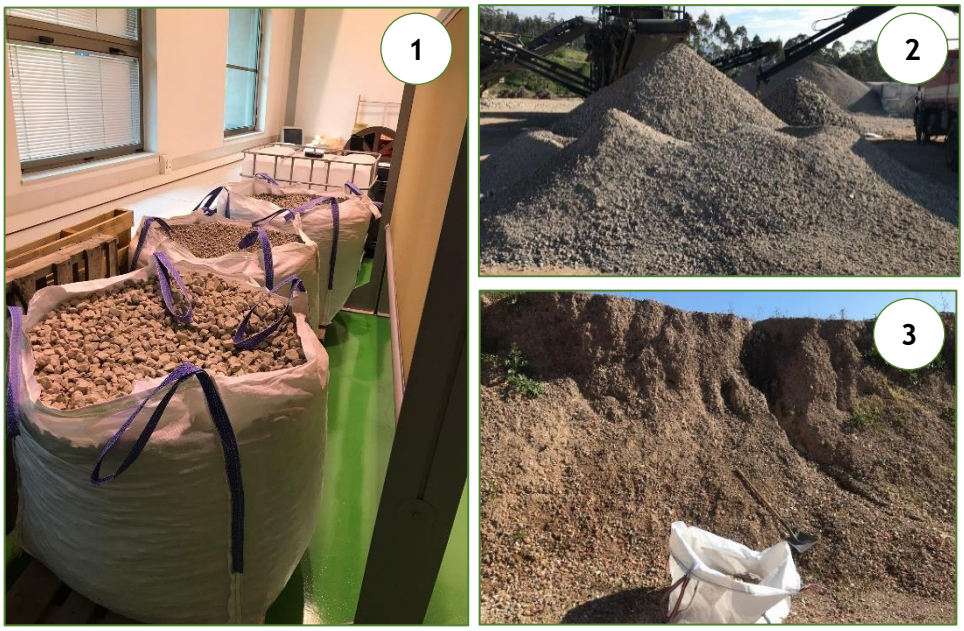


***Figura 32**. Materiales empleados para el ensayo: (1) Material calizo en laboratorio, (2) RCD de origen hormigón en vertedero y (3) RCD de origen mixto en vertedero.*

Las granulometrías de los materiales van a establecerse en base a lo indicado en el PG-3 sobre firmes [59], donde se reflejan datos respecto a la zahorra drenante ZAD 0/20. Realizando un tamizado en laboratorio sobre el material control y con los datos proporcionados por COGERSA sobre el material reciclado [53,54], se obtienen las siguientes granulometrías:

***Tabla 7.** Granulometría de los materiales ensayados frente a la ZAD 0/20.*

Tipo de material	Apertura de los tamices UNE (mm)									
	40	32	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,063
ZAD 0/20	-	100	65-100	47-78	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2
Árido calizo	-	100	65	47	33	14	0	0	0	0
RCD Hormigón	-	100	70	47	32	20	15	10	7	3,5
RCD Mixto	-	100	58	52	40	30	20	15	10	5

Como se recoge en la tabla, la granulometría de los RCD empleados es más cerrada respecto a la zahorra drenante, pues en los tamices más pequeños los porcentajes son más elevados. En el caso de la caliza, la granulometría es más abierta. No obstante, en todos ellos se cumple la condición de que el cernido por el tamiz 0,063 mm es menor que 2/3 del cernido por el tamiz 0,250 mm.

En cuanto a composición, la muestra Control se configuró a partir de 3 sacos de granulometría diferente pero mismas características, por lo que se considera homogéneo. El árido reciclado RCDH se compone de residuos de hormigón principalmente, aunque puede contener algún resto que no corresponda a este material. Por su parte, el árido reciclado RCDM es el más heterogéneo de los ensayados, pudiendo causar variabilidad entre las muestras diseñadas.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ensayó una sola intensidad de lluvia (194,4 mm/h) correspondiente a un T=25 años y t=10 min, obtenida a partir de las curvas IDF de la ciudad de Barcelona dad la ausencia de estos datos en el Principado de Asturias, provincia en la cual se está realizando el ensayo. Hay que recordar que las secciones estudiadas fueron la de estándar con grava (CONTROL), la compuesta con RCD de origen hormigón (RCDH) y la compuesto con RCD de origen mixto (RCDM).

Durante el ensayo se analizó el comportamiento hidráulico de cada sección estudiando las tasas de infiltración obtenidas por minuto a través del tubo inferior dispuesto en el recipiente de las muestras. Cuando las infiltraciones por minutos obtenidas eran inferiores a 20 ml/min, se alarga el periodo de tiempo otro minuto más, de manera que, si se hacían tomas de 4 minutos y la infiltración no superaba los 20 ml/min, se tomaba como nula y se paraba el ensayo. Los resultados pueden apreciarse en el ***Anexo II*** de este documento.

En este apartado, se comentan los resultados de cada sección de manera individual mostrando los hidrogramas de las 3 muestras de cada material. Posteriormente, se hará un análisis en conjunto mediante las medias representativas que se han obtenido.

5.1 SECCIÓN CONTROL

Con este tipo de sección se pretende emplear como relleno un material común en España que simulase la configuración estándar de los firmes permeables y drenes. A partir de 3 granulometrías diferentes de material calizo, en este caso grava, se crea un material continuo que se asemejase a la zahorra drenante ZAD 0/20 que recoge el PG-3. Esta muestra, por lo tanto, servirá como base para comparar el comportamiento de los materiales reciclados de estudio en este documento.

En los ensayos realizados, el flujo comenzó a salir por la tubería a partir del primer minuto, aunque en una de las muestras no se aprecia efluente hasta que se supera el segundo minuto. No obstante, la tasa de infiltración en el minuto 3 de esta muestra es el doble a la que se recoge en el primer minuto de las otras, lo que puede interpretarse como que el flujo se produce en el límite entre el minuto 1 y el minuto 2. También se debe de tener en cuenta la variabilidad que aporta una posible diferencia de pendiente en el tubo de cada muestra preparada.

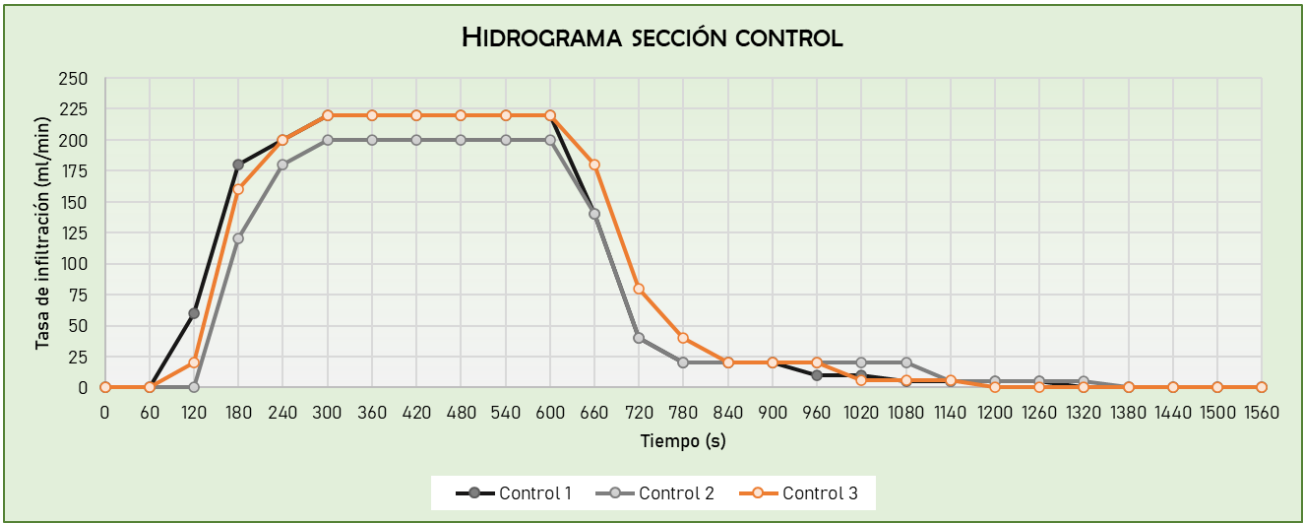


Figura 33. *Hidrograma obtenido en los ensayos de laboratorio de la sección CONTROL.*

El valor del efluente es muy próximo al caudal punta (90,6%) al transcurrir 4 minutos desde que se comienza la lluvia simulada. El caudal punta medio observado es de 213,33 ml/min, que es alcanza una vez transcurridos 5 minutos de la lluvia.

