

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

Análisis y optimización del software EPA
SWMM para el diseño de redes de drenaje
urbano sostenible.



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

Trabajo Fin de Grado

Mario Serrano Sandúa

Dirigido por Idoya Lacosta Gavari

Tudela, 6 de junio de 2022

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Trabajo de fin de Grado
Grado en Ingeniería de Diseño Mecánico

**ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL SOFTWARE
EPASWMM PARA EL DISEÑO DE REDES DE DRENAJE
URBANO SOSTENIBLE.**

Autor:

Mario Serrano Sandúa

Tutora:

Idoya Lacosta Gavari

Dpto. de Ingeniería
Área de Mecánica de Fluidos
Universidad Pública de Navarra
Campus de Tudela

Tudela, 2022

Mi profundo agradecimiento al Campus de Tudela por poner, en todo momento, sus instalaciones a disposición del alumnado fomentando así la creatividad y la iniciativa personal.

RESUMEN

La creciente impermeabilización del suelo urbano debido al crecimiento de las ciudades y los fenómenos meteorológicos extremos provocados por el cambio climático, han puesto en tela de juicio la gestión del agua que, tradicionalmente, se venía haciendo en las ciudades. Esta gestión, no tiene en cuenta que el agua de lluvia es un bien que puede y debe ser aprovechado. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible proponen que se investiguen y desarrollen infraestructuras sostenibles que preparen a nuestras ciudades para adaptarse mejor a los cambios que están por venir. Por ello, en este trabajo, se ha diseñado una red de drenaje urbano convencional y se han estudiado los efectos que la instalación de un pavimento filtrante tiene sobre ella. Para hacer esto se han propuesto dos sucesos de lluvia con diferentes características, y se ha evaluado cómo responde la red de drenaje en cada caso. Además, se ha estudiado otra alternativa al pavimento permeable convencional que consiste en utilizar celdillas de polipropileno reciclado para filtrar y retener el agua de lluvia.

ABSTRACT

The increasing waterproofing of urban land due to the growth of cities and extreme weather events caused by climate change, have called into question the water management that, traditionally, was done in cities. This management does not consider that rainwater is a good that can and should be used. The Sustainable Development Goals proposes that sustainable infrastructures be researched and developed that prepare our cities to better adapt to the changes that are to come. Therefore, in this work, a conventional urban drainage network has been designed and the effects that the installation of a filter pavement has on it have been studied. To do this, two rainfall events with different characteristics have been proposed, and it has been evaluated how the drainage network responds in each case. In addition, another alternative to conventional permeable pavement has been studied, which consists of using recycled polypropylene cells to filter and retain rainwater.

Palabras clave: Sistemas de drenaje sostenible, escorrentía, polipropileno

Keywords: Sustainable drainage system, runoff, polypropylene.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- CONTEXTUALIZACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	2
2.1.- Cambio climático y régimen de lluvias.	2
2.2.- El ciclo del agua: ciclo natural y ciclo urbano.....	4
2.3.- Los Objetivos de Desarrollo Sostenible.	7
2.4.- Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.....	10
2.4.1.- Tipos de sistemas urbanos de drenaje sostenible.....	12
2.4.2.- Los pavimentos permeables.....	15
2.4.3.- Las nuevas tendencias en pavimentos permeables.	16
2.4.4.- Algunos ejemplos de éxito.....	18
3.- OBJETIVOS DEL ESTUDIO	22
4.- METODOLOGÍA	22
4.1.- Descripción del software EPA SWMM.....	22
4.2.- Descripción del software SOLIDWORKS.....	24
4.3.- Elección y descripción del área de estudio.....	25
4.4.- Diseño de la red unitaria.....	30
4.5.- Elección de los eventos de lluvia.....	33
4.6.- Elección del SUDS y de su localización.....	35
4.7.- Modelización de la celdilla.....	37
5.- RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
5.1.- Resultados relativos a la calibración del programa.....	38
5.1.1.- Resultados producidos por el evento de lluvia del 1 de septiembre de 2021.....	39
5.1.2.- Resultados producidos por el evento de lluvia del 22-23 de noviembre de 2021.....	49
5.2.- Resultados producidos por el evento de LL2 con pavimento permeable.	55
5.3.-Resultados relativos al estado de la subcuenca 14 sin y con pavimento permeable.....	59
5.4.- Resultados relativos al diseño del pavimento de polipropileno.....	61
5.5.- Resultados relativos a la equiparación de la celdilla de polipropileno con un pavimento permeable convencional.....	64
6.- CONCLUSIONES	68
7.- FUTURAS INVESTIGACIONES	71
7.- BIBLIOGRAFÍA	72

1.- INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades trae consigo la transformación de grandes áreas de suelo permeable en impermeable. Esta reducción en la permeabilidad del suelo se traduce en un aumento de la escorrentía durante los eventos de lluvia y en un mayor riesgo de inundaciones durante los episodios torrenciales.

Por otro lado, el cambio climático está aumentando la frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos como las lluvias torrenciales o las sequías prolongadas. El primer factor produce un aumento de la escorrentía. El segundo, una mayor acumulación de contaminantes durante los periodos secos, los cuales son arrastrados hasta las estaciones de depuración de aguas residuales e incrementan los costes del proceso. Finalmente, hay que considerar que la ausencia de agua en los entornos urbanos produce lo que se denomina *isla de calor*.

Estos problemas han forzado un cambio de paradigma en la gestión del agua en las ciudades. Los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* propuestos por la ONU en 2015, proponen modelos de ciudades sostenibles y resilientes que sean capaces de, en la medida de lo posible, restaurar el ciclo natural del agua en los entornos urbanos, con *la implantación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible* (SUDS), que son las nuevas infraestructuras que nos permiten abordar estos problemas. Permiten que la respuesta hidrológica de una zona urbanizada sea lo más parecida posible a la que tenía en su estado natural.

Existen varios tipos de SUDS (pavimentos permeables, celdas de bio-retención, jardines de lluvia, etc.), cuya elección se ajusta a la solución del problema hidrológico existente. Las últimas tecnologías y la necesidad de innovar sosteniblemente han dado lugar a dispositivos fabricados con materiales reciclados como las celdas de drenaje, hechas de polipropileno 100% reciclado. Dada la importancia de estas infraestructuras, en este trabajo se va a realizar el estudio de una secuencia de episodios de lluvia torrencial en una zona determinada y se analizará tanto su efecto sobre el suelo urbano, como su respuesta con la implantación de los SUDS correspondientes, para comprobar la eficacia de estos dispositivos.

2.- CONTEXTUALIZACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La tendencia al crecimiento de las ciudades ha conducido a una modificación de los usos del suelo. La rápida urbanización de extensas áreas del territorio ha contribuido a interrumpir el ciclo natural del agua, impermeabilizando espacios que antes permitían la filtración del agua y, por tanto, incrementando los caudales punta de escorrentía superficial en episodios de lluvia, aunque esta sea de corta duración y baja intensidad [1].

Algunos autores estiman que el 90% de las precipitaciones pueden transformarse en escorrentía superficial en zonas urbanas impermeables, mientras que, en entornos naturales permeables, este valor descendería como mínimo hasta un 25% [2].

Por otra parte, ya es un hecho comprobado que una de las consecuencias del cambio climático en el que estamos inmersos es la modificación de los patrones de lluvia, tanto en lo referido a su frecuencia como a su intensidad.

Debido a todo esto, la gestión del agua de lluvia en las ciudades se ha convertido en un tema de interés y su estudio pretende solucionar tanto el problema de las inundaciones en las ciudades como el de la contaminación difusa que estas generan.

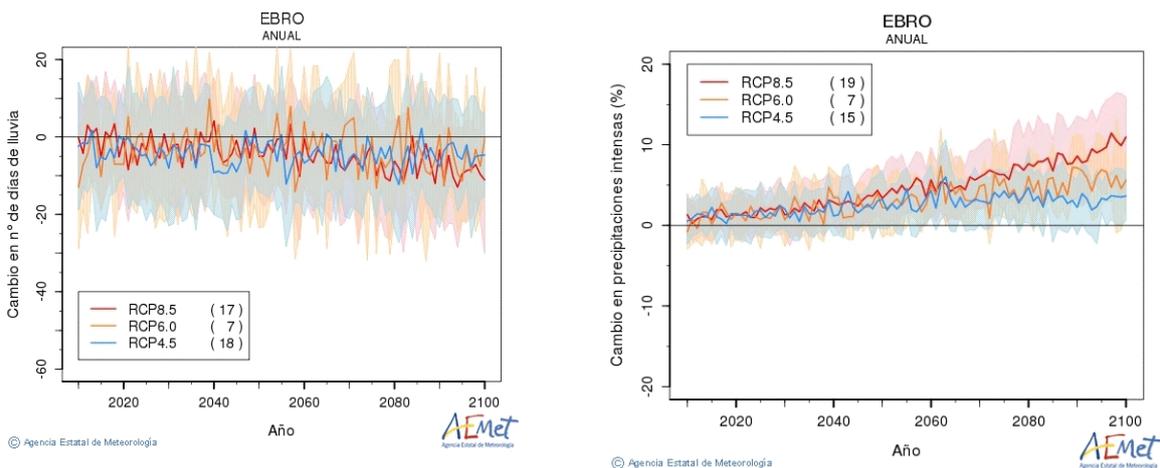
2.1.- Cambio climático y régimen de lluvias.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como el *cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables* [3]. Este organismo creó en 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC) y desde entonces viene trabajando para suministrar información científica, objetiva y contrastada sobre el fenómeno de calentamiento global. El IPCC, en su estudio más reciente de 2021 titulado *Cambio Climático 2022. AR6*, afirma que el calentamiento global es ya un hecho generalizado que avanza con rapidez y se intensifica [4]. En este informe, los

expertos recomiendan pasar a la acción de manera urgente, no para detener su avance, lo cual se considera imposible, sino para mitigar el impacto que dichos cambios van a producir en los entornos más vulnerables y favorecer la adaptación a los mismos (Trabajos I y II de AR6).

Uno de los impactos mayores que se esperan, es el cambio en los patrones de precipitación. Se esperan a este respecto fenómenos meteorológicos extremos como lluvias torrenciales seguidos de largos periodos de sequía y posteriores inundaciones.

Aunque los datos suministrados por AR6 son globales, las agencias meteorológicas de cada país adaptan dichos datos a su situación concreta. En España, la *Agencia Estatal de Meteorología* (AEMET) se encarga de adaptar estas previsiones a las diferentes zonas climáticas. Parte de la información suministrada para Navarra y en concreto para la cuenca del Ebro se refleja en las gráficas 1 y 2. En ellas vemos las previsiones hasta el año 2100 en tres escenarios diferentes, llamados *Representative Concentration Pathway 8.5, 6 y 4.5* respectivamente (RCP8.5, 6 and 4.5). Los tres son escenarios de emisiones globales a largo plazo de gases de efecto invernadero que estabilizaría la radiación a una intensidad de 8.5, 6 o 4.5 w/m².



Figuras 1 y 2.- Previsión en la evolución de las precipitaciones en el Valle del Ebro [5].

En las gráficas se muestran los dos efectos más importantes del cambio climático en los que está basado este trabajo y en ambas comprobamos tanto la

disminución progresiva de los días de lluvia, como el aumento en la intensidad de las precipitaciones cuando estas ocurran

El estudio de las consecuencias de este fenómeno es un punto clave que justifica analizar de la zona escogida de la Ribera de Navarra en la que se esperan por un lado tiempos largos de sequía y por otro lado lluvias torrenciales, que generan inundaciones en determinadas zonas.

2.2.- El ciclo del agua: ciclo natural y ciclo urbano.

El ciclo natural del agua, o ciclo hidrológico, es el proceso de circulación del agua (en sus diferentes estados: líquido, sólido y gaseoso) a través de los distintos espacios que componen la hidrosfera: océanos, mares, ríos, lagos y acuíferos.

Incluye cuatro etapas:

- La evaporación: el agua se evapora de la superficie oceánica y de los lagos, subiendo a la atmósfera en forma de vapor.
- La condensación: El vapor de agua se condensa debido a la diferencia de temperatura, formando las nubes.
- Las precipitaciones: Las gotas que conforman las nubes terminan precipitándose sobre la superficie terrestre.
- El transporte e infiltración: Cuando el agua llega a la superficie, una parte discurre a través de la topografía formando la escorrentía, mientras que otra parte se infiltra en el terreno.

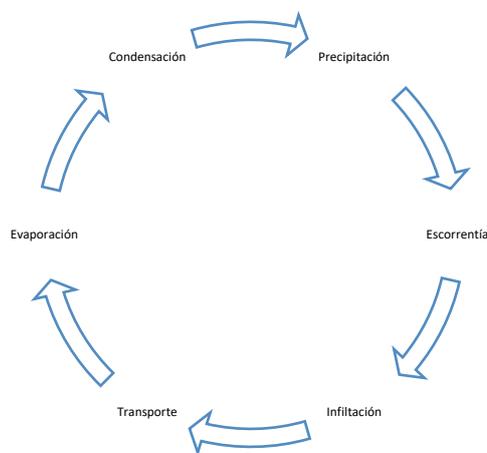


Figura 3.- Ciclo natural del agua.

La urbanización y las edificaciones de los núcleos urbanos y su entorno alteran considerablemente el ciclo natural del agua en todas sus etapas:

- Evaporación y condensación: La edificación incrementa la temperatura y modifica las corrientes de viento. Esto afecta a la evaporación y condensación de las partículas de agua.
- Contaminación: Las precipitaciones atraviesan una nube de polución, por lo que llegan a la superficie con cierto grado de contaminación. En la superficie, la escorrentía urbana arrastra la suciedad y contaminación acumulada en el pavimento urbano.
- Escorrentía: Se modifica la topografía y se emplean canalizaciones para transportar el agua de manera rápida y directa, perdiendo los desagües y canalizaciones naturales.
- Infiltración: La impermeabilización de la superficie disminuye su capacidad de infiltración.

El ciclo urbano del agua difiere del ciclo natural que tendría sin la transformación urbana. Esta modificación provoca que el riesgo de inundación aumente, la difusión de la contaminación sea mayor, y que los acuíferos subterráneos sufran una pérdida cualitativa y cuantitativa importante. Influye también en el aumento de las temperaturas, en la calidad del aire y en la alteración de las corrientes de viento, por lo que afecta también a las etapas de evaporación, condensación y precipitación del ciclo hidrológico [6].

Para respetar el ciclo natural del agua es fundamental ajustar la planificación urbanística a las características propias de cada lugar: adaptarse a la topografía, al tipo de terreno y a los elementos naturales ya existentes. El recorrido del agua por los entornos edificados plantea multitud de situaciones diferentes. Cada zona necesita una solución y una planificación concreta acorde a la topografía, la tipología y permeabilidad del terreno, los cauces y los flujos de agua existentes. El sistema de drenaje forma parte de la planificación urbana del territorio, y es un aspecto clave para controlar la calidad del aire, del agua y del suelo, además de prevenir las inundaciones. Para poder actuar sobre el ciclo urbano del agua es necesario conocer cómo funciona la red de saneamiento de las poblaciones. El sistema de saneamiento urbano evacúa tanto las aguas pluviales (aguas de lluvia que se precipitan sobre las cubiertas de los edificios y sobre el pavimento

urbano) como las aguas residuales (aguas que han sido utilizadas en los aparatos sanitarios de los edificios). Existen dos tipologías predominantes de sistemas de saneamiento:

- las redes unitarias. La red de saneamiento unitaria dispone de una única canalización para transportar tanto las aguas pluviales como las residuales.
- Las redes separativas. La red de saneamiento separativa consta de dos canalizaciones diferenciadas: una para las aguas pluviales de cubiertas y calles, y otra para las aguas residuales de los edificios.

Tradicionalmente se ha utilizado un sistema de saneamiento unitario. En los edificios de nueva planta y en las nuevas zonas urbanas la red de saneamiento que se instala debe ser separativa, atendiendo a la normativa vigente. No obstante, en gran parte del territorio español se sigue utilizando el sistema unitario existente.

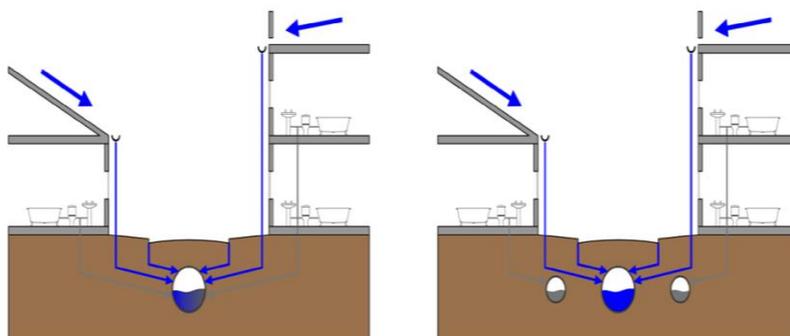


Figura 4.- Saneamiento unitario y saneamiento separativo [6]

Excepto en las zonas de parques y jardines donde generalmente el agua de lluvia se infiltra, el sistema de drenaje urbano habitual se basa en recoger la escorrentía y transportar el agua directamente a la red general de saneamiento (junto con las aguas residuales). A través de estas canalizaciones, se transporta el agua hasta una *Estación Depuradora de Aguas Residuales* (EDAR) donde se trata para su posterior vertido o reutilización. Este modelo implica:

- Un aumento considerable del caudal de la red de saneamiento. En épocas de intensas precipitaciones el sistema general pueda llegar a colapsar provocando inundaciones.

- Que en episodios de inundaciones puedan aflorar las aguas residuales, contaminando la superficie urbana y afectando a la salubridad e higiene de la zona.
- No aprovechar el agua de lluvia en su lugar de origen para operaciones de riego o baldeo.
- La contaminación del agua de lluvia en contacto con aguas residuales en estaciones depuradoras (EDAR), que provoca el incremento del coste energético y económico de las EDAR, así como su disfunción por variación de la calidad del agua recibida.
- Que no se aproveche la capacidad de infiltración y absorción del terreno para las aguas pluviales.
- Un aumento del efecto *Isla de calor*.

Es evidente que este modelo de gestión del agua no es sostenible no es el adecuado en el escenario de cambio climático en el que nos movemos actualmente.

2.3.- Los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El 25 de septiembre de 2015, la ONU desarrollo una serie de objetivos de cumplimiento en un plazo de 15 años, cuyo propósito es que los países de todo el mundo y sus sociedades tomen un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos sin ningún tipo de discriminación.

Estos objetivos son los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que, interrelacionados entre sí, sustentan una serie de acciones cuya meta es lograr el fin de la pobreza, el fin de la desigualdad, proteger el planeta y mejorar la vida de las personas de todo el mundo, así como fomentar la prosperidad, justicia y paz. Las acciones que se han llevado a cabo hasta el momento han sido lentas y, por tanto, se pretende acelerar este proceso en la década en la que nos encontramos con el fin de alcanzar los objetivos para 2030 [7].

El plan cuenta con un total de 17 objetivos:

1. Fin de la pobreza.
2. Hambre cero.

3. Salud y bienestar.
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidades sostenibles.
12. Producción y consumo responsables.
13. Acción por el clima.
14. Vida submarina
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas.
17. Alianzas para lograr los objetivos.

Este trabajo, pretende contribuir de alguna forma a la consecución de los objetivos 6, 9 y 13, ya que son los objetivos que están directamente relacionados con la calidad y la gestión de las aguas en entornos urbanos.

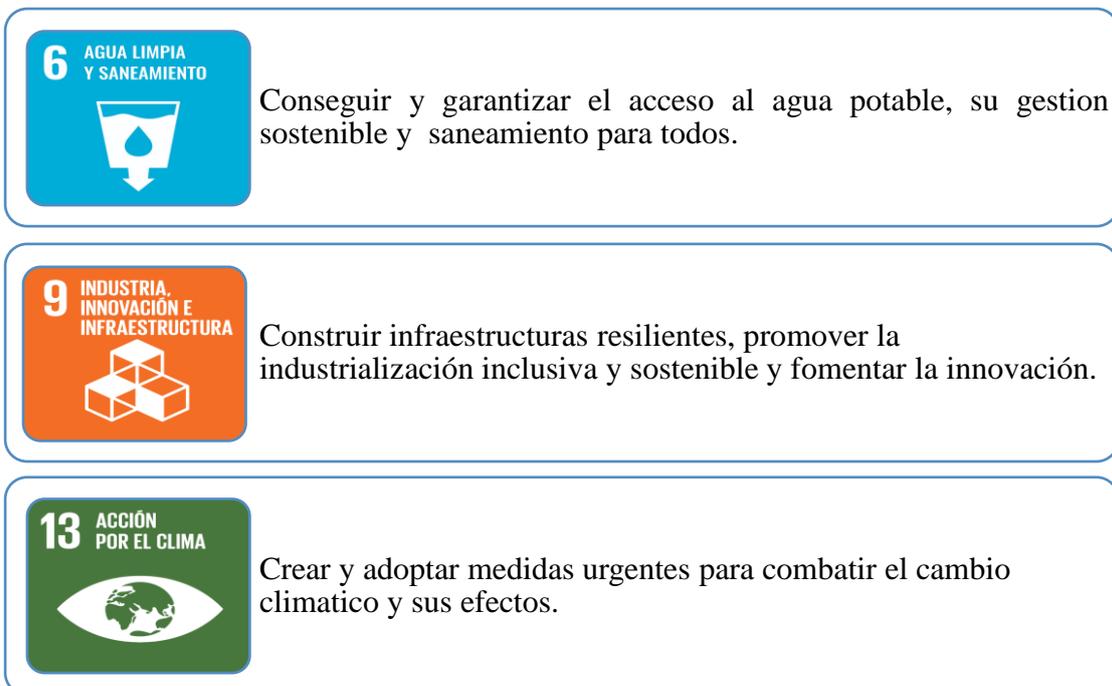


Figura 5.- ODS relacionados con la gestión del agua urbana

- **ODS número 6:** Este objetivo pretende mejorar la calidad del agua lo que significa aprovechar mejor el agua dulce y reducir la cantidad de contaminantes que esta transporta. Las metas en las que se concreta este objetivo son:
 - Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todo el mundo.
 - Mejorar la calidad del agua reduciendo los contaminantes, así como reducir el porcentaje de aguas residuales sin tratar.
 - Desarrollar la mejora de la gestión y saneamiento del agua.

