



Deliverable DC.2.3_1:

Monitoring report on run off rainwater (Volume/flow pattern (before and after) and Pollution bioretention

Action C.2.3

Grant Agreement n°. LIFE 16 IPC/ES/000001
Towards an integrated, coherent and inclusive implementation of
Climate Change Adaptation policy in a region: Navarre

[LIFE-IP NAdapta-CC]

LIFE 2016 INTEGRATED PROJECTS CLIMATE ACTIONS







Project start date: 2017-10-02

Project end date: 2025-12-31

Coordinator:

PU	Public	<input checked="" type="checkbox"/>
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	<input type="checkbox"/>
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including Commission Services)	<input type="checkbox"/>
CC	Confidential, only for members of the consortium (including Commission Services)	<input type="checkbox"/>

Autoría:

-  Maria Jose Castuera, NILSA
-  Jairo Gómez, NILSA
-  José Chérrez, NILSA
-  Julen Fernandez, NILSA
-  Gregorio Berrozpe, NILSA
-  Itsaso Ilzarbe, NILSA

Referencia recomendada a efectos bibliográficos:

Castuera, M.J., Gómez, J., Chérrez J., Fernandez, J., Berrozpe, G., Ilzarbe, I., [2021]. *Monitoring report on run off rainwater [Volume/flow pattern (before and after) and Pollution bioretention. Informe de seguimiento de agua de escorrentía tratada en el SUD: Hidrogramas de entrada y salida del sistema y polutogramas. Acción C.2.3 del Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC (LIFE 16 IPC/ES/000001) de la Unión Europea. Pamplona. Navarra de Infraestructuras Locales, S.A. (NILSA) y Servicio de Economía Circular y Cambio Climático del Gobierno de Navarra*

Este documento corresponde al entregable DC.2.3_1 previsto en el Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC.

El Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC LIFE 16 IPC/ES/000001 está ejecutado con la contribución financiera del programa LIFE de la Unión Europea

El contenido de este informe no refleja la opinión oficial de la Unión Europea. La responsabilidad de la información y los puntos de vista expresados en esta publicación recaen completamente en su autoría.

www.lifenadapta.eu

Versión 2. 31 de Diciembre de 2021

Table of contents

0. SUMMARY.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1 Toma de muestras y analíticas.....	5
2.1.1 Campaña de muestreo 2018.....	7
2.1.2 Campaña de muestreo 2019.....	9
2.2 Conclusiones.....	15
3. SUDS.....	16
3.1 Diseño de los SUDS.....	16
3.2 Construcción.....	19
3.3 Jardinería.....	20
3.4 Sensorización.....	23
4. RESULTADOS: TOMA DE MUESTRAS Y ANALÍTICAS.....	24
4.1 Eventos de lluvia y muestras de escorrentía.....	24
4.1.1 Episodios:.....	27
4.2 Conclusiones.....	30
4.3 Muestras de suelos.....	30
4.3.1 Muestreo inicial 2020.....	31
4.3.2 Muestreo 2021.....	33
4.4 Conclusiones.....	37
5. MODELIZADO.....	37
Sin SUDS.....	38
Con SUDS.....	41
6. GUIA DE DISEÑO.....	44
7. INFORME JURÍDICO.....	47
8. CONCLUSIONES.....	50
9. REFERENCIAS.....	51



Tables

Tabla 1 Fuentes antrópicas de contaminantes en escorrentías de pavimentos urbanos [Sansalone et al, 1997].....	3
Tabla 2 Resultados de metales pesados de la muestra compuesta [SST=112 mg/l].....	11
Tabla 3 Volumen mínimo almacenable en cada SUDS.....	18
Tabla 4 Resultados análisis evento con salida de A ₁	27
Tabla 5 Resultados de metales pesados e hidrocarburos en las muestras de suelo [2020]...	33
Tabla 6 Rangos normales de Cd, Cu, Ni, Pb, Zn [mg/kg] en suelos ph=6-7, según la Directiva Europea 86/278/EEC, y concentración máxima aceptable de hidrocarburos en mg/kg.....	33
Tabla 7 Resultados de metales pesados e hidrocarburos en las muestras de suelo [2021]...	35
Tabla 8 Resta de las concentraciones obtenidas en 2020 y 2021.....	36