Una vez se alcanzan los 10 minutos de lluvia, se corta la aportación de agua y se aprecia como la sección muestra una infiltración próxima a los 150 ml/min transcurrido 1 minuto del cese de la lluvia. Finalmente, una vez superados los 11-12 minutos, se puede considerar como nula la tasa de infiltración y determinar la duración del ensayo en 21-22 minutos.

Es de interés representar la curva que representa el volumen acumulado aportado por la sección desde el comienzo del evento de lluvia hasta que cesa el volumen del efluente. Se aprecia como la tendencia es linealmente ascendente hasta el instante en el cual la tasa de infiltración sufre un descenso muy drástico y, por lo tanto, la aportación es mínima mostrando una recta casi horizontal hasta el cese total.

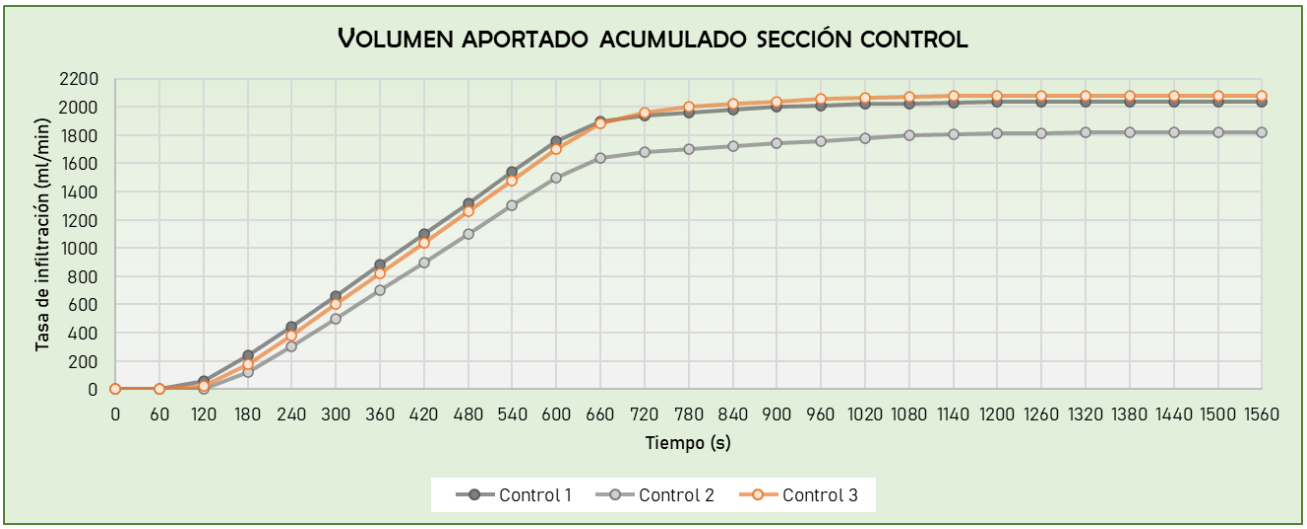


Figura 34. Representación del volumen aportado acumulado de cada muestra de la sección CONTROL.

5.2 SECCIÓN RCDH

En esta sección se emplea como relleno los RCD de origen hormigón que se recogieron en el vertedero de inertes de COGERSA. En este caso, la granulometría ya venía definida en la declaración de prestaciones que proporciona la empresa, pudiendo observar similitudes con la ZAD 0/20 que se tiene como guía. No obstante, la zona más fina del material presentaba un ligero exceso respecto a los varemos que impone el PG-3.

En los ensayos realizados, se apreció que el flujo no comenzaba a obtenerse volumen de efluente hasta el minuto 4, observando en una de las muestras la salida de caudal en el minuto 3. Al contrario que ocurría en la sección anterior, el volumen de infiltración obtenido es similar al de las otras muestras un minuto más tarde, por lo que no se puede decir que la salida se encuentre en el límite entre las dos franjas de tiempo. En este caso, dicha diferencia puede atribuirse a la granulometría de la muestra ya que el material se incorpora directamente de los sacos transportados al laboratorio sin realizar el tamizado como con el material calizo. Además, volverá a tener influencia la pendiente del tubo de salida.

Determinado el punto medio de salida del flujo en los minutos 3-4, la curva del hidrograma se encuentra desplazada respecto a la de la sección CONTROL. Esta retención del flujo puede deberse en parte a la configuración del material debido a que la granulometría es más cerrada de lo indicado en cuanto a finos. De hecho, se necesitó repetir uno de los ensayos por exceso de “polvillo” que al humedecerse embarraba la muestra y falseaba los resultados.

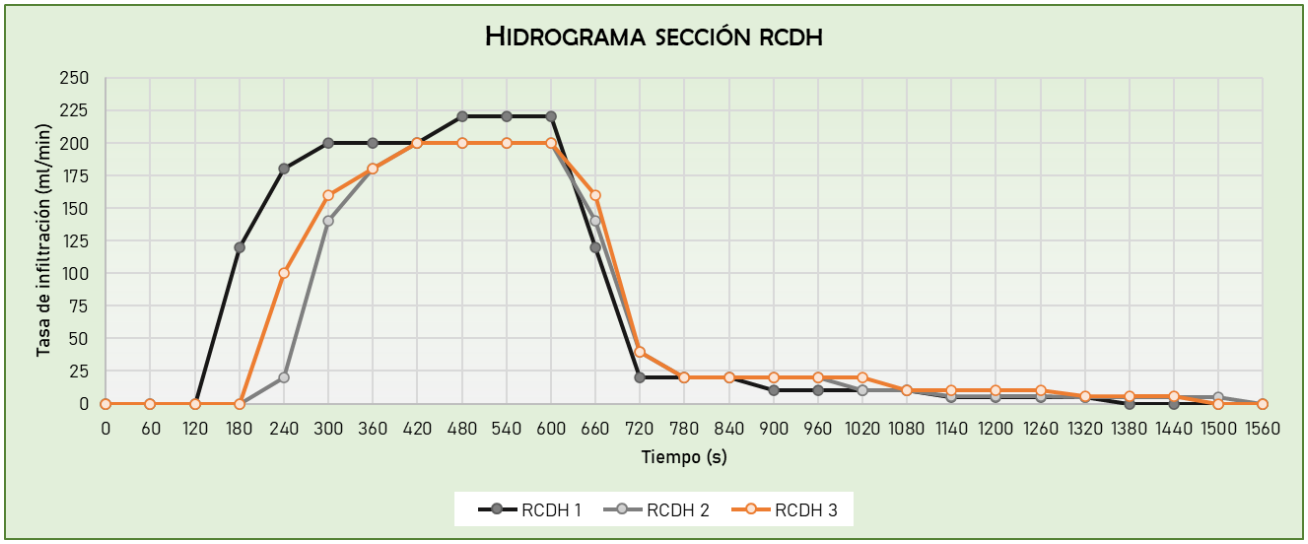


***Figura 35**. Hidrograma obtenido en los ensayos de laboratorio de la sección RCDH.*

Tras los primeros 6 minutos de lluvia, se aprecia un valor del efluente muy próximo al caudal punta (90,3 %), consiguiendo este en el minuto 8 con un valor medio de 206,67 ml/min. Tras los 10 minutos del evento de lluvia simulado, la reacción de la sección es inmediata mostrando infiltraciones de 140 ml/min pasado 1 minuto del cese, e infiltraciones de 40 o 20 ml/min a los 2 minutos. El ensayo se dará por finalizado al superar una media de 25 minutos, es decir, tras 15 minutos de terminar el evento de lluvia.

Este último dato muestra un retraso de 3 minutos respecto a la sección CONTROL, el cual puede estar marcado por la retención inicial del flujo que presenta este material. Además, observando el volumen acumulado que aporta la sección, se aprecia una linealidad ascendente hasta aproximadamente los 11-12 minutos de comenzar la lluvia, y una horizontalidad hasta que deja de aportar caudal. En este caso, el volumen máximo es de media 1617,67 ml, siendo 361,67 ml inferior al obtenido en la sección CONTROL.