En este sentido, es útil la utilización de técnicas SUDS debido a permiten filtrar el agua de lluvia hacia el suelo, disminuyendo la concentración de contaminantes en la escorrentía al mismo tiempo que los retiene en su interior. Además, al separar las aguas residuales de las pluviales permiten mejorar el posterior proceso de depuración del agua y evitar acciones innecesarias en las EDAR.

- **ODS número 9:** Este objetivo intenta promover y transformar los espacios para que sean más humanos y sean espacios sostenibles que fomenten el bienestar y la salud de los ciudadanos. El objetivo propone las siguientes metas:
 - Crear infraestructuras para lograr el desarrollo económico y el bienestar humano, y con ello el acceso asequible e igual para todos.
 - Transformar y modernizar las infraestructuras hacia una dirección sostenible usando los recursos con mayor eficacia y adoptando tecnologías y procesos industriales limpios.

Los SUDS forman parte de estas infraestructuras. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible tienen como objetivo reconvertir las infraestructuras urbanas actuales para que sean sostenibles y adaptarse a las nuevas

necesidades que han surgido con el cambio climático para el cuidado del planeta, aprovechando así los espacios inutilizados con estas infraestructuras totalmente innovadoras que nos hagan evitar tanto posibles inundaciones como la concentración de contaminantes en el agua.

ODS número 13: Este objetivo intenta favorecer todas las medidas que puedan minimizar los efectos del cambio climático. En cuanto a las metas del objetivo, estas son:

- Reforzar la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.
- Promover medidas relativas al cambio climático.

Es evidente que un fenómeno de cambio global no puede ser mejorado con una sola acción, sino que debe ser la unión de múltiples acciones. A este efecto sinérgico pueden contribuir los SUDS. Los espacios verdes que estas infraestructuras crean pueden disminuir el efecto *Isla de calor* y generar balsas artificiales que mejoren la calidad de vida de los ciudadanos.

Con los SUDS se consigue disminuir la cantidad de agua que llega a la red general y su caudal punta si se actúa en todas las fases del recorrido del agua. Aunque en los edificios de nueva planta y en las nuevas zonas urbanas ya se utilizan redes de saneamiento separativas, el sistema habitual de drenaje y los suelos impermeables continúan provocando el colapso de la red general cuando se producen lluvias intensas. Para conseguir un ciclo del agua urbano similar al ciclo natural y reducir el riesgo de inundación se recomienda urbanizar siguiendo los criterios de un urbanismo sostenible e incorporando los SUDS desde el inicio de dicho diseño.

2.4.- Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

Los *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)* son técnicas de ingeniería cuyo objetivo principal es la gestión sostenible de las aguas pluviales. Estos dispositivos intentan restaurar los procesos hidrológicos naturales en la ciudad y, además, disminuir el volumen de escorrentía, la contaminación difusa y el efecto *Isla de Calor* (Este fenómeno consiste en el aumento de las temperaturas en los centros de las áreas urbanas debido a la falta de humedad y a la retención de la radiación solar por el uso masivo de pavimentos impermeables, y se ha visto incrementado en los últimos años con el cambio climático).

Para conseguir esto, estos dispositivos tratan de reducir la cantidad de agua que llega al punto final de vertido a la vez que intentan mejorar la calidad del agua que se vierte al medio natural.

Además, permiten el aprovechamiento del agua de lluvia para labores de riego y baldeo, y su utilización como elemento paisajístico, así como para la mejora medioambiental del entorno.

La estrategia para conseguir una adecuada gestión del agua de lluvia consiste en actuar en cada uno de los tramos de su recorrido, desde el inicio, cuando la lluvia llega a la superficie, hasta el final, cuando es vertida a la red general de saneamiento o es infiltrada en el terreno, pasando por el recorrido y transporte. Este recorrido se conoce como tren o cadena de gestión, y considera el ciclo del agua de forma global mediante las siguientes operaciones:

- Detener el agua en su lugar de origen mediante pavimentos o cubiertas vegetales.
- Ralentizar su recorrido a través del terreno urbanizado disminuyendo así la escorrentía mediante zonas de infiltración y drenaje.
- Almacenar la cantidad de agua sobrante mediante aljibes, estanques, depósitos, humedales artificiales o áreas enterradas de almacenamiento.
- Infiltrar esta agua al terreno o reutilizarla mediante zanjas de infiltración, tanques de biorretención, pozos o depósitos de infiltración. [8]

El proceso descrito puede representarse mediante la figura 6 en la que se aprecia el trabajo en cadena de los diferentes SUDS.

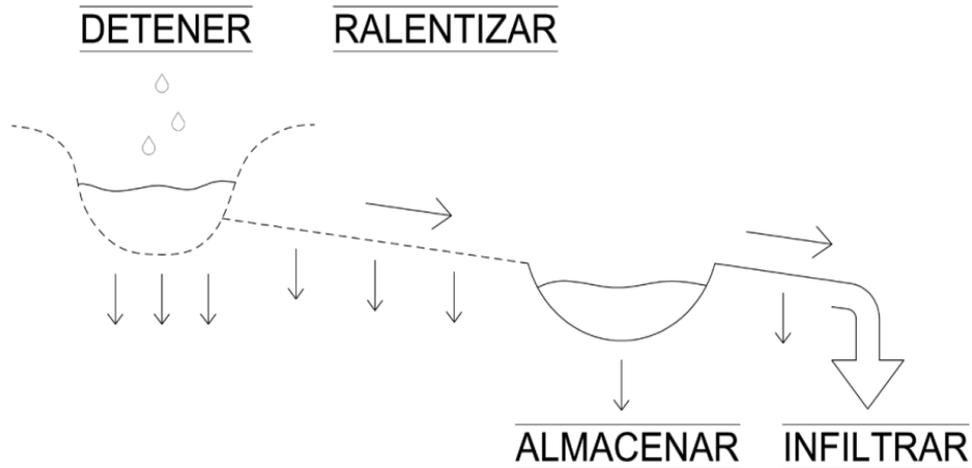


Figura 6.- Esquema de funcionamiento de la cadena de gestión del agua urbana. [6]

Como se puede ver, el primer proceso de un SUD es detener el agua cuando llega a la superficie urbanizada, por lo que se instalan en la envolvente de los edificios, en el pavimento y en elementos urbanos como rotondas, medianas, etc. Estos elementos son los jardines de lluvia (posteriormente se describirán cada tipo de SUD existente). Tras la detención es necesario ralentizar la escorrentía para no colmatar el sistema, utilizando franjas y áreas de vegetación o zanjas rellenas de material drenante. A continuación, es necesario almacenar el agua por lo que se instalan depósitos en superficies que generen estanques o balsas en zonas de parques, plazas y calles. Son las células de bio-retención y los pavimentos permeables quienes se encargan de esta operación [6]. Por último, la incorporación de un punto de almacenamiento en superficie, también en zonas menos urbanizadas, revaloriza estéticamente el lugar. La ubicación concreta de estos sistemas va a depender de diversos factores, como las características del terreno, las del entorno inmediato, y las de protección del acuífero correspondiente.

2.4.1.- Tipos de sistemas urbanos de drenaje sostenible.

A continuación, se van a describir los tipos de SUDS que existen y que están modelizados en el software EPA SWMM nombrando cada uno y detallando sus

principales elementos constructivos. Como se observa en la figura 7, los SUDS presentan la siguiente configuración:

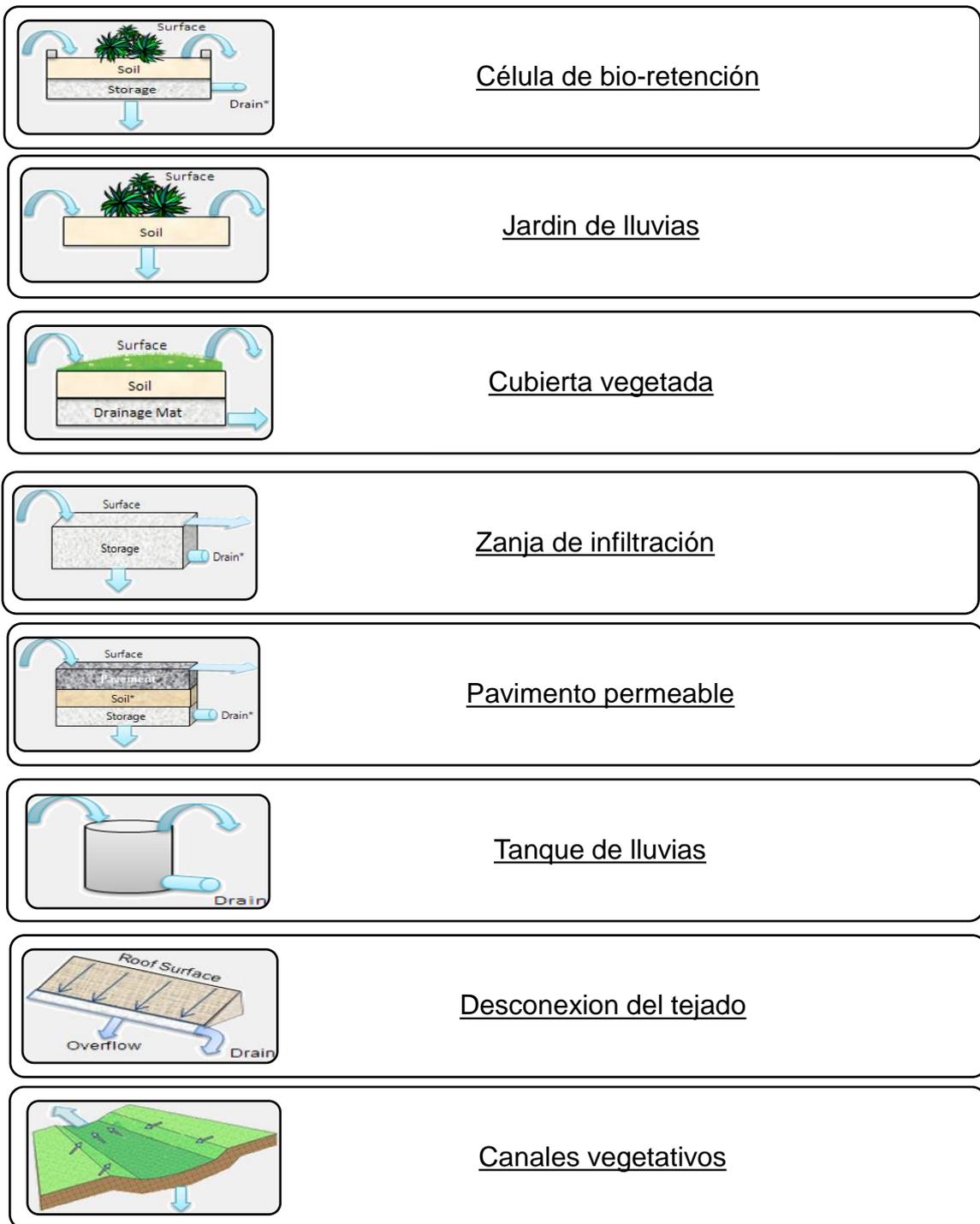


Figura 7.- Tipos de SUDS

Las células de bio-retención son depresiones que contienen un suelo vegetado y permeable sobre una capa de drenaje de grava. Estos proporcionan almacenamiento, infiltración y evaporación, del agua directa de la lluvia como de la escorrentía. El suelo permeable captura el agua de escorrentía, esta pasa a través del suelo disminuyendo su velocidad, facilitando el drenaje y disminuyendo la escorrentía. Suele contener un depósito de almacenaje que permite aprovechar el agua filtrada para otros usos.

El jardín de lluvia, consiste en un suelo vegetado como en las células de bio-retención, pero sin grava bajo el mismo. Su función se limita a recoger y reducir la escorrentía, y esta es absorbida por el suelo natural o llevada al alcantarillado. Las cubiertas vegetadas o tejados verdes como se les conoce popularmente, tienen la estructura de una celda de bio-retención, pero normalmente están cubiertas de una estera de drenaje especial que transporta el exceso de lluvia filtrada desde techo hasta el almacenamiento correspondiente.

Las zanjas de infiltración, son zanjas estrechas llenas de grava que interceptan la escorrentía de las áreas impermeables *aguas arriba*. Proporcionan un volumen extra de almacenamiento y permiten la infiltración del agua en el suelo. El pavimento permeable, consiste en zonas excavadas y rellenas con grava y pavimentada con una mezcla asfáltica o de hormigón poroso. Toda el agua de la lluvia pasa inmediatamente a la capa de almacenamiento de grava que posteriormente se infiltra al suelo natural de la zona. Otra alternativa es utilizar adoquines permeables donde el agua de la lluvia se captura por el hueco existente entre ellos. Estos elementos suelen colocarse en un aparcamiento o en una calle asfaltada.

Los tanques de lluvia, son cisternas que recogen el agua de escorrentía de tejados y canalizaciones durante las tormentas la cual se puede liberar posteriormente o ser reutilizada en periodos de escasez de esta. Están formados por un depósito que almacena y drena el agua.

El sistema de desconexión de tejados, consiste en descargar el agua de lluvia recogida sobre los tejados a áreas permeables ajardinadas, en lugar de directamente al sistema de drenaje. Pueden modelarse también tejados con desagües conectados hacia esas áreas permeables.

Los canales vegetativos, son canales con los laterales inclinados y cubiertos de vegetación. Ralentizan el transporte de la escorrentía recogida para darle más tiempo a la infiltración al suelo natural de la zona debajo del canal [9].

2.4.2.- Los pavimentos permeables.

Una superficie permeable tradicional, es un pavimento construido por el hombre que permite el paso del agua a su través. Estos sistemas están constituidos por un volumen de material permeable situado bajo una superficie que permite el paso del agua pudiendo tratarse de: césped, césped reforzado, grava, pavimento de bloques impermeables con huecos rellenos de césped o grava, pavimento de bloques impermeables con ranuras sin relleno alguno, pavimento de bloques porosos, o pavimentos continuos de cualquier tipo de mezcla porosa [10].

El agua atraviesa la superficie permeable, que actúa a modo de filtro, hasta la capa inferior que sirve de reserva, de manera que se atenúan las puntas del flujo en situaciones de lluvia intensa. Esta reserva puede ser transportada a otro lugar o infiltrada, si el terreno lo permite. El exceso de agua se controla mediante un desagüe superior o un drenaje superficial diseñado a tal efecto. Los expertos aconsejan que las diferentes capas deben tener permeabilidades crecientes, desde la superficie hasta la base para que el agua fluya y no se quede retenida en su interior. Habitualmente se incluyen geotextiles que actúan como filtro y como refuerzo estructural. [11]

Las diferentes capas permeables retienen diferentes sólidos, aceites y grasas y los hidrocarburos retenidos pueden biodegradarse con el tiempo. Las investigaciones más relevantes llevadas a cabo para intentar mejorar la eficacia de esta biodegradación se han realizado en la Universidad de Coventry [12] y de Cantabria [11].

Los pavimentos permeables están siendo utilizados en aparcamientos para vehículos ligeros, carreteras con baja intensidad de tráfico, áreas peatonales, accesos a nuevas zonas residenciales, caminos o patios. En España existen pocos manuales sobre la aplicación de este tipo de superficies, siendo las empresas que comercializan estos sistemas, como por ejemplo la australiana Atlantis, las encargadas de ofrecer orientación y guía sobre su diseño y

ejecución. Sin embargo, si requieren una limpieza que asegure la adecuada filtración del agua. Existen muchas otras consideraciones técnicas a la hora de implantar los pavimentos permeables. En el resumen del Congreso de Drenaje Urbanístico realizado en Pamplona [13] se resumen algunas de ellas.

2.4.3.- Las nuevas tendencias en pavimentos permeables.

A pesar de las muchas ventajas que los pavimentos permeables tradicionales aportan al tratamiento sostenible del agua de lluvia, no hay que olvidar que también presentan algunas desventajas. Entre ellas, las más destacadas son la colmatación, es decir, la pérdida de la capacidad filtrante y la degradación o pérdida de su capacidad portante [13].

La continua investigación en este campo ha llevado a desarrollar otros elementos constructivos que puedan realizar el mismo efecto que los pavimentos permeables tradicionales con mayor eficiencia y durabilidad. A este respecto, la conocida como *Celdilla Atlantis* es uno de ellos.

Atlantis es una empresa australiana dedicada a la fabricación de materiales y estructuras para recoger y gestionar agua filtrada mediante superficies permeables. La celdilla fabricada por esta empresa, es una estructura formada por un conjunto de cubos huecos semejante a un panal de abejas que actúan de filtro para la lluvia mediante la interacción entre el agua, suelo, vegetación, aire y microorganismos que simulan un suelo de un ecosistema natural. Están formadas de polipropileno reciclado en su totalidad, además se pueden ensamblar fácilmente gracias a su diseño y se pueden disponer tanto vertical como horizontalmente para drenar, y también de manera agrupada para almacenar o canalizar.

Las principales ventajas de estas celdillas sobre los pavimentos tradicionales, son su ligereza y su gran capacidad portante. Se instalan envueltas en geotextiles de alta calidad. Posteriormente se recubren con material granular, pues así se genera un espacio enterrado por el cual puede circular agua en cualquier sentido.

Hay dos tipos de celdillas de drenaje según su altura, una de 30 mm y otra de 52 mm.



Figura 8.-Celdilla de drenaje Atlantis de 52mm [14]

Como se observa en la imagen, es una estructura similar a la de un panal de abejas, con celdas tridimensional, huecas, y perforadas tanto horizontal como verticalmente. Sus principales aplicaciones son como estructuras drenantes, conductos planos para drenajes longitudinales, estabilizantes y vegetación de taludes y depósitos enterrados.

La celdilla de 52 mm presenta las siguientes características filtrantes:

- Flujo celda en horizontal: 150L/min/m.
- Flujo celda en vertical: 1200L/min/m.
- Capacidad acumulación: 50L/m².
- Volumen hueco disponible: 90%.
- Porosidad superficie drenante: 70%.

Como ya se ha mencionado, las celdillas Atlantis están hechas de polipropileno. El polipropileno es un termoplástico que se obtiene de la polimerización del propileno o propeno. Gracias a su versatilidad es utilizado en un amplio número de sectores como por ejemplo en componentes y piezas de vehículos, componentes eléctricos, envases de alimentos, materiales industriales y, ahora también, como componente básico de las celdillas para pavimento drenante.

Las características que lo hacen adecuado para este uso son:

- Elevada resistencia mecánica tanto a la fatiga como al impacto.
- Temperatura de fusión elevada (165° aproximadamente) lo que permite trabajar a altas temperaturas.
- Material poco absorbente que por tanto no se deteriora con el agua.
- Gran resistencia frente a los ataques químicos y biológicos.
- Gracias a su baja densidad es un material ligero.
- Buen aislante térmico.

Pero la característica más importante y que por ello lo hace un material sostenible es que es 100% reciclado.

2.4.4.- Algunos ejemplos de éxito.

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible S.L. es una empresa española pionera en su sector, fundada en 1998 cuyo objetivo es gestionar las aguas de la lluvia, mediante técnicas de urbanismo de bajo impacto, infraestructuras verdes y SUDS. Actualmente, también se encarga del diseño y asesoramiento de este tipo de proyectos tanto a nivel nacional como internacional.

A continuación, se muestran algunos de los proyectos más importantes que esta empresa ha realizado en el espacio público urbano con este tipo de celdillas.

- Aparcamiento en la nueva sede de Softtek en Las Rozas (Madrid).

El objetivo del proyecto era reducir el vertido de aguas pluviales a la red de saneamiento en el aparcamiento existente mediante la instalación de un pavimento permeable y depósitos planos enterrados y encadenados.



Figura 9.- Proyecto de aparcamiento en Las Rozas

Como se puede observar en la secuencia, la primera imagen nos muestra el aparcamiento convencional que existía. Se levantó entero el pavimento y se instalaron depósitos conectados entre sí para dirigir hacia los colectores los excesos de agua. Estos estaban cubiertos por una *celda Atlantis* y finalmente, este conjunto de elementos fue recubierto con grava dando lugar al pavimento permeable de la última foto de la secuencia.

- Naturación urbana en las calles Toledo y Calatrava de Ciudad Real.

El objetivo de este proyecto era construir un pavimento permeable vegetado con celdas de drenaje.