Figures

Figura 1 y Figura 2. Impedimento instalado para permitir la toma de muestras en el colector de pluviales.....	6
Figura 3 y Figura 4. Caudalímetro de canal abierto y tomamuestras portátil automático con batería [ISCO 6712].....	6
Figura 5 Cono para proteger el tomamuestras, situado próximo al pozo de registro de aguas pluviales definido como punto de control.	6
Figura 6 Hidrogramas de episodios de lluvia 09/04/2018 -10/04/2018.....	8
Figura 7 Hidrogramas de episodios de lluvia 10/04/2018 -11/04/2018.....	8
Figura 8 Hidrogramas de diferentes episodios de lluvia 11/04/2018 -12/04/2018.	9
Figura 9 Sólidos en suspensión, precipitación y volumen acumulado durante el primer episodio de junio 2019.	11
Figura 10 Curva M/V.....	12
Figura 11 Representación de parámetros físico químicos de las muestras recogidas en el episodio de junio de 2019.....	13
Figura 12 Resultados de concentración de metales total y en disolución.	13
Figura 13 Representación de concentración de metales frente a sólidos en suspensión para establecer posibles correlaciones.....	14
Figura 14 Áreas drenadas a los SUDS.....	17
Figura 15 Construcción de los SUDS.....	19
Figura 16 SUDS finalizados sin vegetación.....	19
Figura 17 Imagen del jardín B.....	20
Figura 18 Imagen del jardín A ₂	21
Figura 19 Imagen del jardín A ₂	21
Figura 20 Imagen del jardín B en un evento de lluvia.....	22
Figura 21 Vista aérea de los SUDS.....	22
Figura 22 Pluviómetro, radar y medidor de presión analógico.	23
Figura 23 Puntos de muestreos de entrada (círculos verdes) y salida (círculos azules).....	25
Figura 24 Soleras construidas para instalar los tomamuestras.....	25
Figura 25 Compostadores ubicados en las soleras para ocultar los tomamuestras.	26
Figura 26 Tramex instalados en los aliviaderos.....	26
Figura 27 Grafica del agua de salida del A ₁ al A ₂ [tren de tratamiento] 1 de junio.....	27
Figura 28 Grafica del agua de salida del A ₁ al A ₂ [tren de tratamiento] 1 de septiembre.....	28
Figura 29 Grafica de la altura de agua en el B, 1 de septiembre.....	29
Figura 30 Tomamuestras en el punto de entrada del A ₁	29
Figura 31 Muestras M3, M4 y M5.....	30
Figura 32 Toma de muestras de suelo con una barrena.....	31
Figura 33 Esquema de la ubicación y codificación de los puntos de muestreo en el SUDS B.	32
Figura 34 Costra de sal en el suelo del SUDS B.....	34
Figura 35 Adquisición de datos de caudal mediante un caudalímetro portátil en el aparcamiento de la UPNA de Tudela.....	38



Figura 36 Plano del sistema de alcantarillado de la UPNA de Tudela antes de la instalación de los SUDS.....	39
Figura 37 Captura del mapa del modelo antes de la instalación de los SUDS.....	40
Figura 38 Hidrograma de calibración del modelo sin SUDS en SWMM.....	41
Figura 39 Modelado de alivios en la zona B.....	43
Figura 40 Distribución de las series pluviométricas por regiones.....	46









0. SUMMARY

The development of the Sanitation and Waste Water Purification Plan in Navarra, which began in 1989 with the creation of the public company Nilsa, has allowed to resolve the purification of municipal wastewater up to populations of 250 inhabitants. Continuing with this work, our goal is to reach populations of 100 inhabitants with biological purification in the coming years. Once this level of purification is reached, it is necessary to analyse what the following strategic lines of action should be and for this it will be necessary to diagnose where the main impacts on the river are. This is what the European Commission has done in the revision of the Urban Waste-Water Treatment Directive. The conclusions of this diagnosis are clear, in addition to advancing in the purification of populations of less than 2,000 inhabitants, the pollution produced by reliefs, overflows and urban areas runoff must be minimized. All this taking into account, solutions based on nature.

In this context, to reduce pressures on water resources and their associated ecosystems and uses are needed adaptation actions. The implementation of sustainable drainage systems in urban areas is a way to prevent impacts that may be aggravated by climate change context. Within the possible adaptation of the urban sewerage networks measures, this report details the actions planned and carried out within C2.3: Adaptation of the urban sewerage networks through the implementation of sustainable drainage systems in urban areas.

The expected results of this action are the following:

-  Implementation of a Sustainable Urban Drainage System [SUDS] at the Universidad Pública de Navarra [UPNA] campus in Tudela.
-  Show Authorities and technical personnel from public and private institutions the advantages of using SUDS/BMPs to manage quality and quantity of urban runoff.
-  Site visits, workshops and seminars are amongst the actions planned.
-  Increase general public awareness about Water Sensitive Urban Design [WSUD] and their influence in the water cycle.
-  Increase awareness about the SUDS philosophy, emphasising on design concepts rather products, paying special attention to prevention and runoff control at source.
-  Increase public awareness about the need to manage water sustainably and the implications of the EU Directive 2000/60/EC, the Water Framework Directive .

- Increase awareness among stakeholders about the risks of soil erosion and modifications to water bodies and how SUDS can contribute to restore, reduce and / or improve environmental problems originated by human activity.
- Show public authority and public institution designers the viability and simplicity to construct and manage SUDS.

The total budget foreseen for this action is 90.700 €.

As part of activity 2 of C2.3 action, a pilot study was performed in which storm water from the parking of UPNA at Tudela was collected and the conventional systems were substituted by SUDS. Two of the gardens are connected and conformed a treatment train, the third one is a bioretention garden.