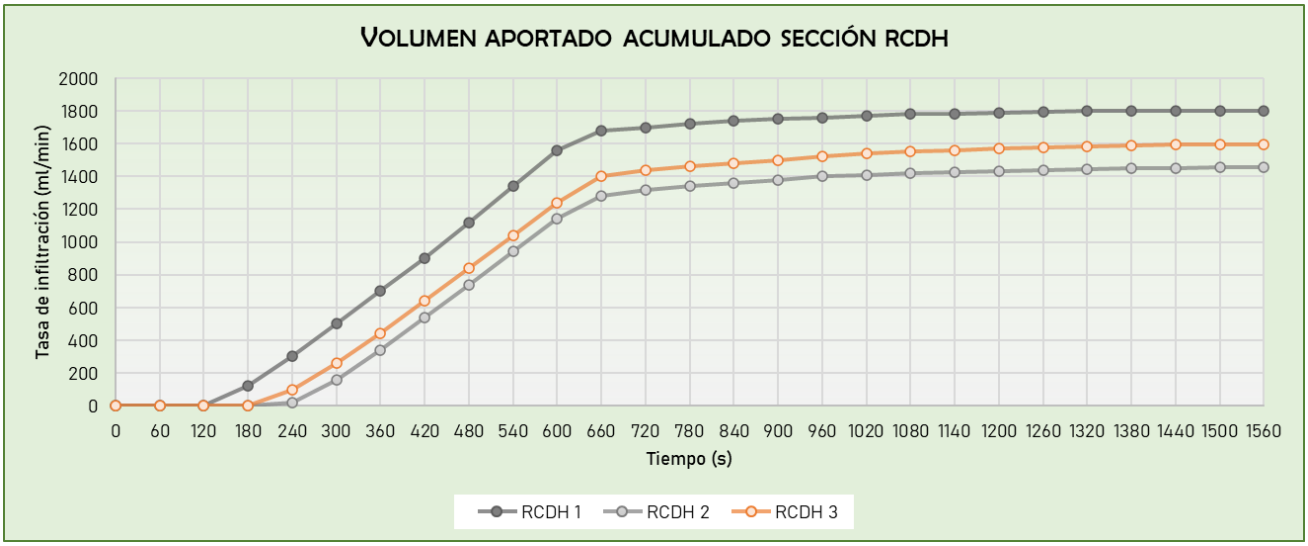


***Figura 36**. Representación del volumen aportado acumulado de cada muestra de la sección RCDH.*

5.3 SECCIÓN RCDM

La segunda sección de material reciclado que se va a ensayar se compone de RCD con origen mixto y que también se ha recogido en el vertedero de inertes de COGERSA. Al igual que el material anterior, su granulometría se define en la declaración de prestaciones que aporta la empresa. La comparación con la ZAD 0/20 del PG-3 es muy similar al material de origen hormigón, presentando nuevamente un ligero exceso en la zona fina.

En este caso, los ensayos mostraron que el flujo comenzaba a salir por el tubo inferior a partir del minuto 2, a excepción de una muestra que comenzó poco antes y su vertido figura a partir del minuto 1. Su comportamiento inicial se encasilla en un término medio entre la sección CONTROL y la sección RCDH, pero mostrando una pendiente de descarga más suave que en ambos casos.

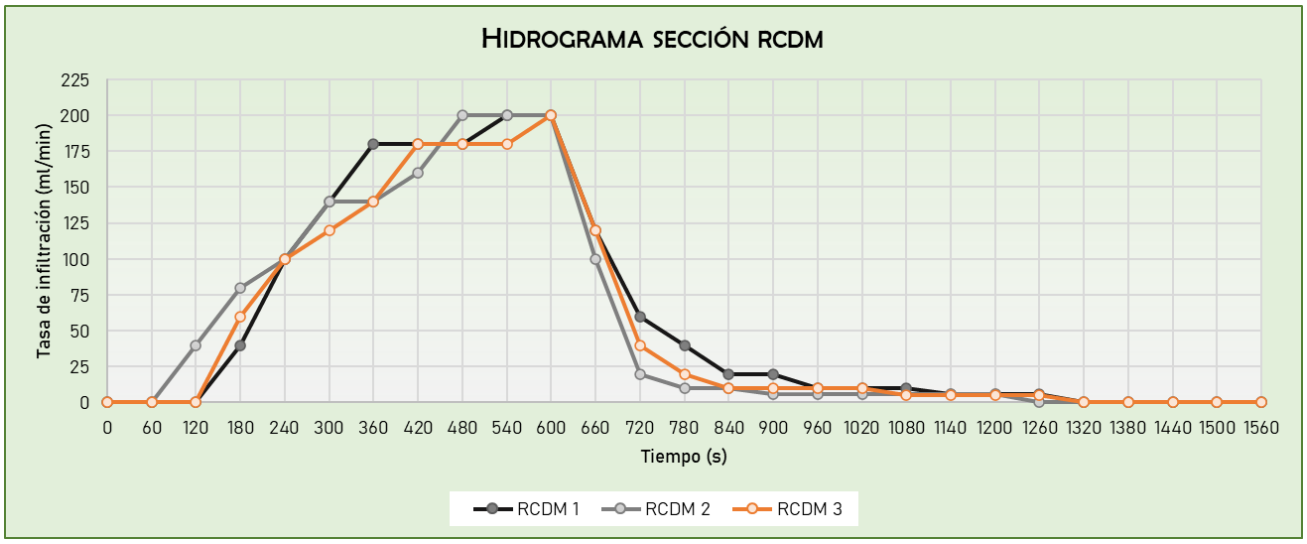


Figura 37. Hidrograma obtenido en los ensayos de la sección RCDM.

A consecuencia de esta lenta transición, no se alcanza un efluente del 86,67 % el caudal medio pico hasta que transcurren 7 minutos del evento de lluvia simulado. Además, el valor pico de 200 ml/min se obtiene en torno a 9-10 minutos desde que comienza la lluvia, es decir, casi finalizado el evento. El hidrograma representado muestra una atenuación en la descarga que podría indicar la necesidad de un segundo evento de lluvia para asegurar que se puede alcanzar el caudal pico.

Una vez cortado el suministro del agua al simulador de lluvia tras los 10 minutos de evento, se produce un descenso crítico de la tasa de infiltración, alcanzando valores de 100-120 ml/min tras 1 minuto del cese, y pasando a 20-40 ml/min a partir del minuto 2. Finalmente, la infiltración se considerará nula cuando pasan aproximadamente 11 minutos desde el final de la lluvia, es decir, que el ensayo tendría una duración de 21 minutos.

La diferencia entre ambos materiales reciclados puede venir condicionada por la variabilidad de material en este segundo, al ser de origen mixto y por lo tanto tener características muy cambiantes que condicionan su comportamiento. Puede observarse también como la retención de flujo fue superior en la sección RCDM que en la sección RCDH, aportando un menor volumen de agua.