Figura 10.- Proyecto de naturación de calles en Ciudad Real

En la primera imagen se ve la instalación de la *celdilla Atlantis* en la parte inferior de la capa. Esta actúa como depósito permeable para favorecer la infiltración previa al colector que existía anteriormente (imagen 2). Finalmente se recubre el

pavimento con hormigón y cubierta vegetal para favorecer la filtración del agua como se aprecia en la tercera imagen. [14]

GreenBlue Urban es una empresa inglesa, aunque con varias sedes a lo largo de todo el mundo (una en A Coruña), dedicada a la construcción de espacios verdes e infraestructuras urbanas de agua, de ahí su nombre. La empresa se dedica a construir zonas verdes en urbanizaciones (parques, jardines, etc.), que aporten beneficios a los ciudadanos y ayude a la venta de los edificios cercanos a estas áreas. La empresa se caracteriza por su versatilidad, realiza numerosos tipos de proyectos en varios sectores como en áreas comerciales, institucionales, compartidas, entornos urbanos, etc. A continuación, se van a mostrar dos ejemplos de SUDS implantados en espacios urbanos por esta empresa.

- Depósito de almacenamiento de aguas pluviales para la Blue Springs High School (Blue Springs, Missouri).

El objetivo principal del proyecto era reducir las inundaciones causadas por la lluvia en la zona, a la vez que se ampliaba la escuela.



Figura 11.- Depósito de almacenamiento de agua de lluvia en Missouri

Como se puede ver en las imágenes el mecanismo empleado es muy similar al mostrado en la figura 9. En este caso las celdillas son muy parecidas (denominadas RootSpace) y han sido diseñadas por la propia empresa. Para cumplir el objetivo se realizó un pozo para enterrar el RootSpace formando un gran depósito capaz de almacenar la cantidad excesiva de agua acumulada por

las precipitaciones intensas. Finalmente, el depósito se cubrió con un pavimento permeable de brea para facilitar el drenaje. Como se observa fue instalado bajo el aparcamiento de la escuela ya que era una zona extensa y apta para dicho propósito.

- Greener grangetown en Cardiff.

El aumento de las zonas urbanas hace que cada vez haya más zonas pavimentadas e impermeables, por lo que las inundaciones en el área de estudio eran cada vez más frecuentes. Por tanto, la empresa decidió implementar una serie de SUDS a lo largo de toda la ciudad y sobre todo en las zonas de mayor densidad de población.



Figura 12.- Proyecto de permeabilización de superficies en Cardiff

El proyecto consistió en construir a lo largo de la ciudad jardines de lluvia. En la primera imagen aparece instalado el Rootspace cubierto de grava que permitirá el drenaje a las correspondientes tuberías y almacenamiento de las aguas. En la segunda y tercera se muestra la disposición de los jardines instalados donde se plantaron un total de 135 árboles de y 19 especies diferentes.

Como se deduce de los ejemplos anteriores y de muchos otros que no aparecen en este trabajo, la instalación de pavimentos permeables es un área en expansión que involucra tanto a las empresas como a los centros de investigación y que debe ser estudiada desde todos los ángulos posibles. Esta es la razón por la que se ha planteado el estudio de este tipo de infraestructuras en este trabajo, cuyos objetivos se detallan a continuación.

3.- OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos de este trabajo han sido los siguientes:

- Diseñar una red unitaria de drenaje convencional que pueda predecir posibles eventos de lluvia en la ciudad de Tudela.
- Estudiar el posible efecto que sobre esas situaciones puede tener la inclusión de un pavimento urbano filtrante.
- Modelizar una *celdilla Atlantis* y estudiar sus características geométricas.
- Modelizar con EPASWMM el comportamiento hidráulico de estas celdas.

4.- METODOLOGÍA

Para llevar a cabo los objetivos descritos anteriormente, se pasa a describir la metodología de trabajo que se va a realizar y a describir los diferentes softwares empleados.

4.1.- Descripción del software EPA SWMM.

El software *Stormwater Management Model* (SWMM) es un programa diseñado por la Agencia Norteamericana de Medioambiente, *Environmental Protection Agency* (EPA) que permite realizar una simulación de fenómenos hidrológicos y que ofrece la posibilidad de realizarla para un único suceso, o para una situación continua en un largo periodo de tiempo. Además, permite simular la calidad y la cantidad del agua evacuada.

Fue creado en el 1971, y a lo largo de los años el programa ha ido evolucionando hasta llegar a la versión actual 5.1, que con la que se va a trabajar en este proyecto. El programa permite insertar datos hidrológicos para el área de estudio y mediante su herramienta de simulación permite ver su comportamiento del drenaje urbano en los diferentes elementos de la red diseñada. Los resultados se proporcionan en forma de gráficas, tablas o simulaciones dinámicas que nos muestran la evolución del evento de estudio. Además, permite incluir mapas de contorno para el área de drenaje.

Presenta tres módulos, el módulo hidrológico o de escorrentía, el módulo hidráulico o de transporte y el módulo de calidad. En cuanto al primero, se crea una escorrentía a partir de la inserción de cuencas en las que cae el agua de lluvia. Cada cuenca consta de subáreas permeables e impermeables. El segundo módulo estudia el recorrido de dichas aguas que atraviesan el conjunto de canales, tubos, depósitos, bombas, etc. Por último, el tercer módulo permite estimar la producción y evolución de la carga de contaminantes de la escorrentía. Mediante el modelo hidrológico el programa nos permite conocer distintos parámetros como son la acumulación y deshielo de nieve, la evaporación de aguas superficiales estancadas, la entrada del agua de la infiltración en acuíferos, el grado de infiltración de las precipitaciones en capas del suelo no saturadas, etc.

El módulo hidráulico, que es el que se va a utilizar con preferencia en este trabajo, permite analizar el flujo causado por la escorrentía superficial y el caudal proveniente de cada subcuenca, de las redes de tuberías y de los depósitos o vertederos. Este modelo permite, además, trabajar con redes de todo tipo de tamaños, emplear conducciones abiertas y cerradas con diferentes geometrías además de canales abiertos, incluir el uso de depósitos o bombas, vertederos y configurar diferentes tipos de flujo.

En cuanto al módulo de calidad del agua el programa permite modelar los arrastres de contaminante durante un episodio de tormenta, evaluar la acumulación de depósitos dependiendo de la frecuencia de limpieza de las calles y calcular la acumulación de un contaminante sobre las calles durante un periodo seco.

Este programa se utiliza principalmente para diseñar estructuras de contención y drenaje en la red para prevenir y controlar inundaciones, establecer zonas inundables, crear estrategias para controlar la red y reducir el número de descargas de sistemas unitarios, valorar impactos producidos por aportes e infiltraciones en descargas de sistemas de evacuación de aguas residuales, generar cargas de fuentes contaminantes para estudiar acumulaciones de residuos y valorar eficacia de las prácticas de gestión del agua con el objetivo de reducir carga de contaminantes durante una tormenta. [15]

4.2.- Descripción del software SOLIDWORKS.

Solidworks es un software de diseño asistido por computadora en 3D que permite la realización de planos en 2D y modelar piezas y ensamblajes en 3D. Fue fundado en 1993, pero su primera versión del CAD 3D no se lanzó hasta 1995. Al ser de licencia anual, la firma lanza cada año una nueva versión de este, introduciendo nuevas mejoras de contenido en el programa. Además, también ofrecen la licencia estudiante para uso académico donde se limita el acceso a determinado contenido. En este proyecto se trabaja con la versión 2021 del mismo.

Está compuesto por una serie de programas que permiten crear, simular, diseñar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño. Ofrece las soluciones al proceso de desarrollo de producto con un conjunto de herramientas que lo hacen más eficaz y productivo:

- Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes.
- Herramientas de diseño para la fabricación mecánica.
- Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que es el mejor posible
- Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño durante su ciclo de vida.
- Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica.
- Finalmente, todas estas herramientas están respaldadas por SolidWorks PDM para gestionar y controlar de forma segura los datos mediante una única fuente de datos reales de sus diseños y SOLIDWORKS Manage, una herramienta que gestiona los procesos y proyectos implicados en todo el desarrollo del producto y está conectado al proceso de diseño.

Todas estas soluciones funcionan de forma conjunta para permitir que las empresas mejoren la fabricación de sus productos y los elaboren de forma más rápida y económica. [16]

4.3.- Elección y descripción del área de estudio.

La zona objetivo de estudio es parte de la zona de Griseras de Tudela, debido a que es una zona que sufre frecuentes inundaciones cuando ocurren episodios de lluvia intensa y lluvia torrencial.

Tudela es una ciudad de la comunidad foral de Navarra, considerada la capital de la Ribera, y perteneciente a la cuenca hidrográfica del Ebro. Está situada a orillas de este río y en la desembocadura del río Queiles. La extensión y situación de la cuenca puede verse en la figura 13.



Figura 13.- Cuenca del río Ebro [17]

El río y por consiguiente la cuenca, como se puede observar, se extiende desde su nacimiento en Cantabria hasta su desembocadura en la costa catalana en el Mar Mediterráneo. Abarca una extensión del 17,3 % de la península y está situada entre la cordillera Cantábrica, Pirineos, Sistema Ibérico y las Cordilleras Costero-catalanas. Por lo tanto comprende las comunidades autónomas (en su totalidad o parcialmente) de Cantabria, Castilla y León, País Vasco, Castilla-La Mancha, La Rioja, Navarra, Aragón, Cataluña y la Comunidad Valenciana [18].

Por su situación y su morfología geográfica, Tudela es una zona inundable, de ahí que casi todos los años se pueden ver episodios de desbordamiento del río en la ciudad, pues ésta se sitúa a escasos metros por encima del nivel del río. Todo esto ha dado lugar a declarar varias zonas de la ciudad como inundables. El servicio de *Infraestructuras de Datos Espaciales de Navarra* (IDENA) facilita una gran información sobre la hidrografía de la zona en uno de los cuales se muestran las zonas inundables de la ciudad. A continuación, se muestra en la figura 14 el mapa de zonas inundables elaborado por este servicio.

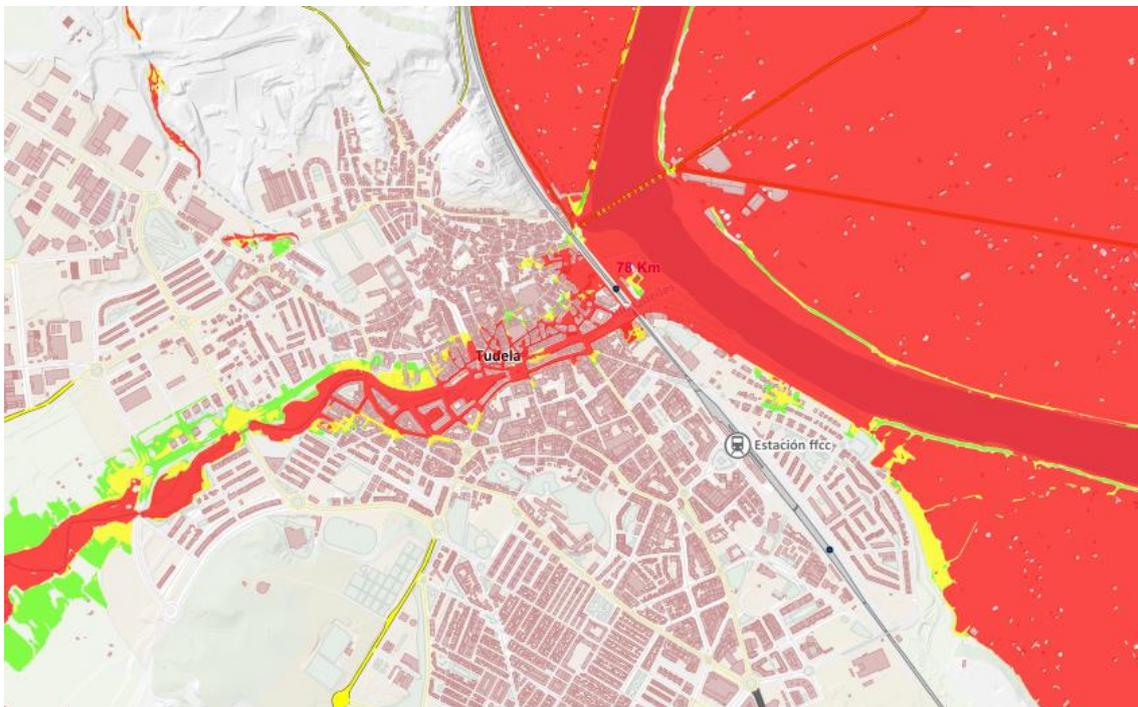


Figura 14.- Zonas inundables de la ciudad de Tudela [19]

Como se puede ver se muestran en rojo las zonas que corren riesgo de inundación. En cuanto al casco urbano inundable, coincide con la depresión del Queiles debido a la altitud respecto al nivel del Ebro. Cuando el río Ebro sube de nivel, el río Queiles empieza a inundar las calles del casco viejo de la ciudad. A este problema se une el crecimiento que la ciudad ha experimentado en las últimas décadas que ha aumentado el porcentaje de suelo impermeable y la escasa pendiente del terreno sobre el que la ciudad se asienta. Tampoco mejora la situación el hecho de que la ciudad, edificada hace tiempo, consta



Figura 16.-Plano del área de estudio [20]

El área seleccionada objeto de estudio, es la marcada en rojo en ambos planos, y como se observa se ha seleccionado la zona mencionada (parte de la zona de Griseras). Una vez seleccionada la zona y delimitada se ha medido el área de estudio mediante los instrumentos suministrados por el Sistema de Información Territorial de Navarra (SITNA), resultando un área total de 32.72 hectáreas.

Para estudiar la zona y poder trabajar con el software EPA SWMM, ésta se va a dividir en 15 subcuencas. La división en subcuencas es un requisito para poder modelizar el comportamiento hidrológico de la zona. Se supone que cada subcuenca recoge toda el agua en un punto, marcado en la figura por un cuadrado y desde allí va a ser conducida por el sistema de drenaje urbano hasta el vertedero final, este ya a la salida de la ciudad y situado en el extremo inferior derecho de la figura. Finalmente, el agua llegará hasta el tanque de tormentas de la ciudad y posteriormente a la estación depuradora. Estos elementos se encuentran al otro lado de la vía del tren y están señalados en amarillo. Las subcuencas se muestran en la figura 17.

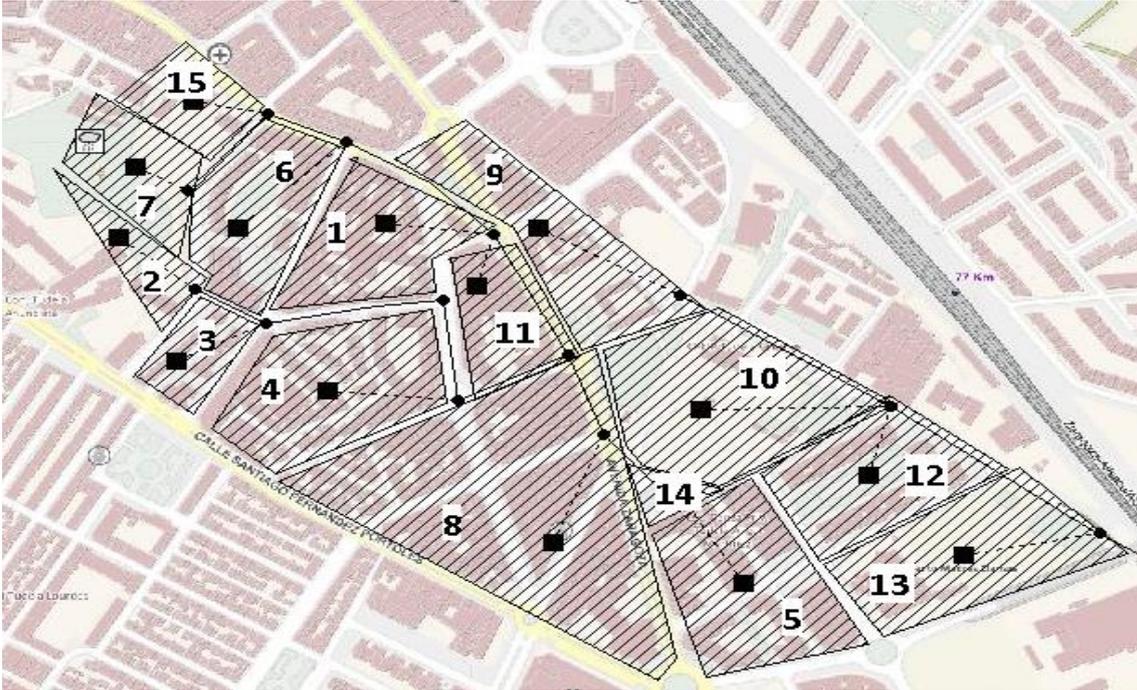


Figura 17.-Subcuencas de la zona de estudio

Las subcuencas están limitadas por las siguientes calles:

1. Subcuenca 1: Av. Santa Ana, C. Aquiles Cuadra, C. Fuente Canónigos y parte de C. Juan Antonio Fernández.
2. Subcuenca 2: Parte de C. Mauleón y de la zona canina pinos Corazón de María.
3. Subcuenca 3: Desde C. Mauleón hasta Av. Santa Ana y Av. Barrio de Lourdes.
4. Subcuenca 4: Desde Av. Barrio de Lourdes hasta C. Fuente Canónigos y desde C. Almajares hasta C. Aquiles Cuadra y Av. Santa Ana.
5. Subcuenca 5: C. Monasterio de oliva, Av. Zaragoza, C. Carlos III el Noble y C. Sancho Abarca.
6. Subcuenca 6: C. Mauleón, Av. Santa Ana y C. Juan Antonio Fernández.
7. Subcuenca 7: C. Mauleón y C. Urzante y parte de la zona canina pinos Corazón de María.
8. Subcuenca 8: Av. Zaragoza, C. Raimundo Lanás y Av. Del Barrio de Lourdes.

9. Subcuenca 9: C. Almajares, Av. Zaragoza, Cam. Caritat y C. Juan Antonio Fernández.
10. Subcuenca 10: C. Almajares, Av. Zaragoza, Carlos III el Noble y Cam. Caritat.
11. Subcuenca 11: C. Fuente Canónigos, Av. Zaragoza y C. Almajares.
12. Subcuenca 12: C. Carlos III el Noble, C. Blanca de Navarra, C. Sancho Abarca y Cam. Caritat.
13. Subcuenca 13: C. Blanca de Navarra, Cam. Caritat, C. Sancho Abarca y C. Camino San Marcial.
14. Subcuenca 14: C. Carlos III el Noble y Av. Zaragoza.
15. Subcuenca 15: C. Urzante, C. Juan Antonio Fernández, C. Mauleon y parte de la zona canina pinos Corazón de María.

4.4. Diseño de la red unitaria.

Una vez definida el área y las subcuencas, hay que diseñar la red unitaria. Luego hay que unir las subcuencas con las tuberías y nodos correspondientes y definir el nodo en el que verterán su caudal.

Estos primeros parámetros se recogen en la tabla 1.

Tabla 1.- Características de las subcuencas

	Área (ha)	Pendiente (%)	Impermeabilidad %	Nodo
Subcuenca 1	2	0.5	30	6
Subcuenca 2	1	11	20	3
Subcuenca 3	0.8	0.5	25	1
Subcuenca 4	2.5	0.5	25	8
Subcuenca 5	2	0.5	25	11
Subcuenca 6	3	0.5	25	2
Subcuenca 7	2	5	25	25
Subcuenca 8	4	0.5	70	10
Subcuenca 9	3.5	0.5	25	26
Subcuenca 10	3.5	0.5	10	12
Subcuenca 11	1.5	0.05	25	6
Subcuenca 12	1.5	1	40	12
Subcuenca 13	2	0.5	20	13
Subcuenca 14	0.22	0.1	50	11
Subcuenca 15	2.2	0.5	25	24

La tabla muestra la extensión de cada subcuenca comprendida entre 0,22 y 3.5 ha. La impermeabilidad es moderada en algunas zonas con más zonas verdes (la mayoría entre 20 y 40%) y en algunos casos elevada (50 y 70%) debido una elevada urbanización del área. En cuanto a la pendiente solo es acusada en la subcuenca 2 y 7 que corresponde a la zona de esparcimiento canino de Torre Monreal.

Los nodos sobre los que cada subcuenca descarga también se muestran en la tabla. En la imagen 18 se van a mostrar el número asignado a cada uno para poder asociar cada nodo con su subcuenca correspondiente.