Prior to the construction of the SUDS, in the same spot sampling campaigns were carried out to monitor and characterized rainwater runoff [volume/flow pattern and contamination bioretention]. This result represents the "before" situation and it will be possible to compare it with the "after" to obtain qualitative and quantitative results of the volume and contamination retained. Runoff flows and runoff samples were obtained. Among the analyses physical-chemical analyses were performed [such as COD, TSS, TN] and heavy metals. More detailed results are shown in Annex 2.

Once the prototype was built, different monitoring systems were installed. A rain gauge was installed on the roof of the university and radar-type water level gauges, ultrasound or analog gauges to know the water level inside each SUDS. Runoff and soil samples were collected from the SUDS to quantify the pollutants retention.

In addition, a modeling was carried out with the SWMM software. The models were made with the before and after construction of the SUDS. In 2021, the Government of Navarra awarded us a project in which we participated together with UPNA, where we are working with SUDS models in SWMM and IBER.

Finally, as part of activity 1 for the development of regulation for the implantation of sustainable draining systems in Navarra for the minimization of the effects of the elevated rainfall in the municipal networks a study was carried out with an expert lawyer in urban planning to see how it could be implemented in the current regulations [Annex 3]. Furthermore, "*Basic recommendations for the design of sustainable urban drainage systems [SUDS] in Navarra*" guide is going to be publish to help local authorities to implement SUDS.



1. INTRODUCCIÓN

El Desarrollo del Plan de Saneamiento y Depuración en Navarra, que arrancó en el año 1989 con la creación de la empresa pública Nilsa, ha hecho que Navarra tenga resuelta la depuración de las aguas residuales municipales en todos los núcleos de más de 250 habitantes. Continuando con esta labor, nuestro objetivo es llegar en los próximos años a poblaciones de 100 habitantes con depuración biológica.

Alcanzado este nivel de depuración, y en un proceso de continua revisión, toca analizar cuáles deberían ser las siguientes líneas estratégicas de actuación y para ello habrá que diagnosticar dónde pueden generarse los principales impactos en los ríos.

Esto es lo que ha hecho la Comisión Europea en la revisión de la Directiva Europea de Depuración. Las conclusiones de este diagnóstico son claras, además de avanzar en la depuración de poblaciones de menos de 2.000 habitantes, se debe minimizar la contaminación producida por alivios y desbordamientos y por las aguas de escorrentía en zonas urbanas. Todo ello teniendo en cuenta, además, Soluciones Basadas en la Naturaleza [SBN] o Nature-based Solutions [NBS].

El crecimiento y expansión de las ciudades ha dado como resultado una progresiva impermeabilización del suelo que genera problemas tales como el incremento de volúmenes y de caudales de escorrentía. Esto puede derivar en la generación de riadas e inundaciones en zonas urbanas, alivios de agua residual de los colectores a los ríos y en consecuencia, un mayor coste, tanto económico como medioambiental. Además, en cuanto a contaminación, pueden arrastrarse los sólidos que puedan encontrarse en la superficie de las calles como basura y residuos animales, o contaminantes como metales pesados e hidrocarburos que se quedan depositados. Los metales pesados pueden provenir de los frenos, ruedas, carrocería, carburantes de los coches, revestimiento de edificios y los hidrocarburos de los combustibles [Tabla 1]. En el caso de los sistemas unitarios estos contaminantes llegan a la depuradora y se decantan en los fangos, sin embargo, en las redes separativas estos contaminantes en la mayoría de casos acaban en el río. En concentraciones altas son tóxicos para muchos organismos.

Tabla 1 Fuentes antrópicas de contaminantes en escorrentías de pavimentos urbanos [Sansalone et al, 1997].

	frenos	ruedas	carrocería	carburantes y aceites	pavimentos		sales deshielo	basura
					hormigón	asfálticos		
Cadmio								
Cromo								
Cobre								
Hierro								
Plomo								
Níquel								
Vanadio								
Zinc								
Cloruros								
Sólidos orgánicos								
Sólidos inorgánicos								
PAHs								
Fenoles								

Fuente principal
 Fuente secundaria



Existe una aceptación, cada vez mayor, sobre un enfoque más sostenible para la gestión de la escorrentía. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) imitan los procesos de drenaje natural para reducir el efecto sobre la calidad y cantidad de la escorrentía y poder tanto aumentar la biodiversidad, y como proporcionar espacios más amigables y atractivos. Estos son los cuatro pilares sobre los que se fundamenta la gestión sostenible de las aguas pluviales. Además de los beneficios obtenidos en la gestión del ciclo del agua, con la implantación de SUDS formados por superficies vegetadas y zonas verdes en el espacio público, se obtienen otros beneficios como son la reducción del efecto “isla de calor” por medio de evapotranspiración, lo que implica ahorro energético, reducción de las emisiones de CO₂, y mejora de la calidad del aire, en definitiva, una mejora de la calidad de vida en las ciudades.