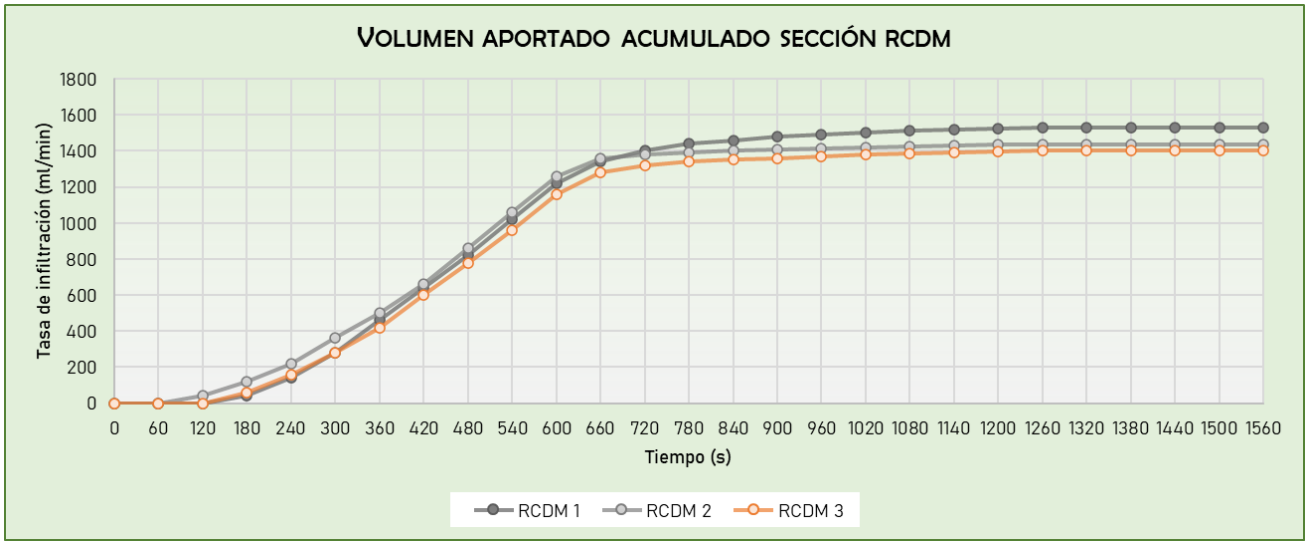


Figura 38. Representación del volumen aportado acumulado de cada muestra de la sección RCDM

5.4 COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS DE LAS SECCIONES

Dada la variabilidad que puede existir entre cada configuración de la sección dentro de un mismo ensayo, se decidió realizar 3 de cada material para obtener un valor medio estadístico que sirviese como representación del ensayo. Una vez obtenidos los resultados, se representan gráficamente los valores medios de los 3 tipos de secciones para comparar su comportamiento.

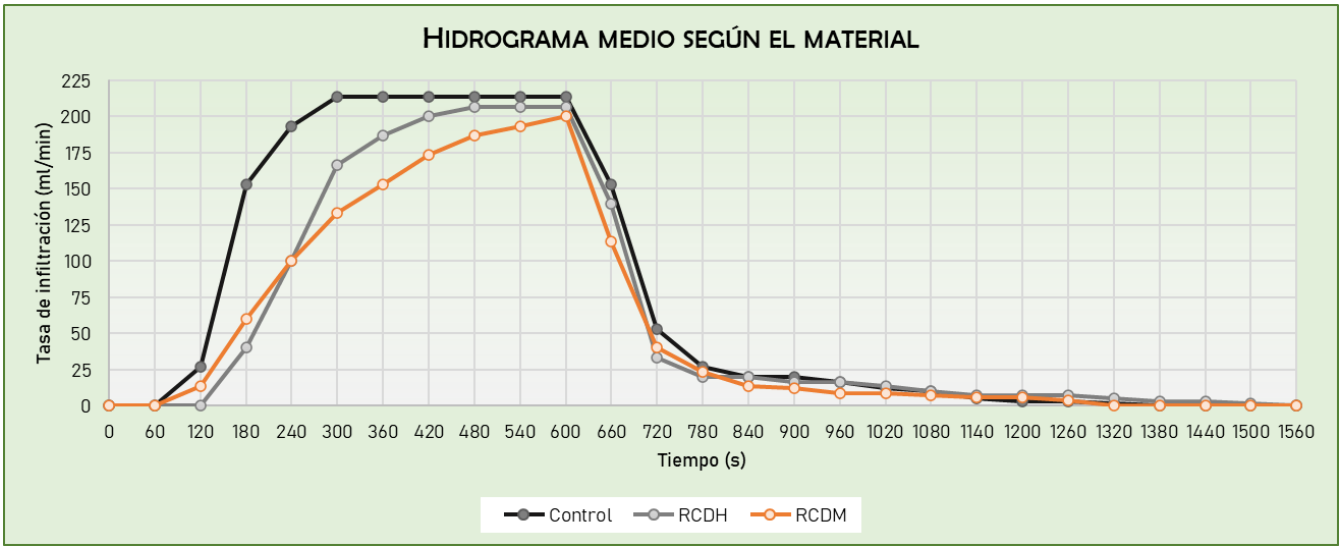


Figura 39. Hidrograma medio obtenido en los ensayos de laboratorio de cada sección.

En cuanto a la descarga, se puede apreciar que la sección CONTROL proporciona una mayor rapidez para evacuar el caudal de entrada, presentando el caudal pico de 213,33 ml/min a los 5 minutos de comenzar la lluvia. Los materiales reciclados presentan una atenuación del flujo superior a la del material estándar, siendo la sección RCDH la que más tarda en aportar flujo, pero la primera en alcanzar un caudal pico de 206,67 ml/min (8 minutos). Por el contrario, la sección RCDM tiene un inicio de aportación como la sección CONTROL, pero aportando un caudal inferior y con pequeños incrementos, presentando una descarga lenta y retardando el caudal pico de 200 ml/min hasta el minuto 10 del evento de lluvia. A partir del minuto 4, el caudal de efluente de la sección RCDM es inferior a la del RCDH, coincidiendo nuevamente en el cese de la simulación.

A partir de este último punto en el que termina la lluvia, las 3 secciones presentan un comportamiento muy similar al reducir las tasas de infiltración drásticamente. No obstante, la más crítica es la sección RCDM con una reducción del 43,3%, mientras que la sección RCDH un 32,3% y la sección CONTROL se reduce un 28,1%. Sin embargo, es la sección RCDH la que requiere de un mayor tiempo para dejar de aportar agua (15 minutos) mientras que las otras dos secciones presentan tasa de infiltración nula a los 11-12 minutos del cese.

El orden en cuanto a reducción de infiltración tras terminar el evento de lluvia coincide con el orden de los valores de caudal pico de menor a mayor, así como de las aportaciones de volumen de agua por el tubo inferior de las muestras, tal y como se aprecia en la siguiente gráfica.

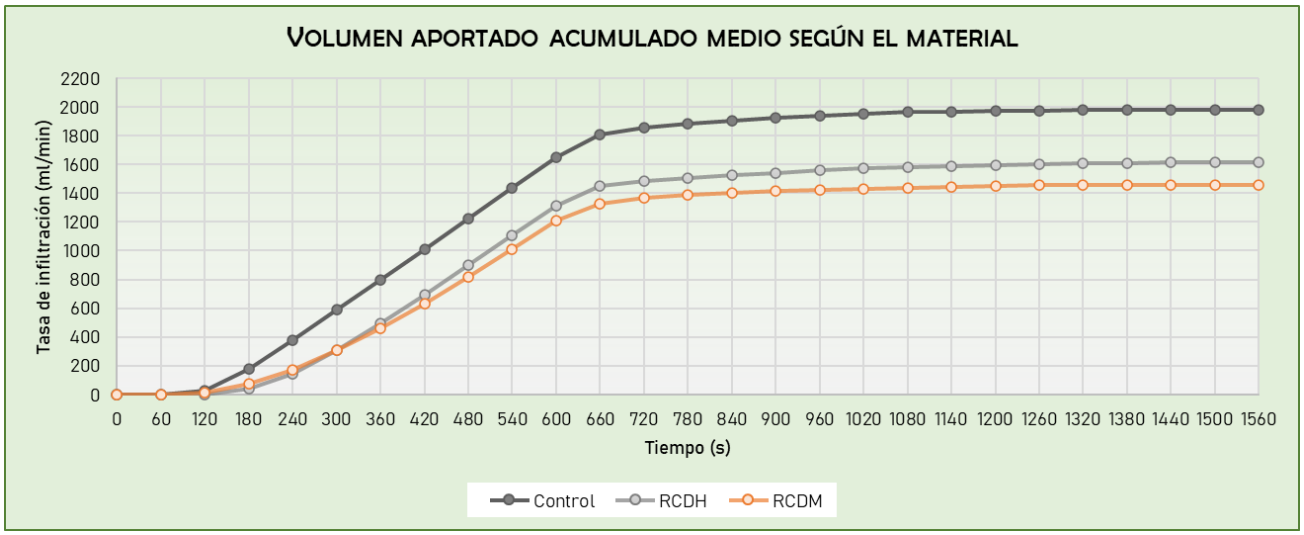


Figura 40. *Representación del volumen aportado acumulado medio de cada muestra.*