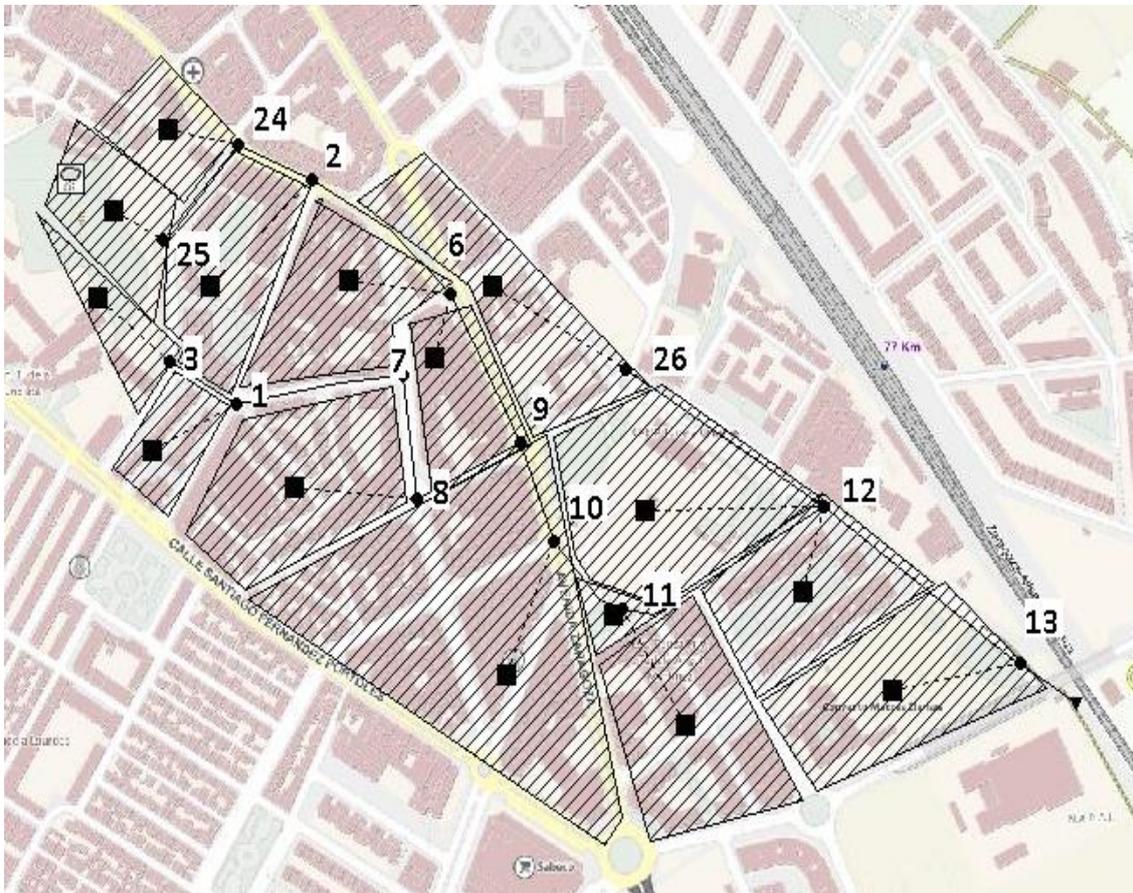


Figura 18.-Numeración y situación de los nodos

La imagen muestra un total de 14 nodos, esto es, cada subcuenca descarga en un nodo diferente (las líneas discontinuas son los conductos de la subcuenca al nodo), pero como tenemos un total de 15 subcuencas hay un nodo compartido

que como la tabla anterior muestra es el nodo 11, que recoge las aguas tanto de la subcuenca 5 y 14.

Además de los descargaderos de las subcuencas que acaban en los nodos, están las tuberías que unen los nodos y forman la red de drenaje, las cuales se han numerado y se muestran en la figura 19 en la que también aparece el vertedero final (V1) donde finaliza la red y desde donde el agua va a la estación depuradora, pasando, como se ha dicho anteriormente, por el tanque de tormentas.

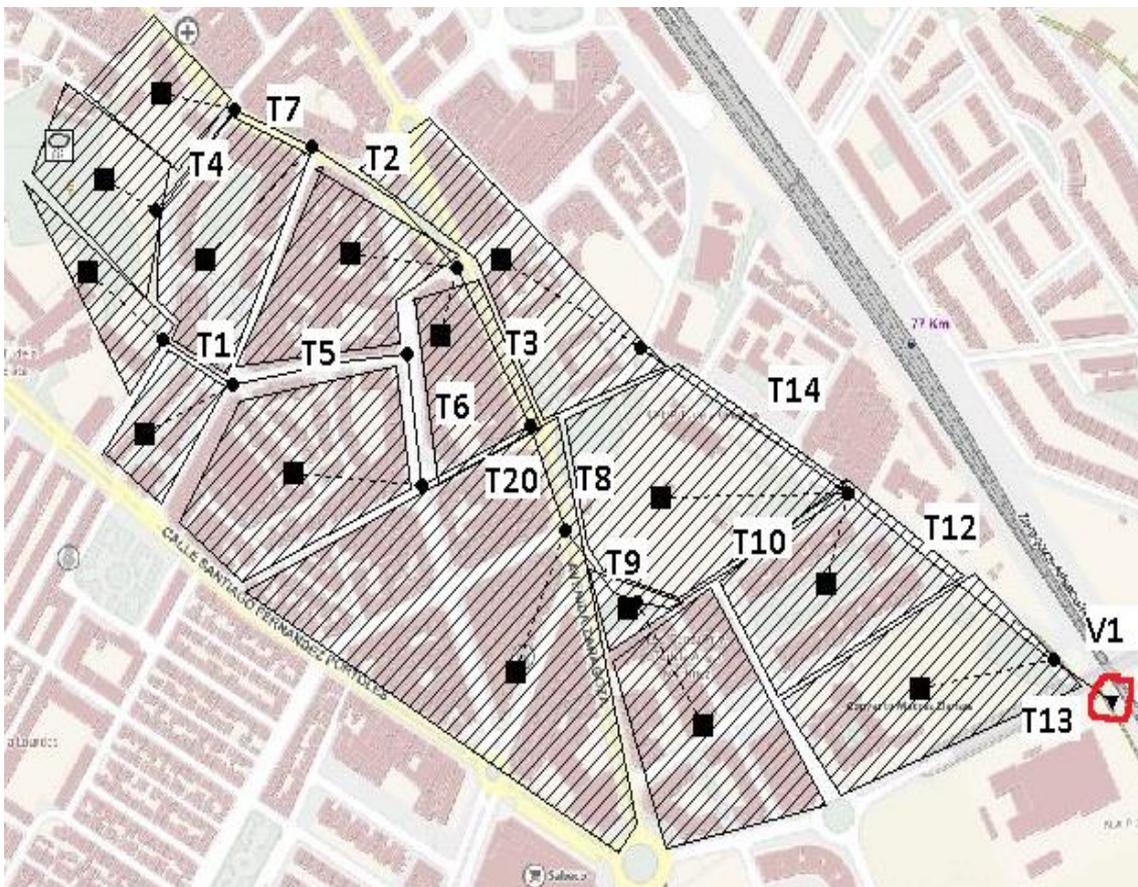


Figura 19.-Numeración y situación de las tuberías y del vertedero final V1

Hay un total de 14 conductos representados por líneas continuas. Uno de ellos (T13) es el que une la red con el vertedero V1. Toda esta información se recoge en la tabla 2.

Tabla 2.- Características de los conductos

Conducto	Nodo origen	Nodo destino	Longitud (m)
T1	3	1	48
T5	1	7	125
TT6	7	8	100
T8	9	10	95
T9	10	11	100
T10	11	12	195
T12	12	13	235
T13	13	V1	65
T3	6	9	136
T2	2	6	160
T4	25	24	100
T7	24	2	80
T14	26	12	200
T20	8	9	120

En la tabla podemos destacar la longitud el conducto 12 (235m) que une los nodos 12 y 13. También hay que destacar el conducto T1 por su longitud, pero al contrario que el 12, éste es el más corto (48m) uniendo los nodos 3 y 1.

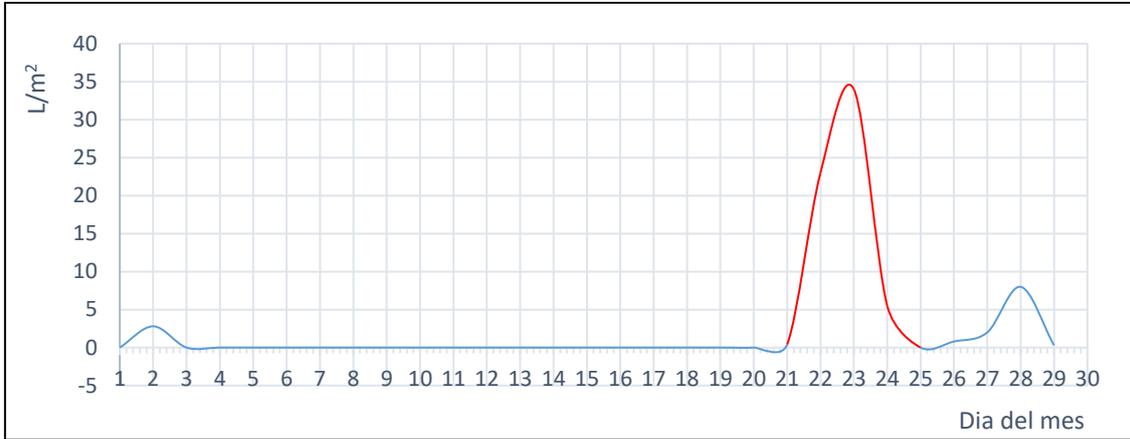
4.5.- Elección de los eventos de lluvia.

Para realizar el estudio de las consecuencias de la lluvia en esta zona, se va a analizar con el programa EPA SWMM dos episodios distintos de lluvia. El programa suministrará la situación hidrológica que se genere mediante diferentes parámetros como el caudal de escorrentía, los nodos inundados o el tiempo de sobrecarga de las tuberías. También se verán simuladas el conjunto de soluciones SUDS que se añadan a cada situación.

Para llevar a cabo este estudio, se van a analizar dos sucesos reales de diferentes características y se compararan con la situación que realmente se vivió en la zona para ver en qué grado en programa puede simular la realidad. En uno de estos episodios el sistema de alcantarillado asimiló correctamente los efectos de la lluvia (22-23 de noviembre de 2021) y el otro (1 de septiembre de 2021) provocó inundaciones las zonas más bajas de la zona estudiada.

El evento de lluvia ocurrido en Tudela entre el 22 y el 23 de noviembre de 2021. En el programa se ha denominado como LL1. En esta ocasión el sistema de alcantarillado drenó adecuadamente la cantidad de agua y aunque había agua

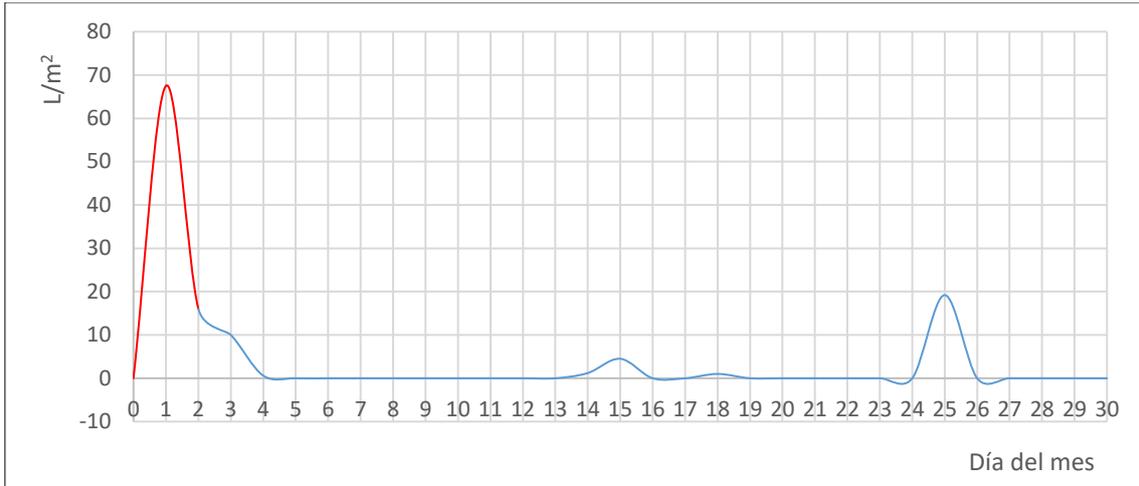
en superficie, esta no logró saturar el sistema. Se hizo uso de los datos suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Dichos datos se representan en la figura 20.



Gráfica 1.- Precipitaciones del mes de noviembre de 2021

En el eje horizontal se representan los días del mes mientras que en el eje vertical los litros por metro cuadrado de agua que se registraron. Como se aprecia en la gráfica, casi la totalidad de las precipitaciones del mes se concentraron a partir del 21 del mes y fueron más intensas entre el 22 y el 24 de dicho mes. El patrón de lluvias de noviembre es un patrón típico de la zona de estudio en el que el tiempo es seco la mayoría de los días y las lluvias se concentran en dos o tres días a lo sumo. Estos periodos prolongados sin lluvia causan que la contaminación se acumule sobre la superficie y que cuando llueve, sea dicha contaminación sea arrastrada por la escorrentía en concentraciones altas.

El segundo episodio corresponde a las precipitaciones del mes de septiembre de 2021. El día 1 de septiembre, las precipitaciones se concentraron en un breve periodo de tiempo y el sistema de alcantarillado no pudo asumir la cantidad de agua, por lo que varias calles de la zona de estudio se inundaron. En el programa se ha registrado como LL2.



Gráfica 2.- Precipitaciones del mes de septiembre de 2021

Las inundaciones fueron provocadas por la lluvia caída la noche del 31 de agosto al 1 de septiembre. En total cayeron entre los dos días 83,5 L/m². Como la gráfica muestra, la lluvia se concentra a lo largo de todo el mes en unos 6 días, los restantes son periodos de 10 días de ausencia de lluvia (4-14, 16-24 y a partir del día 26).

Al analizar estos patrones de lluvia, se ve que, aunque en la zona se sustituyese la red unitaria por una separativa, esto no solucionaría el problema de las altas cargas contaminantes que se acumulan en superficie y que serán arrastradas hacia la EDAR cuando vuelva a llover.

4.6. Elección del SUDS y de su localización.

Una vez se tiene modelizada la red, se elige la zona donde va a ir implementado el pavimento permeable. Esta zona corresponde a la más baja de toda la zona de estudio. Por ello, en caso de lluvia intensa, el agua tiende a acumularse allí y cuando se producen las inundaciones, gran parte del agua sobrante, también se dirige hacia allí.

En la actualidad la zona cuenta con una zona verde que constituye el *Paseo de Otoño*, una zona de juegos en las inmediaciones del *CP Griseas* y un pequeño aparcamiento convencional para unos 20 vehículos, además de la plaza de toros de la ciudad.

Por las características del terreno y el historial de inundaciones se ha pensado que se podría sustituir el aparcamiento convencional por un aparcamiento

permeable por lo que se ha elegido la subcuenca 14 para instalar dicha infraestructura. Su ubicación se muestra en la figura 20.

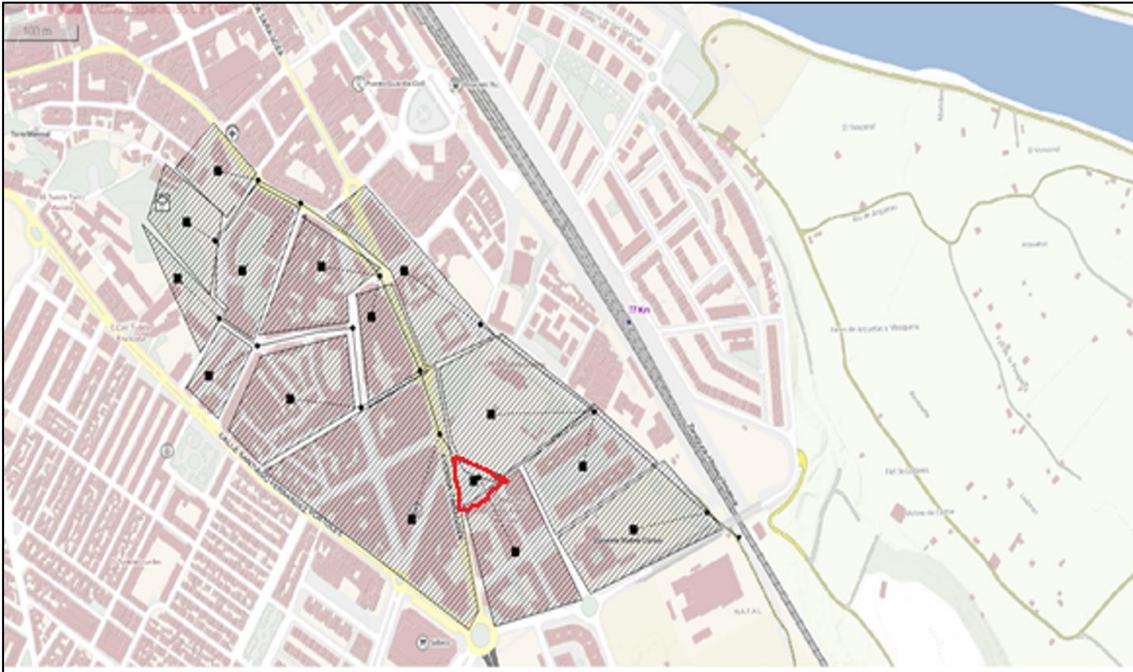


Figura 20.-Situación del pavimento permeable

Si se analizan las pendientes de cada subcuenca en el punto de recogida de agua, es decir, en cada nodo, obtenemos los valores de la tabla

Tabla 3.- Elevación de cada nodo sobre el nivel del mar

Nodo	Elevación (m)
1	280
3	283
6	268
7	272
8	271.5
9	267.5
10	266
11	264
12	264
13	264
2	272
24	272
25	279
26	265
V1	263.5

Como se observa los nodos 3, 1 y 25, son los más elevados con una altura de 283, 280 y 279 metros respecto del nivel del mar. Son los pertenecientes a las subcuencas 3, 2 y 7 respectivamente. Se aprecia una diferencia de altura de 20 metros respecto a los nodos más bajos, que son el 11 (subcuenca 14) y 12.

Por ello, como ya se ha dicho, estos puntos son los lugares donde se acumula el agua que el sistema de alcantarillado no puede asumir. Además, el descargadero (V1) está tan solo 0.5 metros por debajo (263.5 m) y por ello si la cantidad de agua supera los límites de la red el agua no podrá ser evacuada e ira ascendiendo desde el descargadero por los nodos de menor altura y saldrá a la superficie (11 y 12).

En cuanto al SUDS elegido, se va a utilizar pavimento permeable convencional. Como se ha visto, los SUDS de este tipo son zonas excavadas y rellenas con grava y pavimentada con una mezcla asfáltica o de hormigón poroso. Toda el agua de la lluvia pasa inmediatamente a la capa de almacenamiento de grava que posteriormente se infiltra al suelo natural de la zona o se drena. Por tanto, el objetivo es filtrar el agua de la lluvia, ralentizarla y almacenarla para no saturar la red y devolverla al sistema cuando este deje de estar sobrecargado.

Una vez hecho esto, se verá en que medida la instalación de un pavimento permeable mejora el funcionamiento de la red de drenaje.

4.7.- Modelización de la celdilla.

Por otra parte, la *celdilla Atlantis* no está incluida dentro de los SUDS que el programa EPA SWMM puede utilizar, por lo que se quiere establecer una correspondencia entre las características de dicha celdilla y las de un pavimento permeable convencional. Para modelizar la celdilla se ha dibujado en el plano la subcuenca y se han introducido sus características (pendiente y dimensiones), y sus correspondientes conductos y nodos que dirigen el agua al descargadero (además del episodio de lluvia). El plano queda de la siguiente manera:



Figura 21.-Situación de la celdilla Atlantis

En el programa EPASWMM se introducirán las características de la celdilla, y se elegirá el pavimento permeable convencional que más se ajuste a estas características.

5.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez introducidos todos los datos en el programa, se realizaron las simulaciones correspondientes y se obtuvieron los resultados que a continuación se detallan.

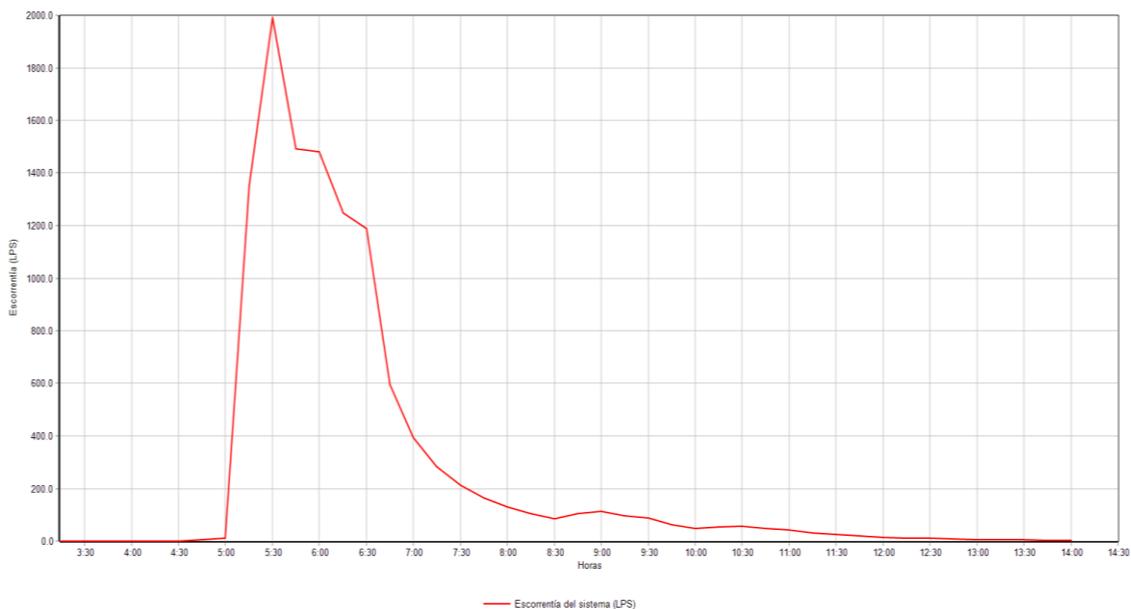
5.1. Resultados relativos a la calibración del programa.