Navarra de Infraestructuras Locales S.A. (NILSA), es una empresa pública adscrita al Gobierno de Navarra (Departamento de Cohesión Territorial) y perteneciente a la Corporación Pública Empresarial de Navarra (CPEN). Surgió en 1989 como instrumento de gestión pública para coordinar el Plan Director elaborado a partir de los establecido en la Ley Foral de Saneamiento de Aguas Residuales (1988). La ley Foral establece el canon de saneamiento como recurso de la Hacienda pública, que debe destinarse a la financiación de los fines previstos en la ley y que gestiona NILSA. Por otro lado, desde 2007, NILSA asume la gerencia del Consorcio de residuos de Navarra, la entidad que agrupa al Gobierno de Navarra y a todas las entidades locales que gestionan residuos con excepción de la Comarca de Pamplona.

Debido a los problemas derivados de las redes unitarias mayoritarias en Navarra, Nilsa como empresa pública que gestiona y opera gran parte de las EDARs de Navarra busca impulsar y estudiar el uso de SUDS como alternativa de drenaje. En este contexto, se ha construido un prototipo de SUDS que se enmarca en el proyecto LIFE-IP NAdapta-CC. El presente prototipo está dentro del área estratégica de actuación Agua, en la acción de “Adaptación de las redes de alcantarillado urbanos a través de la implementación de SUDS”. Los trabajos que corresponden a NILSA en el área estratégica de Agua del LIFE-IP NAdapta-CC, se centran, además de impulsar la construcción de drenajes sostenibles, en la implementación de sistemas de alerta temprana en depuradoras y de una red de sensores en puntos de alivio de los sistemas de saneamiento para evitar impactos en los ríos.

El prototipo está ubicado en el aparcamiento del Campus que la Universidad Pública de Navarra (UPNA) posee en Tudela. Al tratarse de una zona impermeabilizada muy amplia, genera una gran cantidad de escorrentía y es un lugar idóneo para la implementación de SUDS. Las obras fueron realizadas en 2019 con un presupuesto de 70.000 euros.

Paralelamente al estudio experimental, se ha elaborado un documento denominado Recomendaciones básicas de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en Navarra, que facilitará a los diferentes ayuntamientos y entidades locales el diseño y la implantación de SUDS en sus ámbitos de gestión.

2. ANTECEDENTES

Previo a la construcción del prototipo de los SUDS se realizaron tres campañas de toma de muestras en la UPNA: en abril de 2018 y en junio y septiembre de 2019. Los objetivos fueron los siguientes:

- Estudiar beneficios de los sistemas de drenaje sostenible tanto en términos de volúmenes de escorrentía gestionados in situ como respecto a la reducción en la presencia de contaminantes de ésta.
- Establecer una relación entre parámetros físico químicos de fácil determinación [sólidos en suspensión] y la concentración de metales pesados en las aguas de escorrentía.
- Establecer una relación entre las precipitaciones y los volúmenes de agua de escorrentía generados, así como con los aliviados y su calidad.

Antes de estas campañas de monitorización, se había realizado una en el parking del Carrefour de Tudela en 2016: un análisis cualitativo de contaminantes en muestras compuestas para su descripción visual y la obtención de datos relativos a los volúmenes de lluvia muestreados. Se detectó una entrada de aguas fecales por lo que se descartó continuar en esta localización debido a que los SUDS se utilizan para la gestión de aguas pluviales únicamente.

2.1 Toma de muestras y analíticas

A lo largo del trabajo se han ido haciendo diferentes campañas en función del objetivo planteado y de los aprendizajes realizados. En todas tanto la toma de muestras como el análisis de parámetros se ha realizado con laboratorios externos. Dicha asistencia externa incluye:

- La instalación en el colector de pluviales de PVC de un impedimento ([Figura 1](#) y [Figura 2](#)) a modo de “presa” de retención para elevar el nivel del agua de escorrentía en el colector de pluviales que permita realizar la toma de muestras.
- La instalación de un caudalímetro [módulo de medición de caudal en canal abierto de la gama 700 compatible con el tomamuestras] ([Figura 3](#) y [Figura 4](#)) junto con el tubo de succión/alcachofa del tomamuestras automático con batería autónoma (ISCO 6712), cuyo cuerpo quedó protegido en el exterior, cerca del pozo, dentro de un cono de obra. ([Figura 5](#))
- La visita de personal técnico 2-3 días a la semana al punto de control, así como en momentos de previsión de lluvia. En cada visita se revisa el tomamuestras y el caudalímetro. En caso de que haya llovido, se recogen las muestras y verifican y ponen a punto los equipos nuevamente.

El tomamuestras se programó para que se habilite cuando se acumule el volumen correspondiente a un nivel mínimo [3-5 cm] de agua de lluvia en el colector. Una vez habilitado tomó muestras puntuales en cada botella. El intervalo de toma de muestra se fija en 5 minutos.



Figura 1 y Figura 2. Impedimento instalado para permitir la toma de muestras en el colector de pluviales



Figura 3 y Figura 4. Caudalímetro de canal abierto y tomamuestras portátil automático con batería [ISCO 6712]



Figura 5 Cono para proteger el tomamuestras, situado próximo al pozo de registro de aguas pluviales definido como punto de control.

En cuanto a las analíticas se han determinado pH, conductividad, demanda química de oxígeno, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, sólidos en suspensión, sólidos en suspensión volátiles, mercurio total, plomo total, cadmio total, cromo total, así como concentración de estos metales en disolución.