Se ve que en los 3 casos la tendencia hasta el minuto 11-12 es linealmente ascendente, presentando posteriormente una horizontalidad debido a la disminución de la tasa de infiltración, siendo mayor en la sección RCDM donde la bajada tras el cese de la lluvia era más pronunciada. La aportación de volumen por parte de la sección CONTROL es claramente destacada con 1.979,3 ml, mientras que la sección RCDH aporta un 81,7 % de la aportación de la sección CONTROL(1.617,67 ml) y la sección RCDM un 73,5% de la aportación de la sección CONTROL (1.454,67 ml)

6 CONCLUSIONES

Una vez concluidos los ensayos y haber obtenidos los resultados anteriormente expuestos, se extraen las siguientes conclusiones:

1. Una sección de material estándar según la granulometría impuesta en el PG-3 en España, presenta una primera infiltración tras 1 minuto ante eventos de lluvia como el ensayado.
2. Una sección de material estándar según la granulometría impuesta en el PG-3 en España alcanza el caudal punta de infiltración dentro de los primeros 5 minutos de un evento de lluvia como el ensayado.
3. Una sección RCDH inicia la descarga con un retraso de 2-3 minutos respecto a la sección CONTROL, alcanzando su caudal pico con la misma diferencia de tiempo, para eventos de lluvia como el ensayado.
4. Una sección RCDH deja de aportar agua tras 15 minutos del cese de la lluvia, siendo este tiempo 3 minutos superior al de la sección CONTROL. Además, aporta un 81,7 % del volumen de agua que aporta una sección CONTROL.
5. La sección RCDM inicia la descarga en un tiempo igual al de la sección CONTROL, pero las tasas de infiltración son muy inferiores y por lo tanto posee mayor atenuación, necesitando como mínimo un evento de lluvia completo de 10 minutos para alcanzar su caudal pico.
6. Una sección RCDM deja de aporta agua a la par que una sección CONTROL, pero cediendo en total un 73,5% del volumen de agua que aporta una sección CONTROL.
7. Todas las secciones muestran un caudal pico de salida inferior al de entrada, siendo indicativo de cierto almacenamiento o absorción por parte de los materiales.
8. La sección CONTROL alcanza un mayor caudal pico (213,33 ml/min) que las secciones de materiales reciclados, siendo la sección RCDM la que menor caudal pico alcanza (200 ml/min). En este último caso, sería necesario un evento de lluvia con mayor duración para comprobar si realmente es un caudal pico.
9. El exceso de finos en la granulometría del relleno reciclado de las secciones RCDH y RCDM, ocasiona una mayor retención de flujo y desplazamientos en el hidrograma.
10. En cuanto a comportamiento hidráulico, los RCD empleados encajan con un material estándar para unas condiciones de lluvia como las simuladas. El hidrograma que presentan los materiales reciclados está más atrasado que el del material calizo y con tiempos de inicio muy cercanos, indicando que no presentan impermeabilización de la sección, pero si mayor atenuación.
11. Para la configuración de SUDS que tengan el fin de aprovechar el agua infiltrado, los RCD estudiados presentan menor capacidad de aportación de agua debido a la absorción por parte del material.
12. Lo materiales RCD estudiados, serán más competentes para técnicas SUDS con el fin de disminuir la cantidad de escorrentía que para aquellos que pretendan un almacenamiento y aprovechamiento del flujo.
13. En el caso de los firmes permeables, se exigen unas condiciones mecánicas para su configuración. Los RCD de estudio presentan principalmente un coeficiente de Los Ángeles elevado que puede comprometer su aplicación en esta técnica.
14. Cumpliendo con las granulometrías que reflejan las diferentes guías y manuales de SUDS, para configurar un firme permeable se aprovecharía aproximadamente un 30% de la granulometría del RCDH y un 38% del RCDM. Para configurar drenes filtrantes, se aprovecharía un 60% del RCDH y un 50% del RCDM. En este último caso, también se podría recurrir a emplear las muestras de materiales con granulometría 40/120 para completar con el material que pasa por el tamiz UNE 63.
15. Siguiendo el PG-3 y tomando como referencia la zahorra drenante ZAD 0/20, se aprovecha el 100% de la granulometría del RCDH y del RCDM en ambos sistemas siempre y cuando se reduzca el porcentaje de finos y cumpla con los baremos impuestos.

7 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Con el estudio que se ha realizado y plasmado en este documento, se pretende llevar a cabo una primera toma de contacto con la temática de introducir materiales reciclados, concretamente RCD de vertedero de inertes, en la estructura granular de las técnicas SUDS. Los resultados obtenidos aportan una referencia sobre el comportamiento hidráulico que tienen estos materiales frente a una estructura estándar según la normativa española de carreteras, el PG-3.

No obstante, para finalizar el estudio, se plantean las propuestas para futuras líneas de investigación que han ido surgiendo a lo largo del trabajo y que pueden llegar a complementar lo aquí presente además de servir como temática para futuros proyectos, publicaciones o trabajos a nivel universitario sobre la aplicación de RCD en el diseño de SUDS:

1. Estudiar la influencia de intensidades de lluvia y la duración del evento de lluvia en las tasas de infiltración de las distintas secciones propuestas.
2. Estudiar el fenómeno de la evapotranspiración del agua de lluvia almacenada en el material granular de cada sección.
3. Estudiar el comportamiento hidráulico añadiendo nuevos elementos que complementen la sección como pueden ser pavimentos y geotextiles para firmes permeables, y recubrimientos naturales y tubos ranurados para el caso de los drenes filtrantes.
4. Estudiar la influencia de la granulometría en el comportamiento hidráulico de la sección modificando los porcentajes en cada tamiz y analizando la capacidad de almacenamiento del sistema.
5. Estudiar las características físicas y mecánicas de los materiales para su compatibilidad como capa estructural según las guías SUDS.
6. Mejora de los medios empleados para la realización del ensayo para conseguir mayor precisión en el pesaje del efluente por el tubo inferior, mejor tamizado de los materiales, empleo de un caudalímetro de agua más preciso y empleo de un simulador de lluvia que permita intensidades mayores.
7. Estudiar las características del agua efluente en las distintas secciones creadas, analizando parámetros como el pH, sólidos en suspensión o temperatura.
8. Diseñar y estudiar el comportamiento de un sistema con material RCD en su estructura granular en una aplicación real como aparcamientos o autopistas.
9. Analizar y monitorizar la pérdida de la capacidad de infiltración de las secciones planteadas ante diversas circunstancias de su entorno, pudiendo emplearse como referencia de mantenimiento.
10. Estudiar la viabilidad económica del diseño, construcción y mantenimiento las secciones con RCD.
11. Estudiar la aplicación de materiales RCD como parte de la estructura granular de otras técnicas SUDS.

8 REFERENCIAS

1. Gómez Delgado, M. El estudio de los residuos: definiciones, tipologías, gestión y tratamiento. *Ser. geográfica* 1995, 21–42.
2. Ramírez, A. La construcción sostenible. *Física y Soc.* 2009.
3. Trapote Jaume, A. Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible. *J. Eng. Technol.* 2016, *5*, 26–40.
4. Perales Momparler, S.; Doménech, I.A. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. *Equip. y Serv. Munic.* 2007, *24*, 66–77.
5. Fresno, D.C.; Bayón, J.R.; Hernández, J.R.; Muñoz, F.B. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia* 2005, *30*, 1–25.
6. Rodríguez Hernández, J. 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 tráficos ligeros. 2008.
7. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Rodriguez-Hernandez, J.; Castro-Fresno, D. Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). 2012, 137.
8. Sañudo-Fontaneda, L.A. Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones. 2014, 1–448.
9. Jarosińska, E.; Gołda, K. Increasing natural retention – Remedy for current climate change in urban area. *Urban Clim.* 2020, *34*, 100695.
10. August; Bonmatí, X.G. Conceptos Generales Sobre Residuos. *Evaluación y prevención riesgos Ambient. en Centroamérica* 2008, 207–213.
11. Zaror Zaror, C.A. Introducción a la ingenieria ambiental para la industria de procesos. *Ecol. Eng.* 2015, *1*, 500.
12. Adaguisla, F. Actividad humana e impacto ambiental. 2019, *14*, 131–144.
13. Groot, R. De Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Ecosistemas* 2007, *16*, 4–14.
14. Accinelli Gamba, E.; De la FuenteGarcía, J.L. Responsabilidad social corporativa, actividades empresariales y desarrollo sustentable Modelo matemático de las decisiones en la empresa. *Contaduría y Adm.* 2013, *58*, 227–248.
15. Haydee, A.; Reguero, M.; Rodriguez, Y.D. SUDS : Metodología de cálculo y experiencias en áreas urbanas. 2015, 111.
16. Espacio de Pensamiento Circular Cogersa - Economía Circular Available online: https://www.catedracogersa.com/es/economia-circular.php#.
17. Romero, G.D. Progresando hacia un modelo de economía circular. 2018, 211–215.
18. Melgarejo Moreno, J. Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad. 2019.
19. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *BOE* 2011, 85650–85705.
20. MITECO - Ministerio para la Transición Ecológica Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *BOE* 2020, 48659–48721.
21. Lista Europea de Residuos (LER). 2001.
22. Del Río Merino, M.; Gracia, P.I.; Azevedo, I.S.W. Sustainable construction: Construction and demolition waste reconsidered. *Waste Manag. Res.* 2010, *28*, 118–129.