El primer objetivo, fue comprobar si el programa es capaz de reproducir fielmente una situación de lluvia real y si es capaz de discriminar entre dos eventos de lluvia con características diferentes.

5.1.1.- Resultados producidos por el evento de lluvia del 1 de septiembre de 2021.

Como se sabe, la lluvia caía a primera hora de la mañana del 1 de septiembre ocurrió de forma torrencial ya que se produjo en un espacio breve de tiempo. Esta es la razón por la que el sistema de drenaje unitario de la zona no pudo asumir tanta cantidad de agua y se produjeron inundaciones en la Avenida de Zaragoza y en otras zonas de la ciudad [21]. En esta simulación no se ha instalado ningún pavimento permeable, por lo tanto, la simulación va a ser la de la propia red que actualmente existe en la zona. Para analizar cada punto de la simulación, se van a ir viendo los distintos parámetros que el programa ofrece en las subcuencas, conductos y nodos.

El programa, como primer resultado, suministra el patrón de escorrentía total que circula en superficie.



Gráfica 3.- Patrón de escorrentía con LL2

Como se puede ver, el patrón obtenido es similar al evento de lluvia, con un pico muy intenso entre las 5:00 y las 5:30h. que como nos indican los valores de AEMET corresponden a una intensa precipitación en un corto intervalos de tiempo.

El siguiente resultado que se va a mostrar va a ser la escorrentía que circula por cada una de las subcuencas.

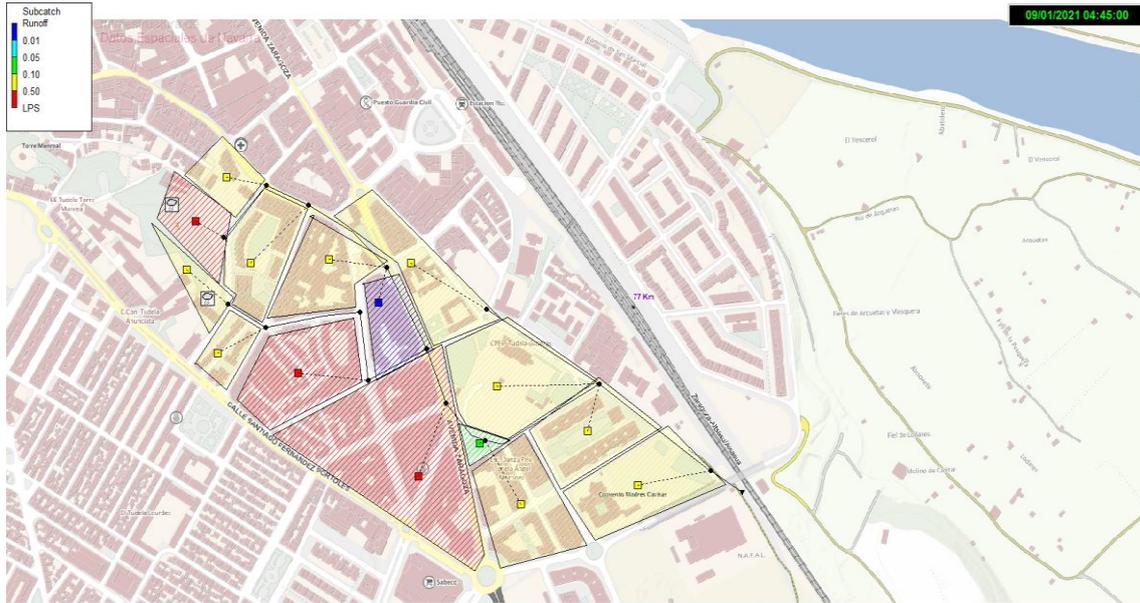


Figura 22.- Escorrentía en las subcuencas a las 4:45 h con LL2

Como se ve en la figura, a las 4:45h empieza a haber importantes caudales de agua en superficie ya que el sistema de drenaje se ha saturado. La situación empeora a las 5:15h ya que toda la zona ya está inundada.

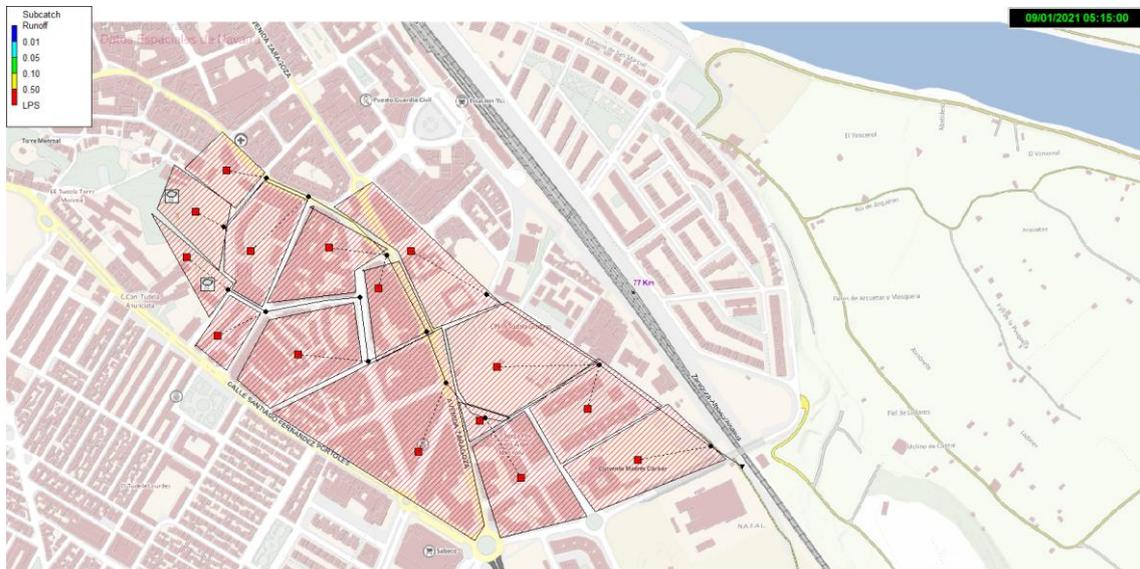


Figura 23.- Escorrentía en las subcuencas entre las 5:15h y las 7:15h

Se ve como en cuestión de 30 minutos toda la zona ya está inundada como se muestra en rojo. A las 10:30 de la mañana la situación comienza a mejorar, aunque como se aprecia en la imagen 24, a las 14:00h, todavía quedan áreas con importantes cantidades de agua en superficie.

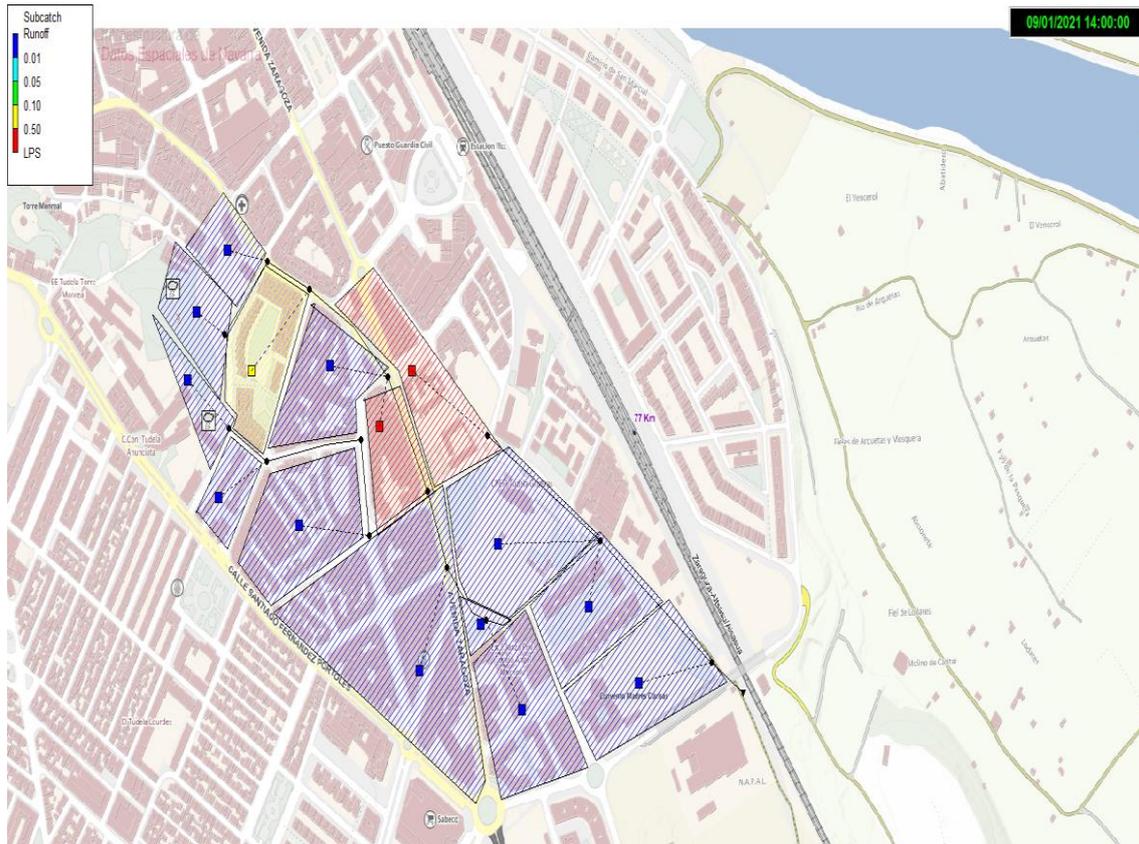


Figura 24.- Escorrentía en las subcuencas entre las 14:00h

La zona solo presenta escorrentía en 3 subcuencas, 2 en mayor medida (rojo) y otra en menor (amarilla).

Posteriormente se analiza la velocidad del agua en las tuberías y el tiempo que estas tuberías han estado sobrecargadas. Se debe tener en cuenta que las redes de drenaje están diseñadas para mantener la velocidad del agua entre los 0,6 m/s y los 5 m/s en el caso de tuberías que no son de hormigón, como es el nuestro. Valores inferiores a 0,6 m/s favorecen la sedimentación de sólidos y por encima de 5m/s se puede producir la rotura de las mismas.

En la tabla 4 aparecen tanto las velocidades en cada tubería, como el caudal máximo que circula por ellas.

Estos resultados se recogen en la tabla 4.

Tabla 4- Situación de las conducciones durante el evento LL2

Tubería	Caudal máximo (LPS)	Velocidad máxima (m/s)
T1	89.03	2.98
T5	153.12	2.49
T6	152.20	1.80
T8	478.76	2.64
T9	694.24	3.54
T10	396.36	2.02
T12	467.29	2.41
T13	568.24	2.92
T3	338.17	1.78
T2	429.15	2.61
T4	166.93	1.30
T7	286.39	1.74
T14	172.33	0.95
T20	318.73	2.22

Como se observa, las velocidades alcanzadas en las tuberías son en la mayoría de los casos, elevadas. Estas velocidades, aunque no produzcan la ruptura de las tuberías, si que pueden dañarlas de forma importante.

También se ha obtenido el tiempo que las tuberías se encuentran sobrecargadas y el tiempo que dichas tuberías han estado al límite de su capacidad.

Tabla 5- Tiempo de sobrecarga de las tuberías con LL2

Tuberías	Horas por encima de su caudal normal	Horas al límite de capacidad
T8	0.01	0.01
T9	0.01	0.01
T10	7.82	2.87
T12	8.84	1.79
T13	1.84	0.01
T3	0.24	0.25
T2	0.01	0.01
T4	0.01	0.01
T7	4.18	0.01
T14	0.01	0.01
T20	0.01	0.01

Si se atiende al número de nodos que se han inundado, los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6- Nodos inundados con LL2

Nodo	Horas inundado
6	1.38
10	0.44
11	1.80
12	0.01
26	0.85

En la tabla se puede ver que 5 de los 15 nodos han estado inundados, saliendo por tanto agua al exterior.

También es posible analizar el estado de la red a lo largo del tiempo.

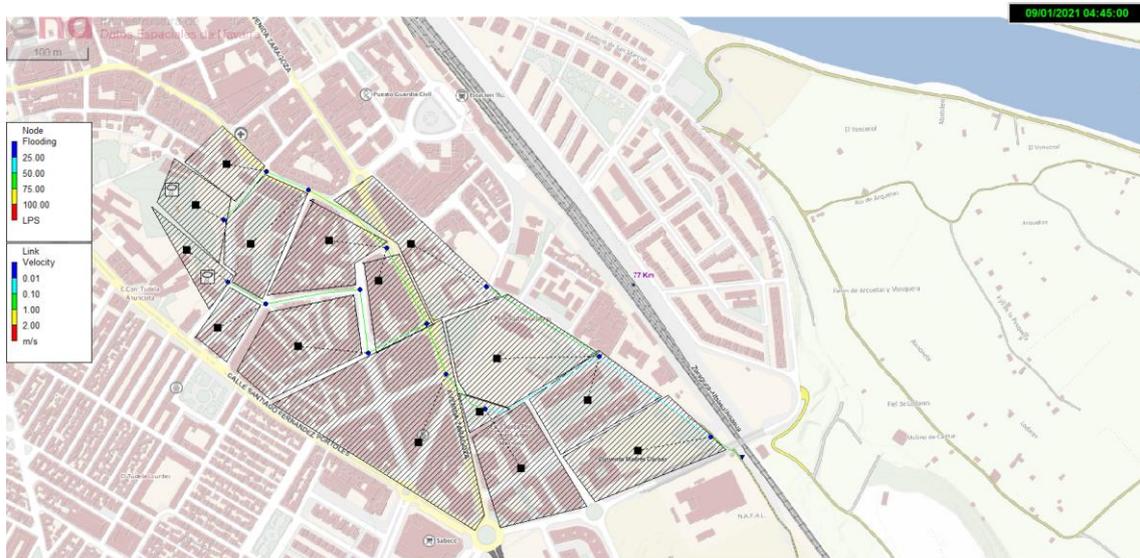


Figura 25.- Situación de las tuberías y los nodos a las 4:45h

La lluvia comienza a las 04:30 y solo en 15 minutos los conductos ya están sobrecargados y los nodos inundados. También permanece saturado el conducto del descargadero (13) como es evidente.

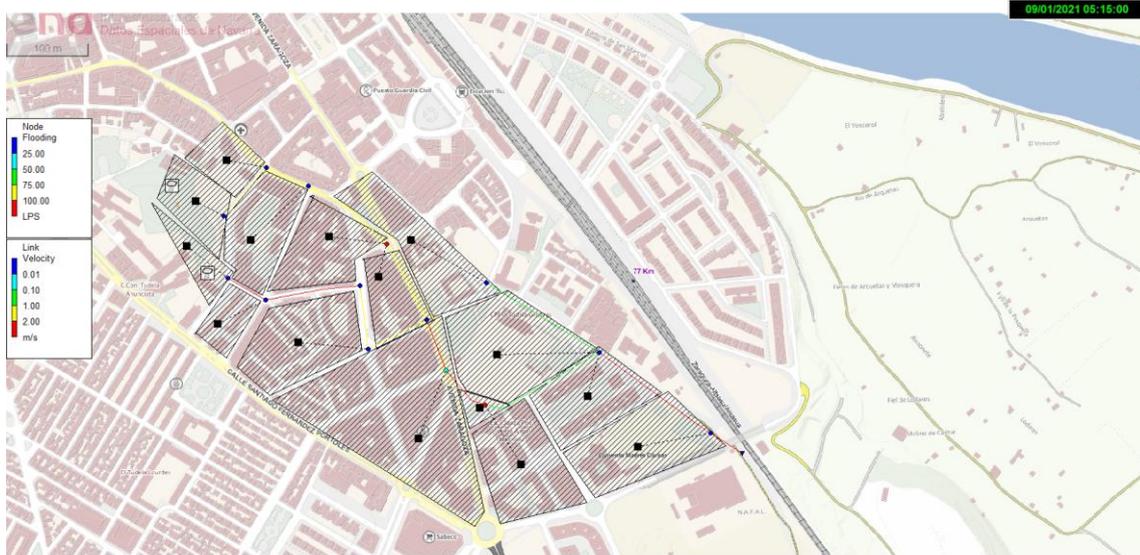


Figura 26.- Situación de las tuberías y los nodos a las 5:15h

Media hora más tarde, La velocidad del agua en las tuberías ha aumentado y algunos nodos, como el 6 y el 11, están soltando agua al exterior. Tras el cese de la lluvia, la red va desahogándose, teniendo conductos como el 2 y 5 que disminuyen su velocidad de flujo, situándose entre 2 y 1 m/s. Ahora solo el nodo 11 permanece inundado que como se puede observar es el más problemático y donde se va a instalar el pavimento permeable.

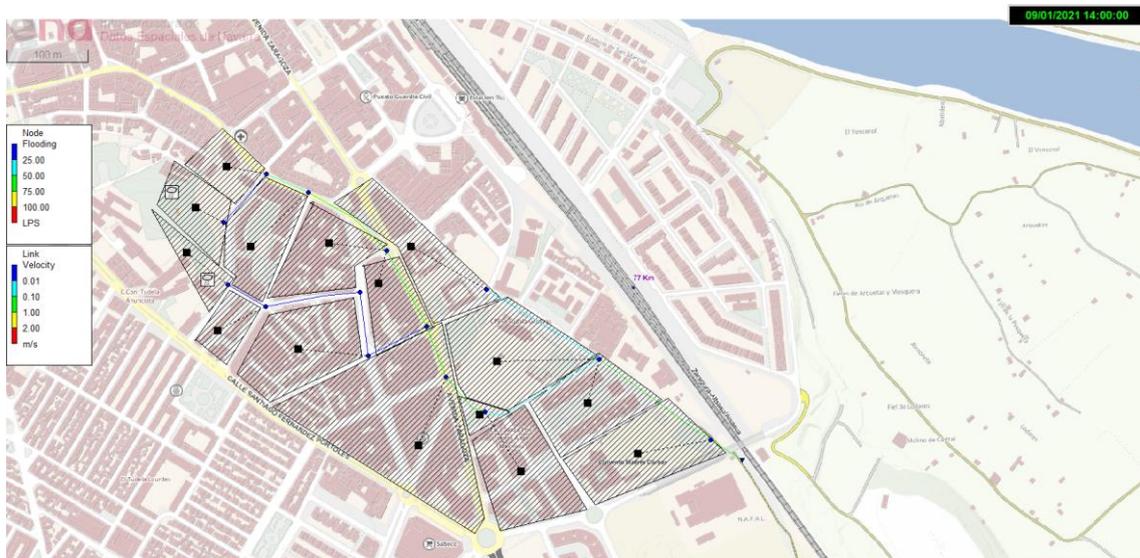


Figura 26.- Situación de las tuberías y los nodos a las 14:00h

La situación se va normalizando, aunque todos los nodos se encuentran al límite de su capacidad. Cuando el episodio de lluvia finaliza, la red está ya

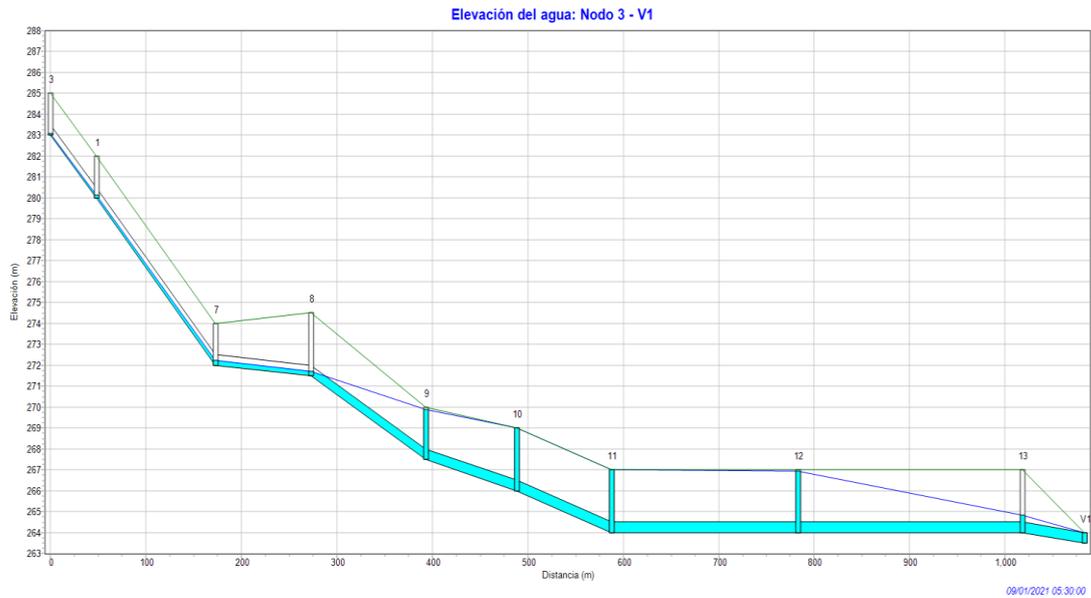


Figura 28.- Situación de las tuberías y los nodos a las 5:30h de nodo 3 a V1 con LL2

La siguiente sección abarca del nodo 3 (284 m) hasta el descargadero (263,5 m), un total de 1000 m de longitud. En este grupo también están presentes los nodos inundados, 11 y 10. Como se ha visto en el anterior perfil los nodos 12 y 9 están a punto de ello, pero no llegan a inundarse. Los nodos 3 ,1, 7, 8 y 13 no se inundan tampoco por su altitud.