2.1.1 Campaña de muestreo 2018

Respecto a la caracterización de la escorrentía en abril de 2018 se realizaron unas campañas de toma de muestras de la escorrentía producida en el aparcamiento del campus de la UPNA en Tudela, futura localización del prototipo de drenaje sostenible. Se analizaron además de los parámetros habituales de agua residual (pH, conductividad, demanda química de oxígeno, Nitrógeno total y amoniacal...), cuatro metales pesados (mercurio, plomo, cadmio y cromo). Las muestras fueron totalizadas reflejando episodios de lluvia completos. Los resultados se adjuntan como anexo a este informe. Ver Anexo 2- Análisis muestras de escorrentía. Sección: Resumen de resultados analíticos obtenidos en la campaña de 2018.

Las concentraciones de mercurio, plomo, cadmio y cromo estaban por debajo del límite de cuantificación en todas las muestras, debido al método analítico utilizado. Destacó el valor de 785 mg O₂/litro de demanda química de oxígeno en una de las muestras [101.376], que supuso un volumen acumulado de 336,31m³. En general, se determina que el valor de nitrógeno amoniacal en todas las muestras queda por debajo del límite de cuantificación por ser aguas pluviales [sin contenido en aguas residuales domésticas]

Por otro lado, tal y como se observa en las Figuras 6, 7 y 8, los hidrogramas [Q vs. t] muestran una gran heterogeneidad de las lluvias.

Una vez analizados los resultados, se planteó tomar y analizar muestras puntuales para caracterizar el *first flush* [reducción de la contaminación de las aguas de escorrentía] así como modificar los parámetros a analizar, incluyendo sólidos suspendidos totales [SST], sólidos suspendidos volátiles [SSV], Demanda Química de Oxígeno [DQO] filtrada y Demanda Biológica de Oxígeno a 5 días [DBO5]. En el caso de los metales pesados se determina que el método utilizado no tiene la sensibilidad necesaria y se establece con otro laboratorio que, tras una digestión ácida de las muestras totalizadas, estas se analizarán por espectroscopia de plasma de acoplamiento inductivo [ICP/AES], [ICP/014-a, rango mg/l]. En el caso de que límite de cuantificación no fuese suficiente estas muestras se decantaron y el sobrenadante fue analizado por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente [ICP/MS], [ICP-MS/002-a, rango µg/L].

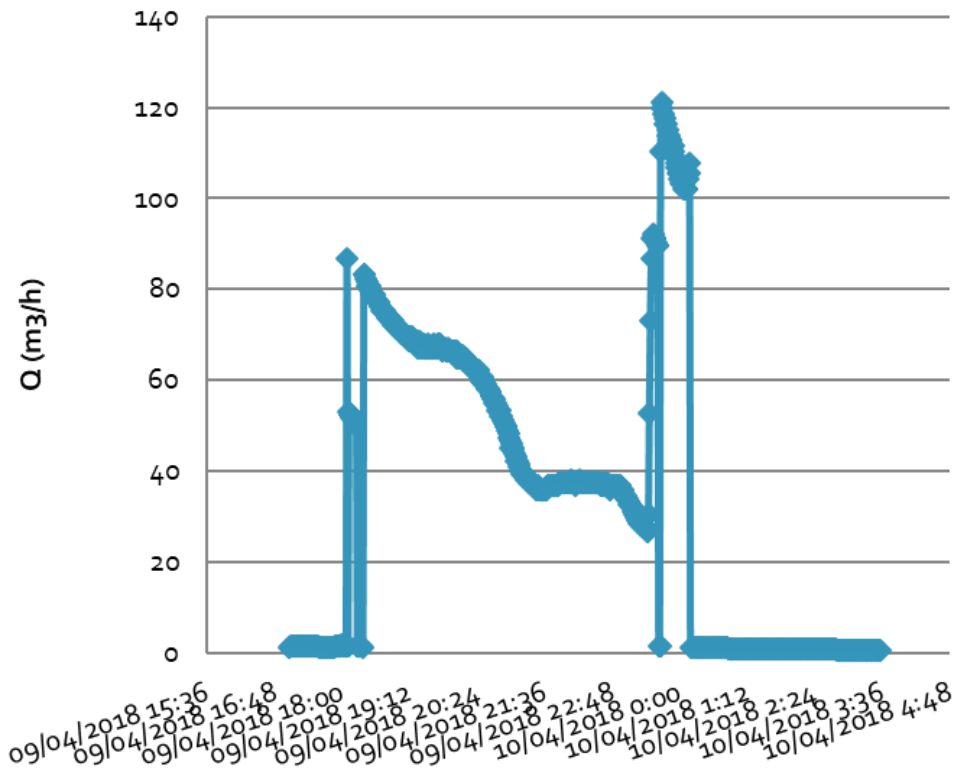


Figura 6 Hidrogramas de episodios de lluvia 09/04/2018 -10/04/2018.