23. Ram, V.G.; Kishore, K.C.; Kalidindi, S.N. Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an Indian case study using life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 2020, *255*, 120258.

24. Ministerio de la Presidencia Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *BOE* 2008.

25. Secretaría General de Medio Ambiente Plan Nacional de Residuos de Construccion y Demolición (PNRCD) 2001-2006. 2001.

26. MMA Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR). *Plan Nac. Integr. Residuos* 2008, *2015*, 16.

27. Martínez, C.; Tomé, M. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): Importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización. *Congr. Nac. del medio Ambient.* 2009.

28. Los 25 años de historia de Cogersa. 2008.

29. Plan Estratégico de Residuos del Principado de Asturias (PERPA) 2017-2024. 2017.

30. COGERSA Gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) en COGERSA. *Retema* 2005, 10.

31. Castro Fresno, D.; Rodríguez Hernández, J.; Rodríguez Hernández, J.; Ballester Muñoz, F. Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia* 2005, *30*, 255–260.

32. Temprano González, J.; Gabriel Cervigni, M.; Suárez López, J.; Tejero Monzón, J.I. Contaminación en redes de alcantarillado urbano en tiempo de lluvia: control en origen.

33. Li, F.; Chen, J.; Engel, B.A.; Liu, Y.; Wang, S.; Sun, H. Assessing the effectiveness and cost efficiency of green infrastructure practices on surface runoff reduction at an urban watershed in China. *Water (Switzerland)* 2021, *13*.

34. Moral Pajares, E.; Gallego Valero, L.; Garcia Moral, F.; Roman Sánchez, I.M. Depuración de Aguas Residuales y uso De Aguas Regeneradas: Un Análisis Descriptivo del Caso de la Provincia de Jaén. *Agua y Territ. / Water Landsc.* 2021, 77–91.

35. CIRIA *The SuDS Manual*; 2012;

36. Hernes, R.R.; Gragne, A.S.; Abdalla, E.M.H.; Braskerud, B.C.; Alfredsen, K.; Muthanna, T.M. Assessing the effects of four SUDS scenarios on combined sewer overflows in Oslo, Norway: Evaluating the low-impact development module of the Mike Urban model. *Hydrol. Res.* 2020, *51*, 1437–1454.

37. Zuniga-Teran, A.A.; Staddon, C.; de Vito, L.; Gerlak, A.K.; Ward, S.; Schoeman, Y.; Hart, A.; Booth, G. Challenges of mainstreaming green infrastructure in built environment professions. *J. Environ. Plan. Manag.* 2020, *63*, 710–732.

38. Ashley, R.; Lundy, L.; Ward, S.; Shaffer, P.; Walker, L.; Morgan, C.; Saul, A.; Wong, T.; Moore, S. Water-sensitive urban design: Opportunities for the UK. *Proc. Inst. Civ. Eng. Munic. Eng.* 2013, *166*, 65–76.

39. Bush, K.A.; Walker, J.S.; Lee, C.S.; Kirkham, B.W. Cytokine expression and synovial pathology in the initiation and spontaneous resolution phases of adjuvant arthritis: Interleukin-17 expression is upregulated in early disease. *Clin. Exp. Immunol.* 2001, *123*, 487–495.

40. Paper, C. A New Paradigm for Deep Sustainability : A New Paradigm for Deep Sustainability : 2013, 367–381.

41. Hieronomi, H. Permacultura. Diseño para un mundo en descenso energético. *Diseño y Constr. sostenibles Una Real. ineludible* 2011, 135–140.

42. Fletcher, T.D.; Shuster, W.; Hunt, W.F.; Ashley, R.; Butler, D.; Arthur, S.; Trowsdale, S.; Barraud, S.; Semadeni-Davies, A.; Bertrand-Krajewski, J.L.; et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water J.* 2015, *12*, 525–542.

43. ¿Qué son los SUDS? – SuD Sostenible Available online: http://sudsostenible.com/que-son-los-sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/.

44. Joshi, P.; Leitão, J.P.; Maurer, M.; Bach, P.M. Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. *Water Res.* 2021, *191*, 116780.

45. Lashford, C.; Charlesworth, S.; Warwick, F.; Blackett, M. Modelling the role of SuDS management trains in minimising flood risk, using microDrainage. *Water (Switzerland)* 2020, *12*, 1–13.

46. Matrices de selección propuestas por CIRIA -Drenaje Urbano Sostenible Available online: http://drenajeurbanosostenible.org/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible/criterios-de-diseno/matrices-de-seleccion-propuestas-por-ciria/.

47. Perales Momparler, Sara; Calcerrada Romero, E. Guía básica de diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en zonas verdes y otros espacios libres. *Ayunt. Madrid* 2018, 11–33.

48. City of Philadelphia Water Department City of Philadelphia Green Streets Design Manual. 2014, 96.

49. Ayuntamiento de Castelló de la Plana Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para el término municipal de Castelló de la PLana. 2000, *2012*, 1–203.

50. Avery, L.M. *Rural Sustainable Drainage Systems (RSuDS)*; 2012;

51. MITECO - Ministerio para la Transición Ecológica Guías de adaptación al riesgo de inundación: sistemas urbanos de drenaje sostenible. *BOE*.

52. Moyano Collado, G. Estudio sobre el diseño de gaviones con relleno reciclado. 2020.

53. COGERSA Declaración de Prestaciones Áridos para capas granulares Nº2 OHOR-AC-T-0/32-R. 2020.

54. COGERSA Declaración de Prestaciones Áridos para capas granulares Nº2 OMIX-AG-T-0/32-R. 2020.

55. COGERSA Declaración de Prestaciones Áridos para capas granulares Nº2 OHOR-AG-T-40/120-R. 2020.

56. COGERSA Declaración de Prestaciones Áridos para capas granulares Nº2 OMIX-AG-T-40/120-R. 2020.

57. Sañudo-Fontaneda, L.A.; Coupe, S.J.; Charlesworth, S.M.; Rowlands, E.G. Exploring the effects of geotextiles in the performance of highway filter drains. *Geotext. Geomembranes* 2018, *46*, 559–565.

58. Lorente, J.; Casas, M.C.; Rodríguez, R.; Redaño, Á. Intensidades extremas y precipitación máxima probable. *Fenómenos meteorológicos Advers. en España* 2013, 142–155.

59. Ministerio de Fomento Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) - Parte 5ª. Firmes. 2005.

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

ANEXO I: DECLARACIÓN DE PRESTACIONES DE LOS RCD

DISEÑO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) UTILIZANDO RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

JUNIO, 2021

COGERSA

Declaración de Prestaciones
Aridos para capas granulares
Nº2 OHOR-AC-T-0/32-R

MARCADO CE
Conforme al Reglamento Europeo de Productos de la Construcción nº 305/2011

CE

20

COGERSA, SAU
C/Marqués de Santa Cruz, 12, 4º
33007 Oviedo

OHOR-AC-T-0/32-R

EN 13242:2003
ARIDOS PARA CAPAS GRANULARES Y CAPAS TRATADAS CON CONGLOMERADOS HIDRAULICOS PARA USO EN CAPAS ESTRUCTURALES DE FIRMES

AENOR,
ORGANISMO NOTIFICADO
Nº0099

ÁRIDOS OBTENIDOS POR TRATAMIENTO DE MATERIALES RECICLADOS

COGERSA

Declaración de Prestaciones
Aridos para capas granulares
Nº2 OHOR-AC-T-0/32-R

DECLARACION DE PRESTACIONES
Conforme al Reglamento Europeo de Productos de la Construcción nº 305/2011

1.- Nombre y código de identificación del producto
Árido combinado de origen Hormigón 0/32

2.- Nombre y dirección del fabricante:
COGERSA SAU. Centro de Tratamiento de Residuos de Asturias
Carretera de COGERSA, 1125, 33697 Serín (Gijón), Asturias

3.- Uso previsto:
Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.