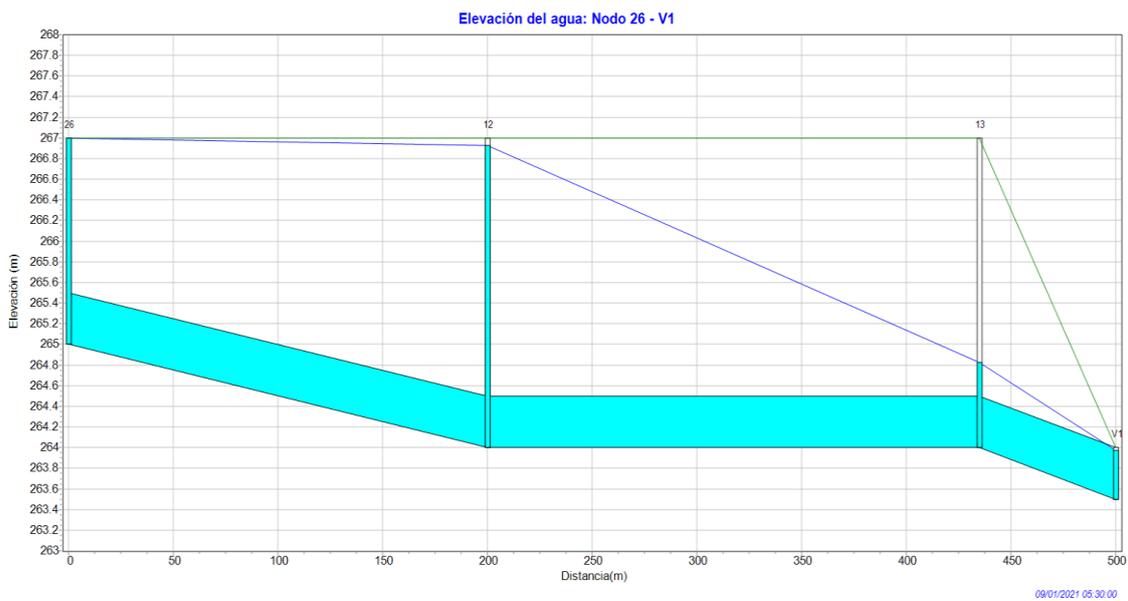


Figura 29.- Situación de las tuberías y los nodos a las 5:30h de nodo 26 a V1 con LL2

Finalmente, el último grupo que serían los nodos y conductos del extremo de la zona está compuesto por los nodos 26, 12 y 13 al descargadero. En esta imagen se aprecia como el nodo 12 no llega a inundarse, mientras que el 26 sí que lo hace. La longitud de este perfil tiene un total de 600 m y un desnivel de unos 3 metros aproximadamente.

A continuación, se van a mostrar los nodos que han estado sobrecargados.

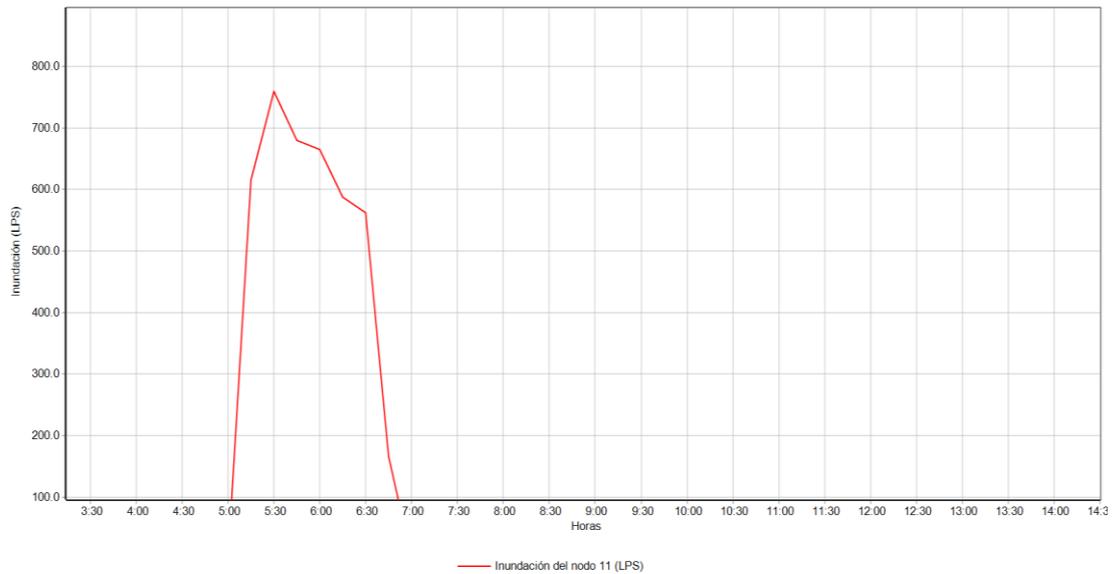
Tabla 7- Nodos sobrecargados con LL2

Nodo	Horas sobrecargado
6	1.50
9	1.60
10	1.88
11	3.06
12	2.88
13	1.79
24	0.27
26	2.02

Como se observa, durante el episodio de lluvia, son un total de 8 nodos los que permanecen sobrecargados. Se ve que el nodo 11 es el que más tiempo está sobrecargado lo que aporta un argumento más a la hora de seleccionarlo para la colocación del pavimento permeable.

El nodo 12 permanece 2.88 horas con exceso de carga, tiempo elevado también ya que es el nodo que recoge toda el agua de la red, excepto de la subcuenca 13, para ir hacia el descargadero.

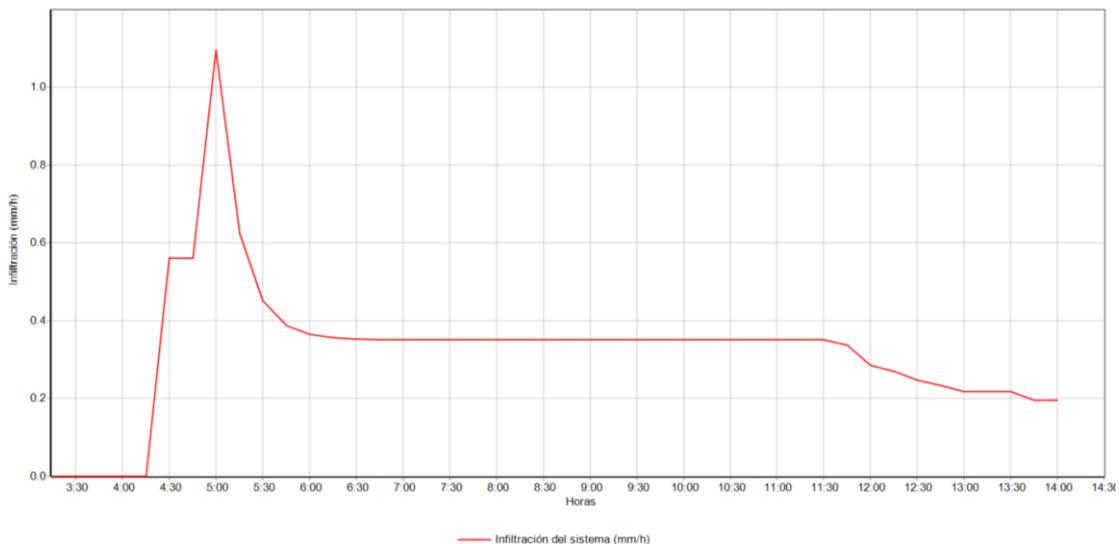
Puesto que el nodo 11 es uno de los más problemáticos y es dónde se ha elegido actuar mediante el pavimento permeable, se va a obtener la gráfica que muestra su situación concreta.



Gráfica 4.- Patrón de inundación del nodo 11 con LL2

La grafica muestra que el nodo permanece casi 2 horas inundado, lo que coincide con los datos suministrados por la tabla 6. Este tiempo es suficiente para inutilizar la zona al tránsito de vehículos y personas. La inundación llega a alcanzar un pico de unos 760 litros por segundo.

Para acabar con este análisis se va a representar gráficamente la infiltración del sistema en mm/h.



Gráfica 5.- Patrón de infiltración del sistema con LL2

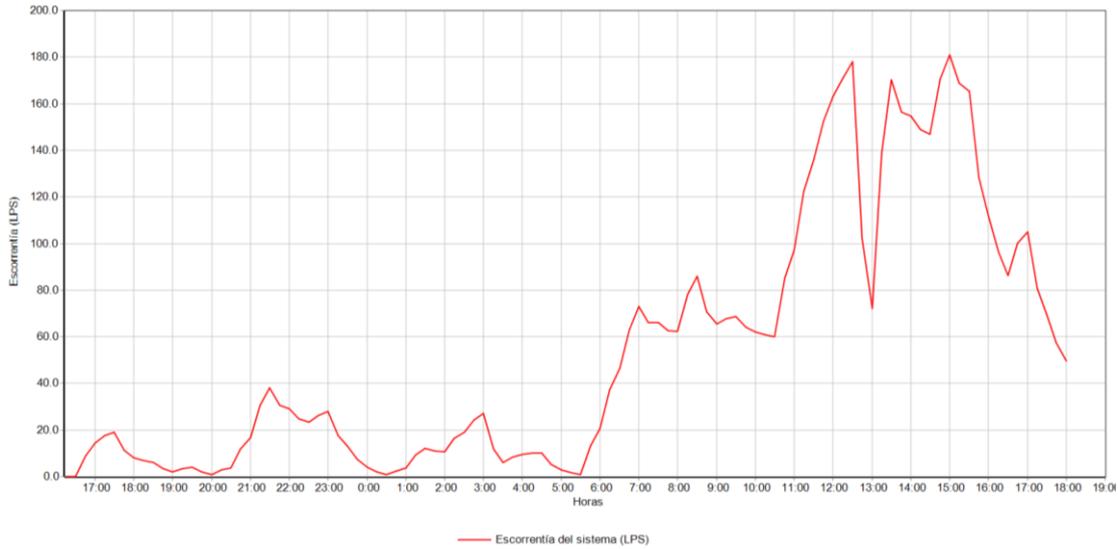
La infiltración al comienzo de la tormenta es elevada pero cuando el sistema se satura, la infiltración se reduce hasta un valor de 0.4mm/h y se mantiene constante. Que el sistema no pueda aumentar la infiltración, hace que la escorrentía que llega a las tuberías las sature y colapse, y que, a partir de ahí, la escorrentía se vaya acumulando hasta que el agua comienza a ascender por las tuberías sobrándose por los nodos de menor altura y provocándose así la inundación. Este es otro argumento más a favor de la instalación una infraestructura de drenaje sostenible que mejore la infiltración del sistema.

A modo de resumen se puede decir que los datos corroboran la necesidad de instalar algún elemento de drenaje sostenible que pueda detener, ralentizar, almacenar e infiltrar toda la escorrentía que se produce. Además, se ha visto que un posible lugar, por sus características y resultados obtenidos, es la subcuenca 14.

5.1.2.- Resultados producidos por el evento de lluvia del 22-23 de noviembre de 2021.

Para seguir completando la calibración del programa, se ha introducido el otro episodio de lluvia. Se espera que el programa responda de diferente manera al establecer otros parámetros y que los datos obtenidos se ajusten a la realidad vivida en la ciudad. Como ya se ha dicho, este episodio de lluvia (LL1) es menos intenso y las precipitaciones no están concentradas en un corto periodo de tiempo sino a lo largo de dos días. Durante este episodio, no se produjeron inundaciones en ninguna parte de la ciudad.

En primer lugar, se va a analizar el patrón de escorrentía que se produce con esta nueva situación. Se espera que, aunque el volumen total de agua caída sea similar al del episodio anterior, el patrón de escorrentía sea diferente debido a que, como ya se ha dicho, el agua a caído en un intervalo de tiempo mayor y por lo tanto el sistema de drenaje ha tenido tiempo de asumir el agua caída.



Gráfica 6.- Patrón de escorrentía con LL1

En la gráfica se puede ver que el patrón de escorrentía es diferente al obtenido anteriormente y, lo más importante, los valores pico son mucho más bajos, lo cuál nos indica que el sistema ha tenido tiempo de absorber el agua caída.

Si solicitamos al programa la situación de la escorrentía en cada subcuenca obtenemos la figura 30.

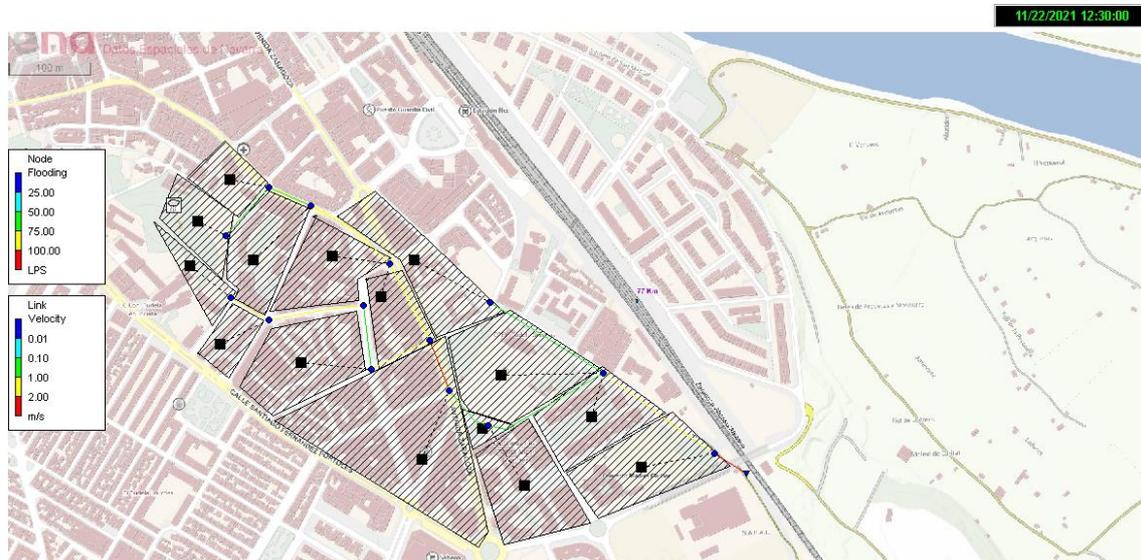


Figura 30.- Escorrentía en las subcuencas a las 12:30 del día 23 h con LL1

Como se observa en la imagen solo los conductos 8 y 13 alcanzan velocidades elevadas, aunque durante un corto periodo de tiempo, los demás se mantienen dentro de los límites de velocidad que se esperan para el transporte de agua en tuberías. Por ello no existe ningún nodo que corra riesgo de inundación en ningún

momento, pues el caudal es inferior a 25 LPS. Como se puede ver, el sistema de drenaje actual está preparado para asumir este tipo de episodios de lluvia.

Tabla 8- Situación de las conducciones durante el evento LL1

Tubería	Caudal máximo (LPS)	Velocidad máxima (m/s)
T1	6.42	1.35
T5	11.43	1.17
T6	11.40	0.84
T8	83.20	2.07
T9	110.32	0.84
T10	123.98	0.63
T12	168.99	1.11
T13	179.76	2.09
T3	58.06	1.31
T2	40.32	1.18
T4	12.69	0.42
T7	24.37	0.63
T14	18.38	0.18
T20	26.06	0.03

En la tabla 8 se ve que los caudales máximos son mucho menores que los obtenidos anteriormente y que la velocidad que alcanza el agua en las tuberías no sobrepasa en ningún caso el valor de 2,07 m/s.

Tabla 9- Tiempo de sobrecarga de las tuberías con LL1

Tuberías	Horas por encima de su caudal normal	Horas al límite de capacidad
T9	0.01	0.01
T10	20.01	3.43
T12	21.27	0.01
T7	7.47	0.01
T14	0.01	0.01

En la tabla 9 se puede ver que, aunque el número de tuberías sobrecargadas es menor que en la situación anterior, ya que en este caso solo se encuentran sobrecargadas cinco tuberías hay dos que lo hacen durante un largo periodo de tiempo. En concreto, la tubería 10 además de estar 20 h por encima de su caudal

normal, está 3.42 h al límite de su capacidad. Esta situación, aunque no haya terminado en inundación, no es buena para el correcto estado de la red y puede generar desperfectos importantes, aunque no se aprecien a simple vista.

En este caso, como no ha habido inundación, el programa nos indica que no hay nodos inundados por lo que no van a analizarse las figuras correspondientes al estado de la red.

Para comprobar que los datos obtenidos coinciden con la simulación se van a suministrar los perfiles de elevación del agua en los nodos. En primer lugar, se analiza la línea que une el nodo 25 con el vertedero V1 a las 21:30 h del día 23 de noviembre.



Figura 31.- Situación de las tuberías y los nodos a las 12:30h de nodo 25 a V1 con LL1

En la figura 31 el eje vertical representa la altitud sobre la que están situados los nodos de la línea. A las 12:30 h se produce la máxima elevación del agua en la línea, pero como se puede comprobar el sistema puede absorber el exceso de lluvia. Se puede apreciar que en ningún momento los nodos se inundan.

También se puede analizar la situación en las otras dos líneas del sistema, la que va del nodo 3 al vertedero V1 y la que va del nodo 26 al mismo descargadero.

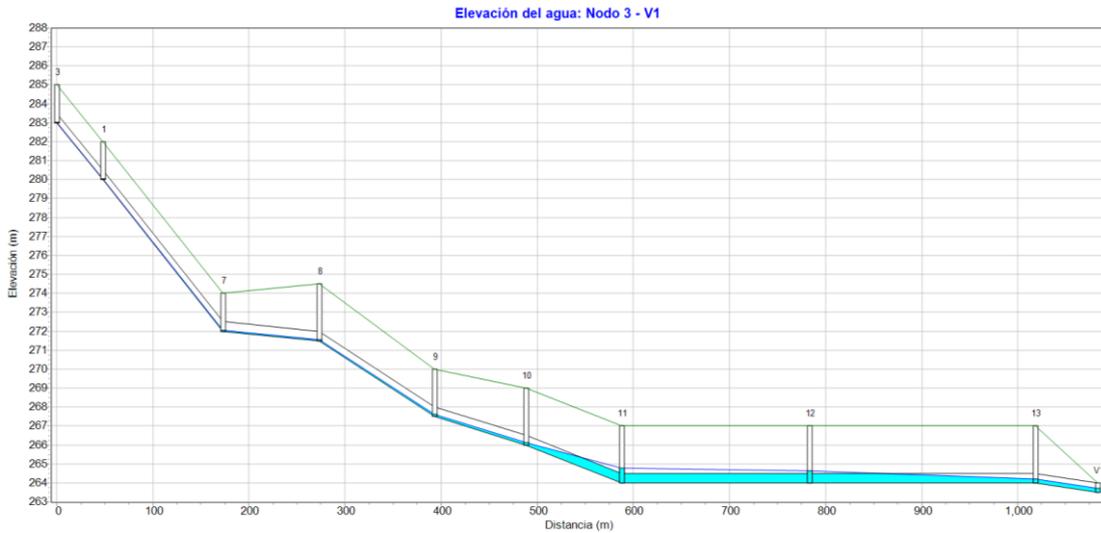


Figura 32.- Situación de las tuberías y los nodos a las 12:30h de nodo 3 a V1 con LL1

Se puede ver en la figura que la línea que une el nudo 3 con el vertedero final, que ningún nudo está inundado.

Lo mismo ocurre en la tercera línea.