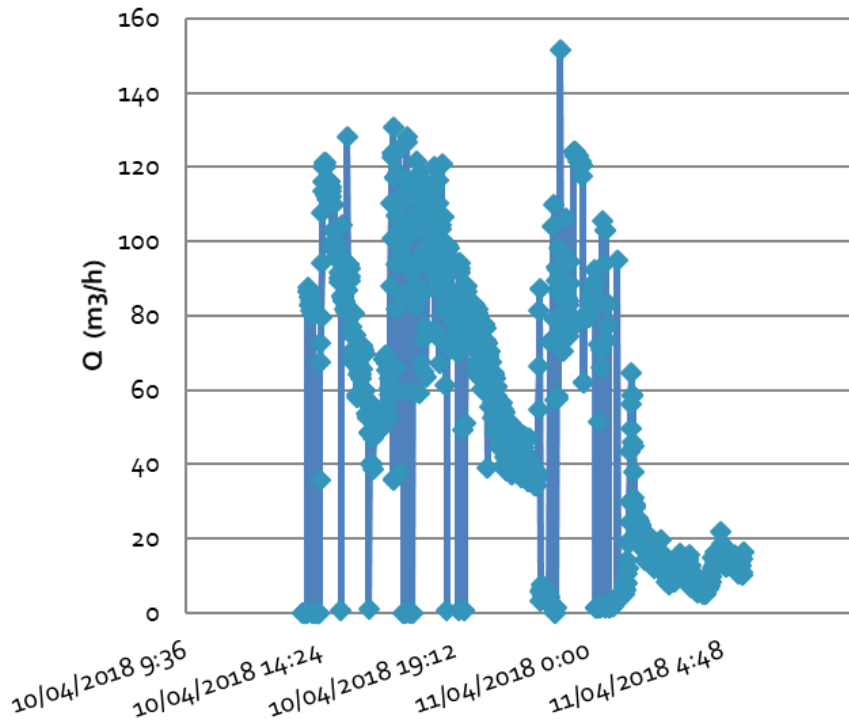


Figura 7 Hidrogramas de episodios de lluvia 10/04/2018 -11/04/2018.

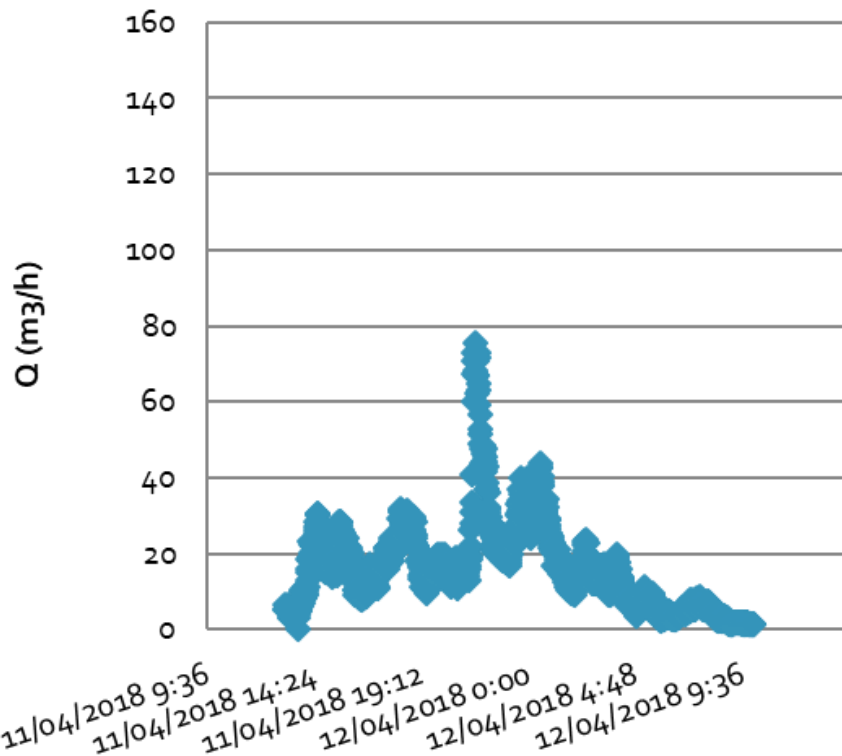


Figura 8 Hidrogramas de diferentes episodios de lluvia 11/04/2018 -12/04/2018.

2.1.2 Campaña de muestreo 2019

En 2019 se llevaron a cabo dos campañas en junio y septiembre. Además, se estableció un nuevo método y protocolo para la toma de muestras: con frecuencia cincominutal a partir del momento en el que se detecta una altura de agua de escorrentía 3cm en el punto de control. De esta forma, se pudieron graficar los polutogramas [variación del flujo de un cierto contaminante a lo largo del tiempo] e hidrogramas [variación en el tiempo de alguna información hidrológica]. Para los metales pesados, la muestra totalizada se analizó mediante ICP/AES [ICP/014-a]; y aquellos resultados inferiores al límite de cuantificación, se analizaron por ICP/MS [ICP-MS/002-a]. Con este método se pudieron cuantificar los metales pesados analizados. Esta campaña permitió verificar la existencia del *first flush*.