4.- Sistema de evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones: Sistema 2+

5.- Norma armonizada y Organismo Notificado:
EN 13242:2002+A1:2007 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.

AENOR, Organismo notificado nº 0099,

REQUISITO	CATEGORÍA	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO
Tamaño	0/32	
Forma del árido grueso	FI_{20}	EN 933-3
Densidad de las partículas	2.5±0.2	EN 1097-6
Granulometría	VER GRANULOMETRIA CARACTERISTICA CATEGORIA TOLERANCIA GTA25	EN 933-1
Contenido en finos	f7	
Equiv Arena/Azul de Metileno	SE<50 / AM<7	Anexo A (en 13242)
Porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	$C_{90/3}$	EN 933-5
Resistencia a la fragmentación del árido grueso	LA60	EN 1097-2
Componentes que afectan a la estabilidad de volumen de las escorias de horno alto y férricas para áridos no tratados	PND	EN 1744-1
Absorción de agua	<5%	EN 1097-6
Clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados	Rcug>90	EN-933-11
Sulfatos solubles en ácido	AS1	EN 1744-1
Sulfatos solubles en agua	SS_{02}	
Azufre total	S1	EN 1744-1
Componentes que alteran el tiempo de fraguado y de endurecimiento de las mezclas.	NO CONTIENE	EN 1744-1
Resistencia al desgaste del árido grueso	$M_{DE}50$	EN 1097-1
Resistencia al hielo y al deshielo	PND	EN 1367-1/2
Sonnenbrand	PND	EN 1367-3 EN 1097-2

GRANULOMETRIA DECLARADA 0/32 HORMIGON

Tamiz	40	31.5	22,4	16	11.2	8	5	4	2	1	0,5	0,25	0,063
% pasa	100	94	70	54	40	32	25	20	15	12	10	7	3.5

Las prestaciones del producto identificado anteriormente son conformes por el conjunto de prestaciones declaradas. La presente declaración de prestaciones se emite de confomidad con el reglamento (UE) nº 305/2011, bajo la sola responsabilidad del fabricante arriba identificado
Firmado por y en nombre del fabricante por Irina Vigil Cereijo (Rble. Planta RCD´s COGERSA, SAU)

COMPAÑIA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN ASTURIAS, SOCIEDAD ANONIMA UNIPERSONAL COGERSA, S.A.U.

En Serín (Gijón) a 17 de diciembre de 2020

COGERSA

Declaración de Prestaciones
Aridos para capas granulares
Nº2 OMIX-AC-T-0/32-R

MARCADO CE
Conforme al Reglamento Europeo de Productos de la Construcción nº 305/2011

CE

20

COGERSA, SAU
C/Marqués de Santa Cruz, 12, 4º
33007 Oviedo

OMIX-AC-T-0/32-R

EN 13242:2003
ARIDOS PARA CAPAS GRANULARES Y CAPAS TRATADAS CON CONGLOMERADOS HIDRAULICOS PARA USO EN CAPAS ESTRUCTURALES DE FIRMES

AENOR,
ORGANISMO NOTIFICADO
Nº0099

ÁRIDOS OBTENIDOS POR TRATAMIENTO DE MATERIALES RECICLADOS

COGERSA

Declaración de Prestaciones
Aridos para capas granulares
Nº2 OMIX-AC-T-0/32-R

DECLARACION DE PRESTACIONES
Conforme al Reglamento Europeo de Productos de la Construcción nº 305/2011

1.- Nombre y código de identificación del producto
Árido combinado de origen Mixto 0/32

2.- Nombre y dirección del fabricante:
COGERSA SAU. Centro de Tratamiento de Residuos de Asturias
Carretera de COGERSA, 1125, 33697 Serín (Gijón), Asturias

3.- Uso previsto:
Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.

4.- Sistema de evaluación y verificación de la constancia de las prestaciones: Sistema 2+

5.- Norma armonizada y Organismo Notificado:
EN 13242:2002+A1:2007 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.

AENOR, Organismo notificado nº 0099,

REQUISITO	CATEGORÍA	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO
Tamaño	0/32	
Forma del árido grueso	FI_{35}	EN 933-3
Densidad de las partículas	2.5±0.2	EN 1097-6
Granulometría	VER GRANULOMETRIA CARACTERISTICA CATEGORIA TOLERANCIA GTA25	EN 933-1
Contenido en finos	f7	
Equiv Arena/Azul de Metileno	SE<50 / AM<5	Anexo A (en 13242)
Porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	$C_{90/3}$	EN 933-5
Resistencia a la fragmentación del árido grueso	LA60	EN 1097-2
Componentes que afectan a la estabilidad de volumen de las escorias de horno alto y férricas para áridos no tratados	PND	EN 1744-1
Absorción de agua	<7%	EN 1097-6
Clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados	Rcug≥50	EN-933-11
Sulfatos solubles en ácido	AS1	EN 1744-1
Sulfatos solubles en agua	SS_{NR}	EN 1744-1
Azufre total	S1	EN 1744-1
Componentes que alteran el tiempo de fraguado y de endurecimiento de las mezclas.	NO CONTIENE	EN 1744-1
Resistencia al desgaste del árido grueso	M_{DE} 50	EN 1097-1
Resistencia al hielo y al deshielo	PND	EN 1367-1/2
Sonnenbrand	PND	EN 1367-3 EN 1097-2

GRANULOMETRIA DECLARADA 0/32 MIXTO

Tamiz	40	31.5	22,4	16	11.2	8	5.6	4	2	1	0,5	0,25	0,063
% pasa	100	95	62	60	50	40	36	30	20	16	15	10	5

Las prestaciones del producto identificado anteriormente son conformes por el conjunto de prestaciones declaradas. La presente declaración de prestaciones se emite de confomidad con el reglamento(UE) nº 305/2011, bajo la sola responsabilidad del fabricante arriba identificado
Firmado por y en nombre del fabricante por Irina Vigil Cereijo (Rble. Planta RCD´s COGERSA, SAU)

COGERSA
COMPAÑIA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN ASTURIAS, SOCIEDAD ANONIMA UNIPERSONAL (COGERSA S.A.U.)

En Serín (Gijón) a 18 de diciembre de 2020

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

ANEXO II: RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS

DISEÑO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) UTILIZANDO RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

JUNIO, 2021

1 SECCIÓN CONTROL

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre las muestras CONTROL. Se estudia el comportamiento de 3 muestras con mismas dimensiones y configuración ante una sola intensidad de lluvia. Los valores de cada recipiente se recogen en las siguientes tablas.