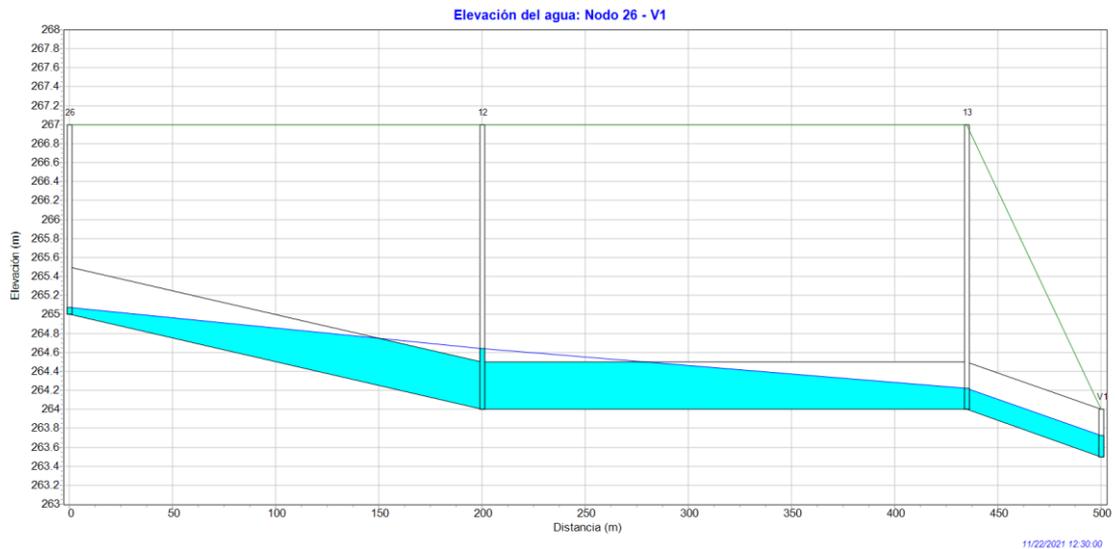


Figura 33.- Situación de las tuberías y los nodos a las 12:30h de nodo 26 a V1 con LL1

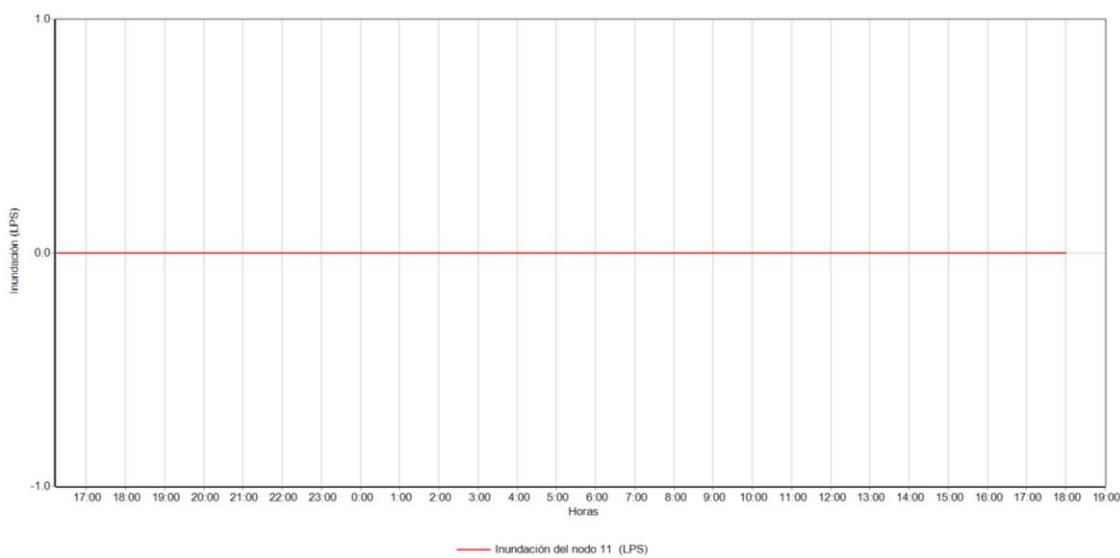
Para seguir viendo los mismos parámetros que en el primer episodio de lluvia, se van a mostrar ahora los nodos que se sobrecargan en la simulación.

Tabla 10.- Nodos sobrecargados con LL1

Nodo	Horas sobrecargado
11	4.22
12	3.40

Los únicos nodos que se sobrecargan son el 11 y 12, que permanecen 4.22h y 3.40 h sobrecargados. Aunque hay menos nodos sobrecargados que en el caso anterior, el tiempo que soportan la sobrecarga es elevado.

Si se analiza la inundación en el nodo 11, obtenemos la gráfica 34.



Gráfica 7.- Patrón de inundación del nodo 11 con LL1

En la gráfica se ve que este nodo, como ya sabíamos, no se inunda. Ya que en el anterior episodio se mostró el grado de infiltración del sistema, se quiere analizar como responde ahora el terreno ante esta nueva situación. Hay que destacar que, como en el anterior, al principio el sistema filtra gran cantidad de agua, pero a medida que aumenta la cantidad de agua, el sistema se satura y su capacidad de infiltración disminuye, llegando incluso a valores nulos. Ya que, en este caso, la lluvia está distribuida a lo largo del tiempo, el terreno puede recuperar su capacidad de infiltración. Debido a la baja permeabilidad del terreno los valores de infiltración son bajos.

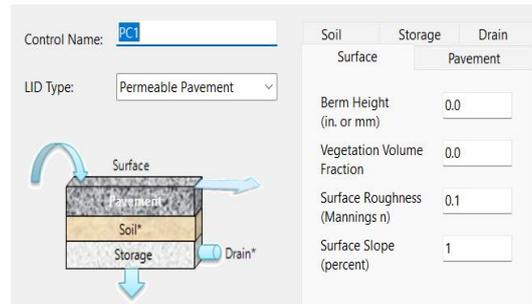
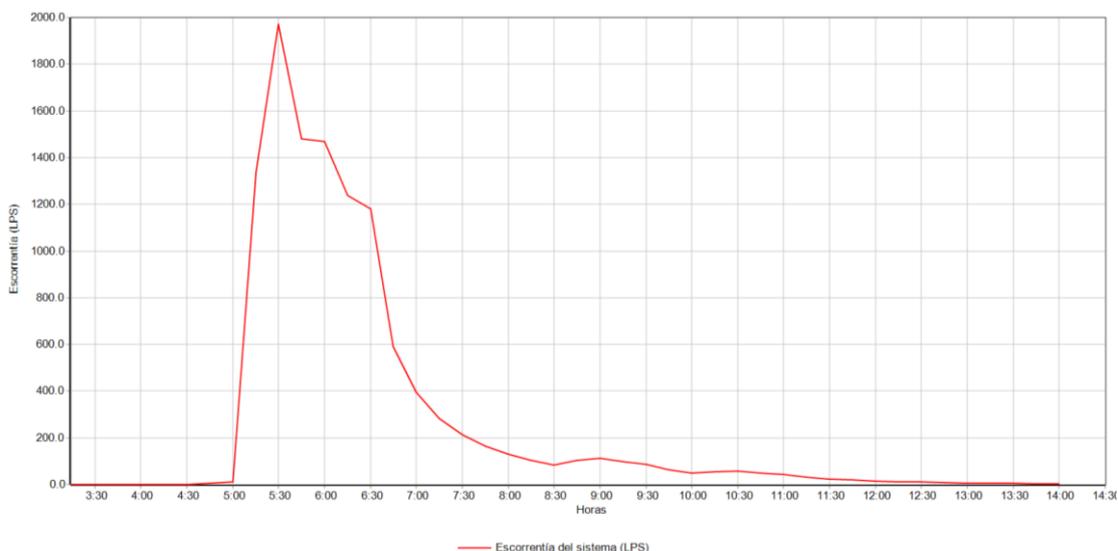


Figura 34.- Estructura de pavimento permeable convencional

En él hay que definir las características de la superficie, el pavimento, el suelo, el almacenaje y el drenaje, caso que lo haya. Los parámetros elegidos son los que los expertos [14].

- Superficie: 1% pendiente y 0.1 de coeficiente de rugosidad.
- Pavimento: espesor 10mm, ratio de vacío 0.15, permeabilidad 100mm/hora.
- Suelo: Espesor 100mm, porosidad 0.5, conductividad 0.5mm/h, conductividad pendiente 10, succión 3.5mm.
- Almacenamiento: 300mm espesor, ratio de vacío 0.75, filtración 0.5.
- Drenaje: exponente de flujo 0.5.

En primer lugar, se analizará el patrón de escorrentía que se ha generado en el sistema.



Gráfica 9.- Patrón escorrentía con pavimento permeable

Como se aprecia en la gráfica, no se ven cambios en dicho patrón. Hay que considerar que la subcuenca 14 es poco extensa en comparación con el resto, por lo que no es capaz de aliviar la escorrentía total del sistema.

Al iniciarse la lluvia, la escorrentía por las subcuencas crece rápidamente y en media hora alcanza su máximo caudal, (casi 2000 lps que se ha reducido en una mínima cantidad respecto a la primera simulación debido a la instalación del sud). Debido a que la lluvia fue intensa, la falta de infiltración, y la colmatación de los conductos y nodos existe ese pico tan grande en poco tiempo como se ha explicado varias veces.

En cuanto a la velocidad en las tuberías y el flujo máximo que circula por ellas, se pueden ver los resultados en la tabla 11.

Tabla 11- Situación de las conducciones con pavimento permeable

Tubería	Caudal máximo (LPS)	Velocidad máxima (m/s)
T1	89.01	2.98
T5	153.11	2.49
T6	152.19	1.80
T8	478.77	2.64
T9	694.24	3.54
T10	396.17	2.02
T12	466.14	2.41
T13	568.20	2.92
T3	338.29	1.78
T2	429.12	2.61
T4	166.91	1.30
T7	286.36	1.74
T14	172.33	0.93
T20	318.71	2.22

Los valores aportados por el programa no difieren mucho de los obtenidos cuando no se había instalado el pavimento permeable. Sin embargo, se aprecia

una pequeña mejoría en cuanto a los caudales máximos en la tubería 10, que es precisamente la que recoge el agua de la subcuenca 14 a través del nodo 11.

Tampoco se encuentran diferencias remarcables en el tiempo que están las tuberías sobrecargadas y en el tiempo que están al límite de su capacidad. Por esta razón, no se incluyen las tablas y figuras correspondientes.

En cuanto a los nodos inundados, se puede decir que siguen inundados los mismos nodos que en el caso sin pavimento permeable. Estos nodos son el 6, 10, 11, 12 y 26.

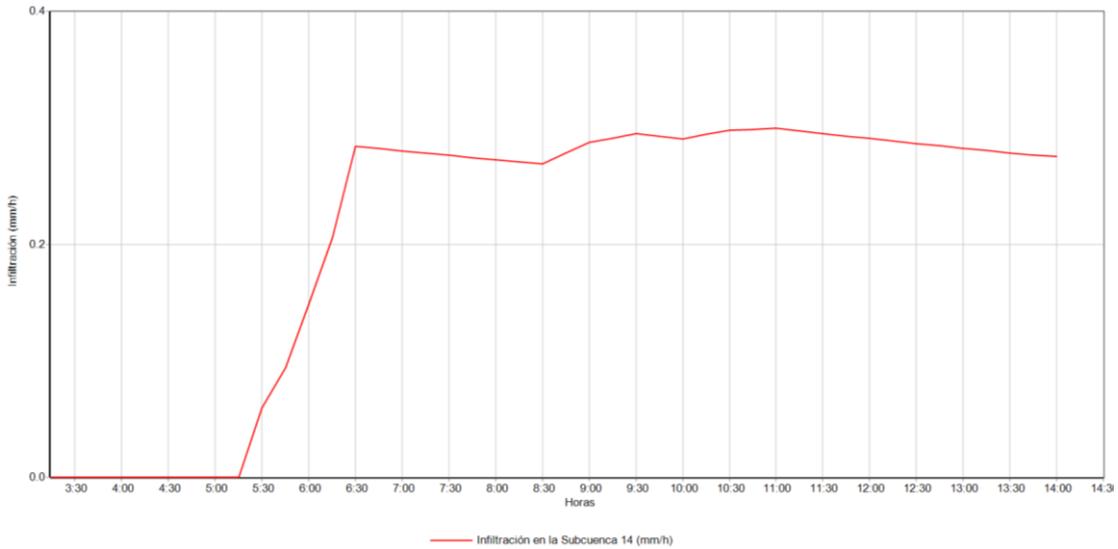
En cuanto a los nodos sobrecargados, la situación sigue prácticamente igual, aunque el nodo 10 está algo menos de tiempo sobrecargado.

Tabla 14- Nodos sobrecargados con LL2

Nodo	Horas sobrecargado
6	1.50
9	1.60
10	1.87
11	3.05
12	2.87
13	1.79
24	0.27
26	2.02

Parece que el hecho de instalar el pavimento permeable mejora ligeramente el tiempo de sobrecarga del nodo 10 que es el anterior a la subcuenca 14.

El parámetro que sufre la mayor variación es, como cabría de esperar, la infiltración.



Gráfica 10.- Patrón de infiltración con pavimento permeable

Como se ve en la gráfica 10 se produce una elevada infiltración al principio del evento de lluvia, pero luego la infiltración se hace más regular y sostenida en el tiempo.

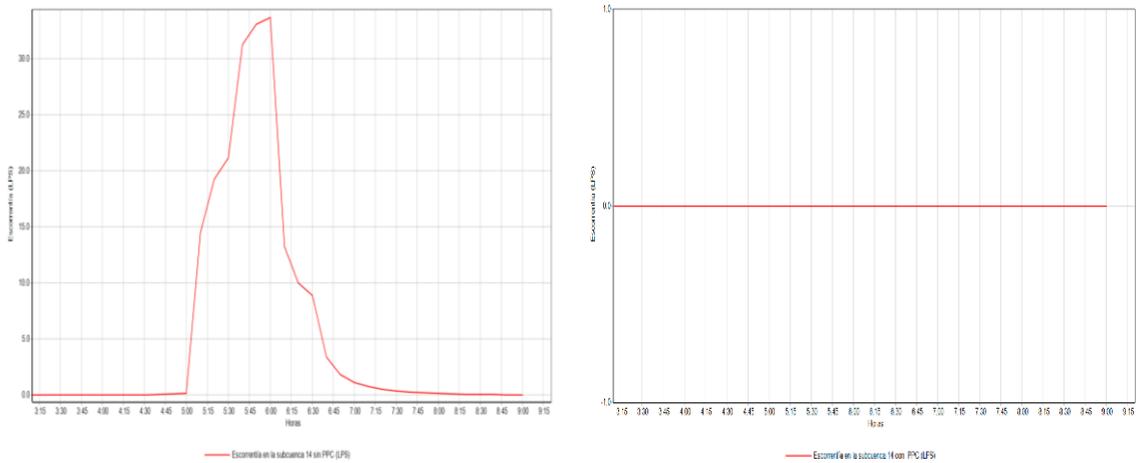
Con todo lo analizado en este apartado se puede decir que el pavimento permeable instalado no es suficiente para mejorar la situación de un área tan extensa en episodios de lluvia torrencial. Se perciben, sin embargo, ligeras mejorías en la sobrecarga de nodos anteriores y en los caudales de tuberías posteriores a la subcuenca donde se ha instalado.

5.3.-Resultados relativos al estado de la subcuenca 14 sin y con pavimento permeable.

Debido a que los resultados anteriores muestran que una única infraestructura permeable no es suficiente para percibir mejorías es en sistema, se ha decidido estudiar los efectos del pavimento permeable aislando la subcuenca en la que se encuentra de todas las demás.

Se ha tomado, por tanto, la subcuenca 14 de forma aislada, es decir, eliminando la escorrentía que le llega de las otras subcuencas y se ha simulado la situación, primero, en el caso tener un aparcamiento convencional y después, en el caso de tener instalado un pavimento permeable convencional.

Los resultados se muestran en la gráfica 11.



Gráfica 11.- Patrón de escorrentía con y sin PPC

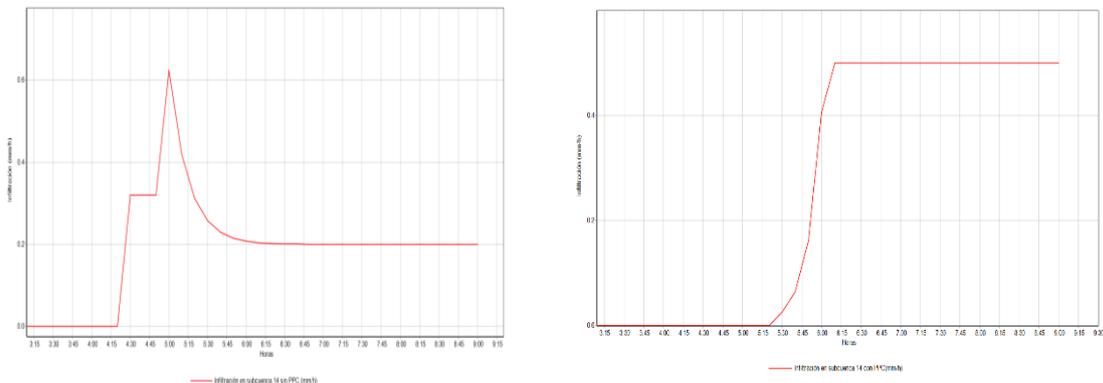
Como se ve en las gráficas, el patrón es ahora totalmente diferente. El pavimento permeable ha conseguido eliminar la escorrentía de la subcuenca.

La situación de la subcuenca ahora es la que aparece en la tabla.

Tabla 14- Situación de la SC14

	Precipitación total (mm)	Infiltración total (mm)	Escorrentía total (mm)
SC14 sin PPC	53,60	1,08	52,61
SC14 con PPC	53,60	1,54	0

En la tabla puede apreciarse la notable mejoría que experimenta la subcuenca después de instalar el pavimento permeable convencional.



Gráfica 12.- Patrón de infiltración sin y con PPC

Se ve en la gráfica como se elimina el pico de infiltración y su posterior ralentización por una infiltración más constante a lo largo del tiempo.

De los resultados analizados se puede deducir que un pavimento permeable mejora sustancialmente la situación de una subcuenca.

5.4.- Resultados relativos al diseño del pavimento de polipropileno.

Para estudiar y comprender mejor el funcionamiento de la celdilla, se ha decidido llevar un estudio más intenso de la misma, por lo que se ha modelizado una en SolidWorks con las dimensiones correspondientes. La celdilla está formada por un conjunto de cubos con huecos que permiten su llenado con material de drenaje por donde fluye y se almacena el agua. Su sistema de amarre entre ellas consta de tres pestañas que sobresalen de la estructura y que encajan sobre otras tres pestañas huecas que permiten su ensamblado, formando así una red de celdillas con las dimensiones deseada. Para su estudio, no era necesario dibujar el conjunto de cubos si no con dibujar dos, uno con cada tipo de amarre, es suficiente. El resultado se muestra en la figura 35.

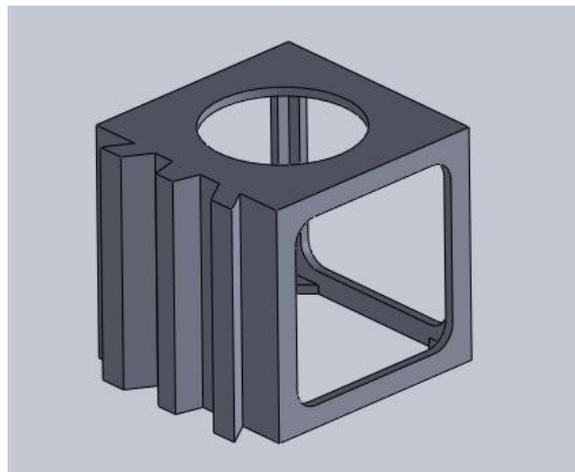


Figura 35.- Estructura de celdilla de polipropileno con tres amarres

Esta primera parte de la celdilla es el cubo que contiene los tres amarres salientes que encajan con la otra pieza. Como se puede ver y se ha mencionado, está formada por un cubo hueco que se rellena con material drenante.

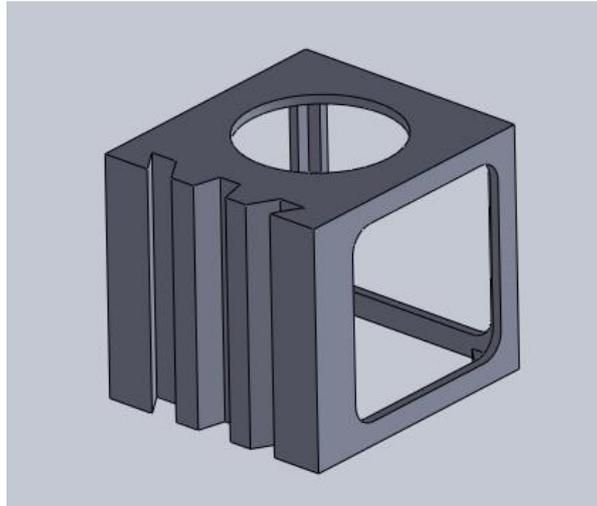


Figura 36.- Estructura de celdilla de polipropileno con amarre hueco

La otra parte es otra estructura cubica con el amarre hueco para que encajen los salientes de la otra. El ensamble de ambas piezas puede observarse en la figura 37.

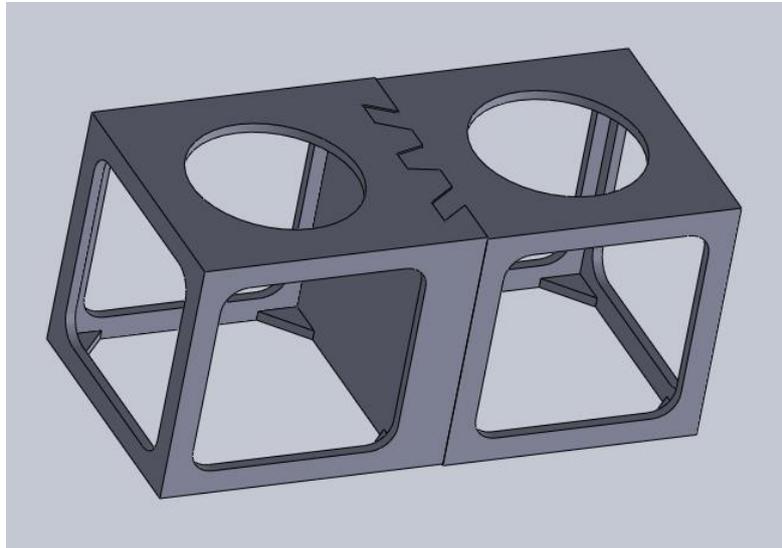


Figura 37.- Estructura ensamblada

Para situarse, en la siguiente foto se va a mostrar la *celdilla Atlantis* de nuevo donde se va a ver los amarres y ver la red que forman el conjunto de cubos.