Durante 2019 se comprobaron los datos ofrecidos por el pluviómetro instalado en la UPNA en 2018. Al finalizar el verano se decidió cambiar dicho equipo. Por lo tanto, los datos de precipitación para esta campaña fueron los de las estaciones del Gobierno de Navarra situados en Valdetellas [datos cada 30min, más cercana] y Montes de Cierzo [datos cada 10min].

Se realizó una revisión bibliográfica para mejorar la toma de muestras y análisis.

Uno de los artículos consultados: *Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía*, Carlos Alfonso Zafra Mejía, Javier Temprano González y Juan Ignacio Tejero Monzón] revela que “*la concentración de los metales pesados en las muestras del sedimento es inversamente proporcional al diámetro de la partícula y que los elementos metálicos tienen preferencia por la fracción más fina del sedimento. Los resultados indican que cerca del 50% de la carga total de los metales pesados se encuentra asociada a fracciones de tamaño mayores de 125 µm [arenas finas].*”

En otro de los artículos consultados *Characterization of wash.off from urban impervious surfaces and SUDS design criteria for source control under semi-arid conditions*, Ignacio Andrés-Doménech, Carmen Hernández-Crespo, Miguel Martina, Valerio C., Andrés Valeri, se detalla la toma de muestras con intervalos iniciales de 3 minutos crecientes durante el episodio de lluvia y se citan los parámetros analizados.

Además, se consultó el borrador de las Normas Técnicas en el que se establecen diferentes niveles de estudios de los flujos de contaminación y en el que se presentan diferentes tablas con información sobre fuentes no puntuales y contaminantes asociados a ellas.

Por otro lado, la presentación de Ignacio Suárez López en CONAMA 2014 sobre *La contaminación de las escorrentías de autopistas como presión significativa sobre las masas de agua* establece fuentes de contaminación y orden de magnitud de algunos metales y contaminantes analizados.

Con todo ello, se propuso mejorar la técnica analítica de metales pesados de ICP óptico (ppm) a ICP masas (ppb), establecer los metales pesados a analizar (Pb, Zn y Cu, por ser los comunes analizados en los dos primeros artículos) y parámetros como sólidos en suspensión totales, sólidos en suspensión volátiles, DQO, DBO5.

Se recogieron muestras en junio y septiembre. Las muestras recogidas fueron en su mayoría puntuales con intervalos de 5 minutos (salvo la primera de junio, por error) una vez activado el tomamuestras, tal y como se ha explicado previamente. En las muestras tomadas en junio se determinaron metales pesados en aquellas muestras que contienen una mayor concentración de sólidos en suspensión, en septiembre en todas. La concentración en la muestra total se determinó mediante ICP óptico (mg/l) y, en el caso de que el resultado fuese inferior al límite de cuantificación, se decantó la muestra y se analizó el sobrenadante mediante ICP masas (µg/l). En todas las muestras se analizaron SST y SSV, el resto de parámetros se analizaron en función de si había suficiente volumen de muestra (metales pesados, DQO, DQO filtrada, DBO5, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal).

En la campaña de junio se detectaron dos episodios de lluvia. En el primer episodio se obtuvo una analítica completa de la muestra compuesta, la de mayor concentración de SST y SSV. En el segundo episodio se recogieron muestras puntuales y tras determinar SST y SSV se descartó la analítica de metales pesados por el bajo contenido en SST. Los resultados se adjuntan como

anexo a este informe. Ver Anexo 2- Análisis muestras de escorrentía. Sección: Resumen de resultados analíticos obtenidos en la campaña de 2019.

La Tabla 2 muestra la concentración de metales en la muestra compuesta del primer episodio. Tal y como se muestra en la tabla, el zinc es el metal que se presenta en mayor concentración y es determinado por ICP-AES, mientras que plomo y cobre son detectados por ICP-MS. En todos los casos en los que se puede cuantificar, hay mayor concentración en la parte disuelta.

Tabla 2 Resultados de metales pesados de la muestra compuesta [SST=112 mg/l].

Informe 83781/19M1/2019 Contenido en metales pesados (µg/l)	Lluvia del 05/06/2019 Inicio 09:57 Sólidos en suspensión 112 mg/l				
	TOTALES		DILSUELTOS	DECANTADOS	% RETENIDO SS
	ICP AES	ICP MS	ICP MS	Calculado	Calculado
PLOMO		2,6		2,6	100,00%
ZINC	390		278	112	28,72%
CROMO					
COBRE		17	9,62	7,38	43,41%

Por otro lado, la [Figura 9](#) muestra el polutograma, el pluviograma y el hidrograma del episodio donde se puede ver el *first flush*.