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO CONTROL		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
CONTROL Ensayo N°: 1	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	120	60	60
		180	240	180
		240	440	200
		300	660	220
		360	880	220
		420	1100	220
		480	1320	220
		540	1540	220
		600	1760	220
	Fd (Zona C)	660	1900	140
		720	1940	40
		780	1960	20
		840	1980	20
		900	2000	20
		960	2010	10
		1020	2020	10
		1080	2025	5
		1140	2030	5
		1200	2035	5
		1260	2040	5
		1320	2040	0
		1380	2040	0
		1440	2040	0
		1500	2040	0
		1560	2040	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO CONTROL		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
CONTROL Ensayo Nº: 2	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
		120	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	180	120	120
		240	300	180
		300	500	200
		360	700	200
		420	900	200
		480	1100	200
		540	1300	200
		600	1500	200
	Fd (Zona C)	660	1640	140
		720	1680	40
		780	1700	20
		840	1720	20
		900	1740	20
		960	1760	20
		1020	1780	20
		1080	1800	20
		1140	1805	5
		1200	1810	5
		1260	1815	5
		1320	1820	5
		1380	1820	0
		1440	1820	0
		1500	1820	0
		1560	1820	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO CONTROL		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
CONTROL Ensayo Nº: 3	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	120	20	20
		180	180	160
		240	380	200
		300	600	220
		360	820	220
		420	1040	220
		480	1260	220
		540	1480	220
		600	1700	220
	Fd (Zona C)	660	1880	180
		720	1960	80
		780	2000	40
		840	2020	20
		900	2040	20
		960	2060	20
		1020	2066	6
		1080	2072	6
		1140	2078	6
		1200	2078	0
		1260	2078	0
		1320	2078	0
		1380	2078	0
		1440	2078	0
		1500	2078	0
		1560	2078	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

2 SECCIÓN RCDH

En las siguientes tablas se muestran los valores medidos en los ensayos sobre las muestras configuradas con RCD de origen hormigón. Se llevan a cabo 3 ensayos sobre secciones idénticas para una misma intensidad de lluvia.

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDH		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDH Ensayo N°: 1	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
		120	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	180	120	120
		240	300	180
		300	500	200
		360	700	200
		420	900	200
		480	1120	220
		540	1340	220
		600	1560	220
	Fd (Zona C)	660	1680	120
		720	1700	20
		780	1720	20
		840	1740	20
		900	1750	10
		960	1760	10
		1020	1770	10
		1080	1780	10
		1140	1785	5
		1200	1790	5
		1260	1795	5
		1320	1800	5
		1380	1800	0
		1440	1800	0
		1500	1800	0
		1560	1800	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDH		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDH Ensayo Nº: 2	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
		120	0	0
		180	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	240	20	20
		300	160	140
		360	340	180
		420	540	200
		480	740	200
		540	940	200
		600	1140	200
	Fd (Zona C)	660	1280	140
		720	1320	40
		780	1340	20
		840	1360	20
		900	1380	20
		960	1400	20
		1020	1410	10
		1080	1420	10
		1140	1426	6
		1200	1432	6
		1260	1438	6
		1320	1443	5
		1380	1448	5
		1440	1453	5
		1500	1458	5
		1560	1458	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDH		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDH Ensayo Nº: 3	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
		120	0	0
		180	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	240	100	100
		300	260	160
		360	440	180
		420	640	200
		480	840	200
		540	1040	200
		600	1240	200
	Fd (Zona C)	660	1400	160
		720	1440	40
		780	1460	20
		840	1480	20
		900	1500	20
		960	1520	20
		1020	1540	20
		1080	1550	10
		1140	1560	10
		1200	1570	10
		1260	1580	10
		1320	1585	6
		1380	1590	6
		1440	1595	6
		1500	1595	0
		1560	1595	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

3 SECCIÓN RCDM

En las siguientes tablas se muestran los valores medidos en los ensayos sobre las muestras configuradas con RCD de origen mixto. Se llevan a cabo 3 ensayos sobre secciones idénticas para una misma intensidad de lluvia.

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDM		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDM Ensayo Nº: 1	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
		120	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	180	40	40
		240	140	100
		300	280	140
		360	460	180
		420	640	180
		480	820	180
		540	1020	200
		600	1220	200
	Fd (Zona C)	660	1340	120
		720	1400	60
		780	1440	40
		840	1460	20
		900	1480	20
		960	1490	10
		1020	1500	10
		1080	1510	10
		1140	1516	6
		1200	1522	6
		1260	1528	6
		1320	1528	0
		1380	1528	0
		1440	1528	0
		1500	1528	0
		1560	1528	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDM		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDM Ensayo Nº: 2	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	120	40	40
		180	120	80
		240	220	100
		300	360	140
		360	500	140
		420	660	160
		480	860	200
		540	1060	200
		600	1260	200
	Fd (Zona C)	660	1360	100
		720	1380	20
		780	1390	10
		840	1400	10
		900	1406	6
		960	1412	6
		1020	1418	6
		1080	1424	6
		1140	1430	6
		1200	1436	6
		1260	1436	0
		1320	1436	0
		1380	1436	0
		1440	1436	0
		1500	1436	0
		1560	1436	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDM		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDM Ensayo Nº: 3	Fi (Zona A)	0	0	0
		60	0	0
		120	0	0
	Fi+Fe (Zona B)	180	60	60
		240	160	100
		300	280	120
		360	420	140
		420	600	180
		480	780	180
		540	960	180
		600	1160	200
	Fd (Zona C)	660	1280	120
		720	1320	40
		780	1340	20
		840	1350	10
		900	1360	10
		960	1370	10
		1020	1380	10
		1080	1385	5
		1140	1390	5
		1200	1395	5
		1260	1400	5
		1320	1400	0
		1380	1400	0
		1440	1400	0
		1500	1400	0
		1560	1400	0

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

4 VALORES MEDIOS

En las siguientes tablas se van a recoger los valores medios para cada una de las secciones configuradas, para emplear estos datos como representativos de los materiales y poder hacer comparaciones entre la sección estándar y las secciones de materiales reciclados.

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO CONTROL		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
CONTROL Ensayos N°: 1, 2 y3	Fi (Zona A)	0	0,00	0,00
		60	0,00	0,00
	Fi+Fe (Zona B)	120	26,67	26,67
		180	180,00	153,33
		240	373,33	193,33
		300	586,67	213,33
		360	800,00	213,33
		420	1013,33	213,33
		480	1226,67	213,33
		540	1440,00	213,33
		600	1653,33	213,33
	Fd (Zona C)	660	1806,67	153,33
		720	1860,00	53,33
		780	1886,67	26,67
		840	1906,67	20,00
		900	1926,67	20,00
		960	1943,33	16,67
		1020	1955,33	12,00
		1080	1965,67	10,33
		1140	1971,00	5,33
		1200	1974,33	3,33
		1260	1977,67	3,33
		1320	1979,33	1,67
		1380	1979,33	0,00
		1440	1979,33	0,00
		1500	1979,33	0,00
		1560	1979,33	0,00

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDH		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDH Ensayos Nº: 1, 2 y 3	Fi (Zona A)	0	0,00	0,00
		60	0,00	0,00
		120	0,00	0,00
	Fi+Fe (Zona B)	180	40,00	40,00
		240	140,00	100,00
		300	306,67	166,67
		360	493,33	186,67
		420	693,33	200,00
		480	900,00	206,67
		540	1106,67	206,67
		600	1313,33	206,67
	Fd (Zona C)	660	1453,33	140,00
		720	1486,67	33,33
		780	1506,67	20,00
		840	1526,67	20,00
		900	1543,33	16,67
		960	1560,00	16,67
		1020	1573,33	13,33
		1080	1583,33	10,00
		1140	1590,33	7,00
		1200	1597,33	7,00
		1260	1604,33	7,00
		1320	1609,33	5,00
		1380	1612,67	3,33
		1440	1616,00	3,33
		1500	1617,67	1,67
		1560	1617,67	0,00

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga

Intensidad de lluvia = 194,4 mm/h		SECCIÓN TIPO RCDM		
		Tiempo (s)	Volumen (ml)	Tasa de infiltración (ml/min)
RCDM Ensayos N°: 1, 2 y3	Fi (Zona A)	0	0,00	0,00
		60	0,00	0,00
	Fi+Fe (Zona B)	120	13,33	13,33
		180	73,33	60,00
		240	173,33	100,00
		300	306,67	133,33
		360	460,00	153,33
		420	633,33	173,33
		480	820,00	186,67
		540	1013,33	193,33
		600	1213,33	200,00
	Fd (Zona C)	660	1326,67	113,33
		720	1366,67	40,00
		780	1390,00	23,33
		840	1403,33	13,33
		900	1415,33	12,00
		960	1424,00	8,67
		1020	1432,67	8,67
		1080	1439,67	7,00
		1140	1445,33	5,67
		1200	1451,00	5,67
		1260	1454,67	3,67
		1320	1454,67	0,00
		1380	1454,67	0,00
		1440	1454,67	0,00
		1500	1454,67	0,00
		1560	1454,67	0,00

Fi = Fase inicial
Fe = Fase estacionaria
Fd = Fase de descarga