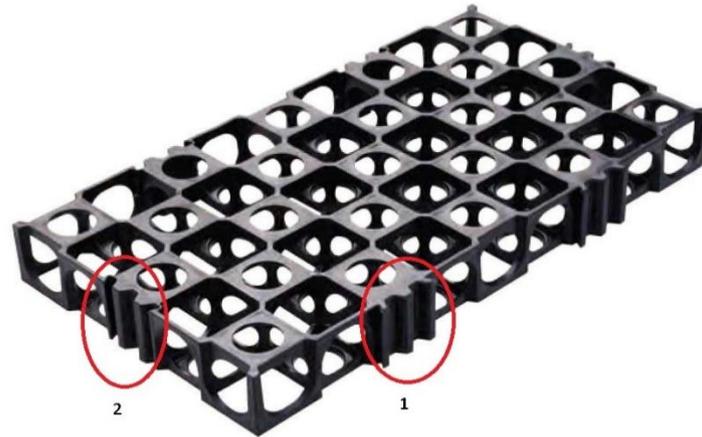


Figura 37.- Estructura ensamblada

Como se observa, la estructura está formada por un conjunto de cubos como los que se han modelizado en SolidWorks. El numero 1 muestra el amarre saliente y el 2 el entrante, que permiten el ensamble con otro conjunto de celdillas.

Ya que la universidad dispone del material y la tecnología pertinente se ha procedido también a imprimir la celdilla con una impresora 3D. Por tanto, se han convertido los archivos SolidWorks a formato .stl y se han impreso las celdillas que permiten simular en la realidad el funcionamiento de los amarres. Para ahorro de material y ya que el objetivo de la modelización es solo representar físicamente para mostrar cómo es la misma, se ha reducido su tamaño a un factor de escala de 0.75 dando el siguiente resultado que se muestra en la figura 38.

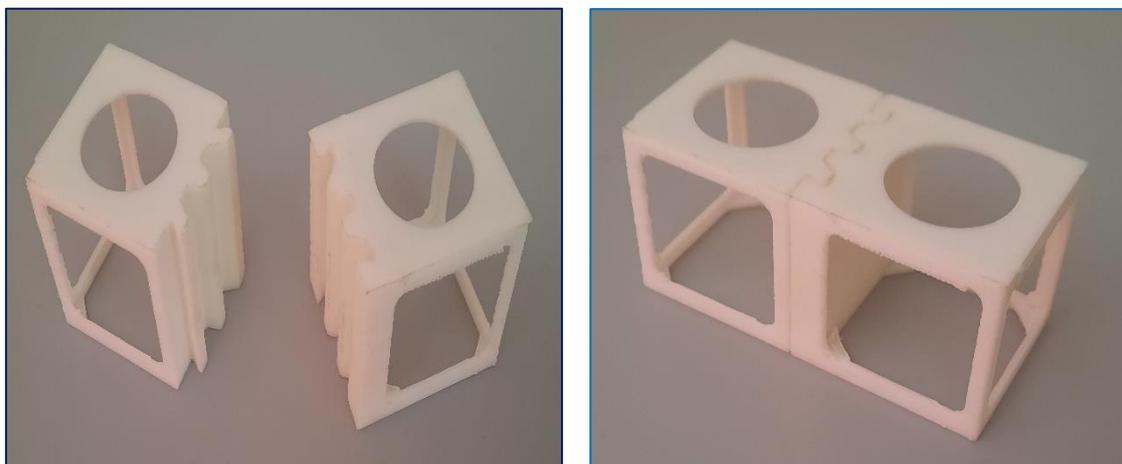


Figura 38.- Estructuras impresas en 3D

En las imágenes se puede comprobar la simplicidad del mecanismo, un amarre formado por dos partes (una saliente y otra entrante que encajan entre sí). Además, debido a su amplio hueco interior, permiten ser rellenas de gran cantidad de material de drenaje, y por ello tienen gran capacidad de infiltración y almacenaje.

5.5.- Resultados relativos a la equiparación de la celdilla de polipropileno con un pavimento permeable convencional.

Como ya se ha dicho, la morfología y la estructura de los pavimentos permeables evoluciona constantemente. Actualmente se comercializan celdillas de polipropileno, como la *celdilla Atlantis* que el software EPA SWMM no permite incorporar dentro de sus modelos. Para ello se va a buscar un pavimento permeable convencional que tenga características similares a la de las celdillas. Las características de las celdillas suministradas por el fabricante son las que se han utilizado para modelizarla en el programa y han sido descritas en la página 17 de este documento.

El pavimento permeable que presenta características hidráulicas similares a las que presenta las celdillas se ha llamado PP4.

Las características de este pavimento se pueden ver en la figura 39. Vemos que este pavimento está formado también por una capa de almacenamiento, una capa de suelo permeable, la cual puede ser de diferentes materiales, y la superficie exterior que puede estar formada de adoquines o de una mezcla asfáltica de distinto grado de porosidad.

La estructura lleva un drenaje que desagua en el nodo 11 que finalmente conceta con la tubería 10.



Figura 39.- Características del PP4

En cuanto a la superficie tiene un espesor de 10 mm con un volumen de vegetación de 0.2, rugosidad de 0.1 (coeficiente de Manning) y una pendiente de 1%.

El pavimento tiene un espesor de 30 mm, una ratio de vacío de 0.15 y una permeabilidad de 100 mm/h. Los demás valores (impermeabilidad, intervalo de regeneración) como se puede comprobar son nulos.

Las características de drenaje son 0.5 para el exponente de caudal y un diámetro en la salida de drenaje de 6 mm.

En cuanto a las características de almacenamiento, la capa tiene un espesor de 5mm un radio de vacío de 0.75 y una ratio de infiltración de 0.5mm/h.

Finalmente, en cuanto al suelo, que es la última capa de la que está compuesto este pavimento, se tiene un espesor de 80mm, porosidad 0.5, conductividad 0.5mm/h, conductividad de la pendiente 10, succión 3.5mm, un punto de marchitado de 0.1 y una capacidad de campo de 0.2.

Tabla 14- Situación de la SC14 sin y con PP4

	Precipitación total (mm)	Infiltración total (mm)	Escorrentía total(mm)	Almacenaje inicial (mm)	Almacenaje final (mm)
SC14 sin PP4	53,60	1,08	52,61		
SC14 con PP4	53,60	1,69	6,17	8	51,81

En la tabla se puede ver como el pavimento permeable convencional absorbe finalmente 45,74mm, que es la resta entre la precipitación caída y la escorrentía total junto con la infiltración.

El pavimento permeable recoge el total de las precipitaciones 53.60mm, con una infiltración total de 1.69mm. Al inicio del episodio consigue almacenar un total de 8mm y al final de este almacena un total de 51.81mm lo cual supone un 96.6% de la precipitación.

Finalmente se analizan los datos gráficamente mostrando en primer lugar la escorrentía de la subcuenca.

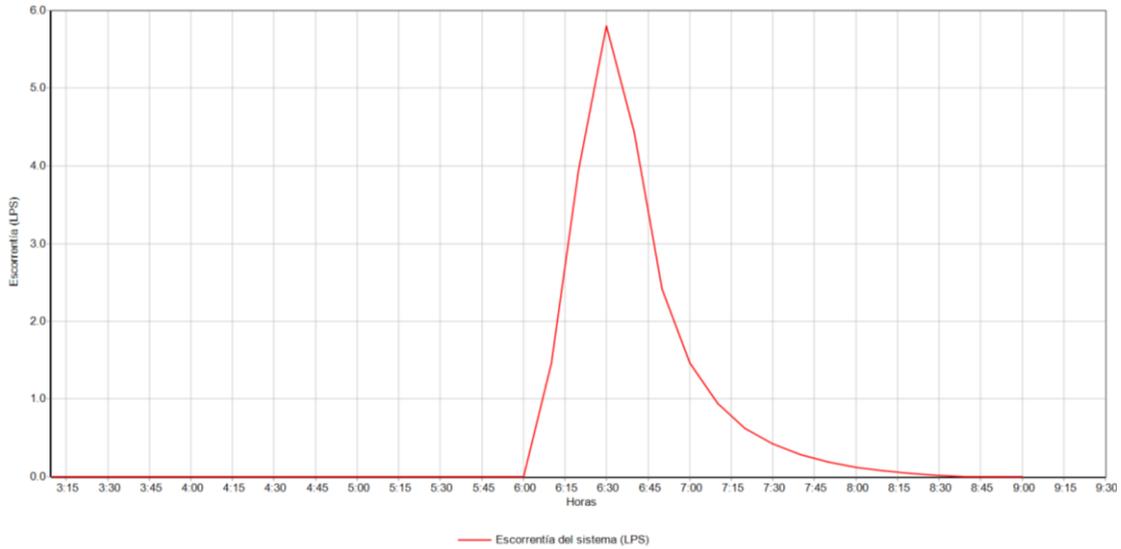


Figura 40.- Características de la escorrentía con la celdilla

Como se puede ver la escorrentía crece rápidamente debido a la lluvia intensa. Alcanza un pico de 6 L/s. Es un caudal muy bajo y además la línea crece y decrece rápidamente por la capacidad de drenaje de la celdilla.

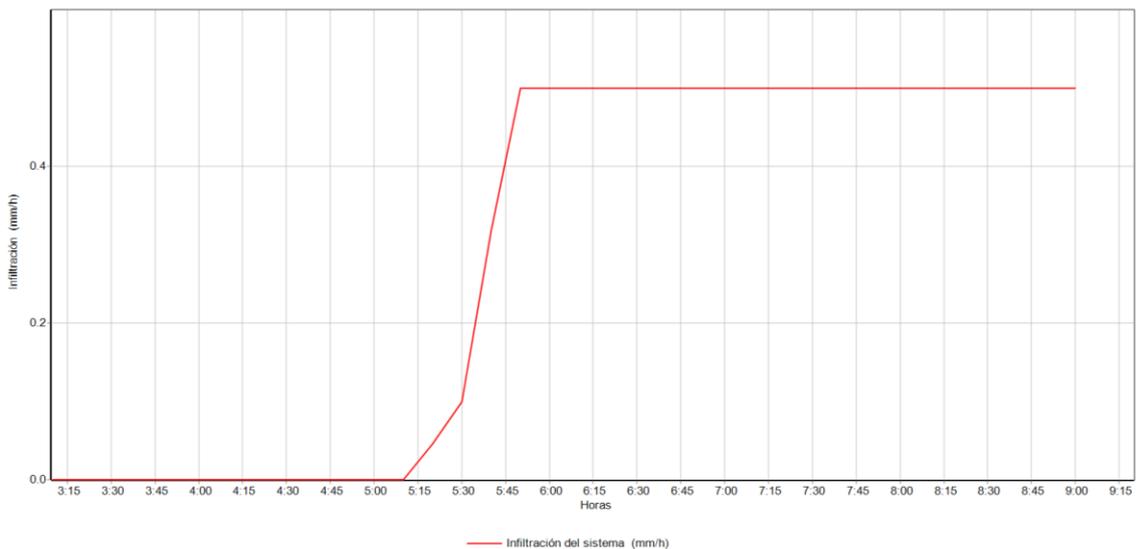


Figura 40.- Características de la escorrentía con la celdilla

En cuanto a la infiltración, se obtiene el resultado deseado. Al comenzar la lluvia, a las 2 h del comienzo del episodio, la infiltración crece hasta un pico de 0.5 mm/h, como se había prefijado en las características del SUDS. Además, ocurre lo contrario que en las anteriores simulaciones donde teníamos un pico de

infiltración, y a partir de ahí el sistema se colapsaba alcanzando su límite de infiltración y ésta se reducía a valores muy bajos. Con la celdilla la infiltración crece hasta su máximo y se mantiene constante, por lo que sigue filtrando durante todo el episodio.

6.- CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El programa EPASWMM es capaz de reproducir fielmente episodios de lluvia, tanto intensa como moderada.

La introducción de dos episodios de lluvia totalmente distintos en el programa permite reflejar en el análisis de su simulación, unos resultados completamente diferentes. Además, en un mismo episodio, al modificar las características de una subcuenca, introduciendo un pavimento permeable se puede corroborar esta afirmación, pues los resultados, aunque varíen mínimamente el programa proyecta esta pequeña diferencia pudiendo realizar comparaciones y análisis muy precisos.

- El pavimento permeable se ha revelado como una alternativa real al pavimento impermeable convencional.

La impermeabilización del suelo urbano debido al crecimiento de la población en las ciudades, unida a los efectos del cambio climático como son las lluvias torrenciales, hacen frecuentes las inundaciones en las áreas urbanas. Por ello es preciso dirigir las nuevas infraestructuras a recuperar la hidrología natural previa existente a las ciudades. Una alternativa efectiva es reemplazar pavimento impermeable por permeable. Su efectividad ha quedado reflejada en los resultados, pues su capacidad de infiltración es elevada, reduciendo la escorrentía en un gran porcentaje.

- El pavimento permeable convencional ha de estar adecuado al área de la subcuenca.

El episodio lluvia 2 ha sido simulado con pavimento impermeable y con la instalación en la subcuenca de un pavimento permeable convencional. Se ha podido comprobar que su instalación tiene efecto, aunque muy pequeño. Esto es debido a la diferencia de áreas, pues la extensión del área total del conjunto de las 15 subcuencas es muy grande en comparación a la extensión de la subcuenca 14.

Para conseguir una efectividad mayor, habría que permeabilizar mayor zona o hacer una selección de área total más pequeña.

- Los SUDS permiten reestablecer el ciclo del agua en la ciudad.

El ciclo natural del agua se caracteriza por que en él tiene un papel muy importante la infiltración del agua de lluvia en el suelo. La tierra permite infiltrar grandes cantidades de agua, pero en los entornos urbanos esta capacidad es menor. La implementación de los SUDS en las ciudades permite volver a recuperar esa infiltración por lo que ciclo del agua se reestablece.

- El pavimento permeable aminora la sobrecarga del sistema en caso de lluvia extrema.

La ralentización de la escorrentía que estas infraestructuras proporcionan y el almacenaje del agua que realizan, permite reducir la sobrecarga de la red de alcantarillado, dotándola de mayor capacidad, disminuyendo el riesgo de inundación y previniendo su deterioro prematuro.

- Los sistemas de drenaje sostenible se deben instalar en cadena.

La efectividad de los SUDS está ligada a su instalación en cadena. La implantación de uno aislado, como se ha visto en el trabajo, hace que los dispositivos cercanos como nodos y tuberías se desahoguen, por lo que

implementar uno en una zona y otro en otra lejana que no estén conectadas haría reducir la efectividad que pueden conseguir los mismos complementados. Además, deben de ser compatibles y complementarse entre sí, por ejemplo, si se instala un jardín de lluvias o una cubierta vegetada, el siguiente en instalar sería un depósito de almacenaje o un canal que dirija la escorrentía a el lugar deseado.

- En la actualidad existen modelos de pavimento permeable más eficaces y baratos.

Las nuevas tecnologías junto a las políticas del medio ambiente están dando lugar a desarrollar dispositivos sostenibles con materiales que no dañen el medio ambiente como las celdillas de polipropileno reciclado. Además, como se ha podido ver, la fabricación de una celdilla puede estar al alcance de cualquier usuario, de ahí que se haya podido modelizar una con otro tipo de material, PLA que es biodegradable, con una impresora 3D.

- Las celdillas de polipropileno pueden usarse eficazmente como pavimentos permeables.

Como se puede comprobar en la última simulación, la efectividad de estas celdillas de drenaje es evidente. Además, son capaces de drenar casi el 100% de la escorrentía, aparte de evitar la colmatación de la red, pues ningún nodo ni tubería presenta cualquier mínimo signo de saturación.

- Es posible equiparar un conjunto de celdillas de polipropileno a un modelo de pavimento permeable suministrado por EPASWMM.

Debido a la relativa novedad de este tipo de celdillas de polipropileno, no es posible trabajar con ellas en el programa EPASWMM, pero es posible establecer una equivalencia entre sus características y el un pavimento permeable convencional. Por ello, modificando las características del pavimento permeable, e introduciendo las de la celdilla, podemos conseguir simular e imitar las

características de drenaje de la celdilla en el programa y conseguir analizar las ventajas de esta.

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, la transformación de los espacios urbanos en lugares más sostenibles y resilientes es una tarea que todos los gobiernos están decididos a abordar y que no está exenta de dificultad. Somos conscientes de que no es posible acometer grandes obras solo con el propósito de instalar un sistema de drenaje sostenible.

Sin embargo, si es posible introducir este tipo de infraestructuras cuando se trata de reformas de estructuras que ya existen o cuando se remodela una plaza o cuando se proyecta un barrio nuevo.

Muchas veces, el desconocimiento de este tipo de soluciones hace que se vean como extravagantes o ineficaces a pesar de que en otros países llevan tiempo funcionando con éxito. Es fundamental, por tanto, desarrollar programas educativos para niños y adultos que les permita desarrollar actitudes positivas hacia este tipo de infraestructuras sostenibles. Por último, es necesario sensibilizar a nuestros gestores para que este tipo de sistemas se incluyan en los planes urbanísticos que se desarrollen a medio y largo plazo.

No hay que olvidar que cualquier actuación de este tipo requiere el acuerdo de toda la comunidad. Teniendo en cuenta que el agua es un bien común, la premio nobel de economía Elinor Ostrom apuntaba que toda gestión de un bien común debe ser realizada mediante el acuerdo colectivo y el consenso para que pueda tener éxito.

7.- FUTURAS INVESTIGACIONES

Este trabajo ha permitido conocer en profundidad como afectaría la inclusión de un pavimento permeable en un área muy concreta de la ciudad de Tudela. La realización de este trabajo ha planteado nuevos interrogantes que podrían ser explorado en el futuro.

El primero de ellos y más inmediato es conocer el efecto que tiene sobre la red si se dividen las subcuencas es áreas más pequeñas. Otro aspecto importante

es conocer en que medida afectan a la efectividad del pavimento permeable las variaciones de otros parámetros como son la altura de la berma, el grosor de la capa de suelo, de la capa de almacenamiento, comprobando si realmente hay una considerada diferencia al modificar dichos valores.

Por otro lado, existen diferentes tipos de celdillas de polipropileno con diferentes características que podrían modelizarse con EPASWMM. Y, por supuesto, se podría ampliar el estudio a otras zonas de la ciudad, analizando otros barrios y el comportamiento de la implantación e implementación de las técnicas.

7.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Peng, F. Lu y Z. a. Z. Z. Song, «Key technologies for an urban overland flow simulation system to support what-if analysis,» *Journal of water resource and protection*, vol. 10, nº 7, pp. 699-724, Julio 2018.
- [2] S. Suriya y B. Mudgal, «Impact of Urbanization on Flooding: The Thirusoolam Sub Watershed—A Case Study,» *Journal of Hydrology*, Vols. %1 de %2412-413, pp. 210-219, 2012.
- [3] Organización de Naciones Unidas (ONU), «Organización de Naciones Unidas,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>. [Último acceso: 4 Abril 2022].
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «Organización de Naciones Unidas,» 4 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/>. [Último acceso: 10 Abril 2022].
- [5] Agencia Estatal de Meteorología, «Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico,» Abril 2022. [En línea]. Available: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/result_graficos?opc4=0&opc1=31&opc6=0. [Último acceso: 15 Abril 2022].
- [6] Ministerio para la transición ecológica, «Güías para la adaptación al riesgo de inundación: Sistemas urbanos de drenaje sostenible,» Ministerio para la transición ecológica, Madrid, 2019.
- [7] ONU, «Objetivos de desarrollo sostenible,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>. [Último acceso: 11 Marzo 2022].

AuMjE1fDQ2NTc0NTQuMDEzfDYxNjQ0Ni4yMTV. [Último acceso: 27 Abril 2022].

- [20] Idena, «idena,» [En línea]. Available: <https://idena.navarra.es/navegar/>. [Último acceso: 28 Abril 2022].
- [21] Diario de Noticias, «Más de 40 litros por metro cuadrado en apenas una hora en Tudela,» *Diario de noticias*, 1 Septiembre 2021.
- [22] A. fundación, «fundacionaquae,» [En línea]. Available: https://www.fundacionaquae.org/wiki/causas-y-consecuencias-cambio-climatico/?gclid=CjwKCAiApfeQBhAUEiwA7K_UHw0LYSIBenWyM60tKVYtDKZb4OqkwK2kEdc1IHSHrNQQZQu_mWq7t1hoC7Q8QAvD_BwE#%C2%BFQue_es_el_cambio_climatico. [Último acceso: 02 Marzo 2022].
- [23] M. González del Tánago, «Inundaciones y cambio climático,» Madrid, 2008.
- [24] Idena, «idena,» [En línea]. Available: <https://idena.navarra.es/navegar/>. [Último acceso: 28 Abril 2022].