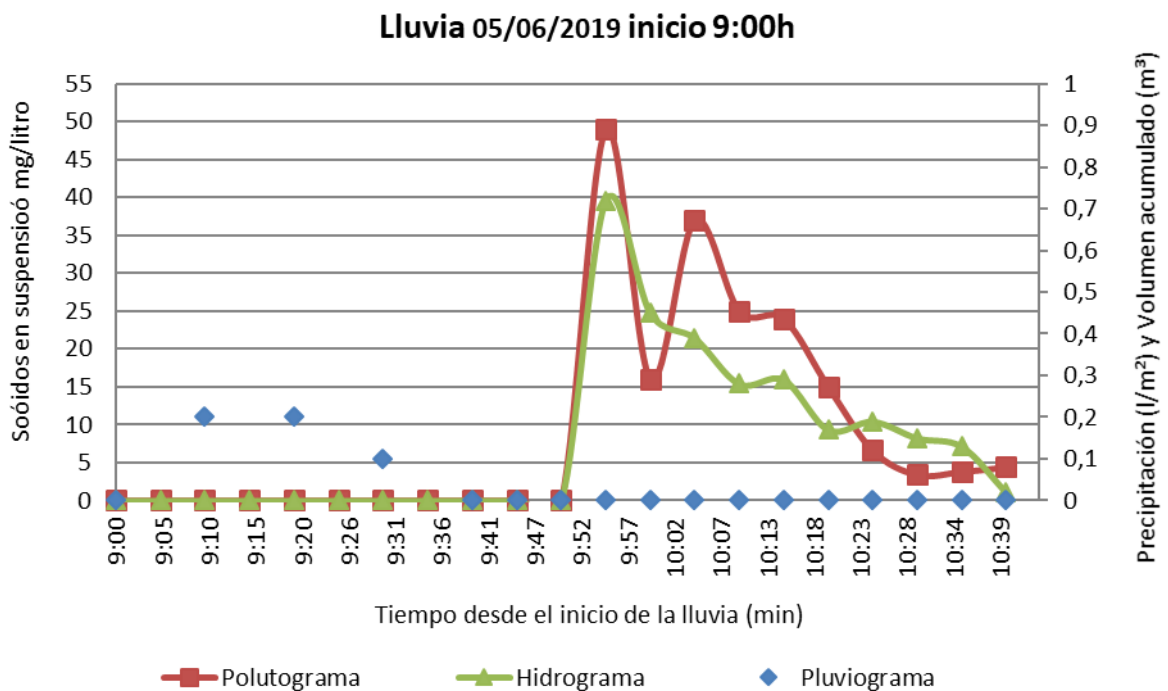


Figura 9 Sólidos en suspensión, precipitación y volumen acumulado durante el primer episodio de junio 2019.

Para comprobar si ha habido *first flush* además de utilizar los polutogramas se puede ver con curvas de distribución de la masa contaminante vs volumen o curvas M (V). Esta representación proporciona la variación de la masa contaminante acumulada dividida por la masa contaminante total en relación con el volumen acumulado dividido por el volumen total. Si la concentración permanece constante durante la tormenta, la masa contaminante es proporcional al volumen y la curva M (V) se fusiona con la línea 1: 1. Cuando la curva M (V) está por encima de la línea 1: 1, indica que ha habido un *first flush* y la extensión del fenómeno aumenta con la pendiente de la curva para valores pequeños de volumen. En la [Figura 10](#) se muestra un *first flush* mediante la curva M/V.

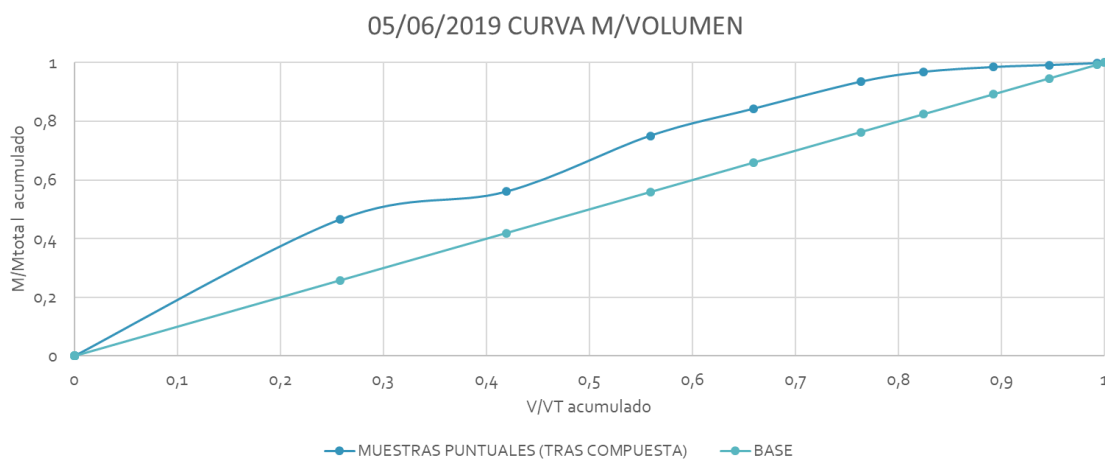


Figura 10 Curva M/V

En el segundo episodio de junio se midió SST, SSV en todas las muestras puntuales recogidas y además se determinan metales pesados y DQO en 4 de esas muestras. La Figura 11 muestra los resultados de los parámetros físico químicos determinados en ese mismo episodio.

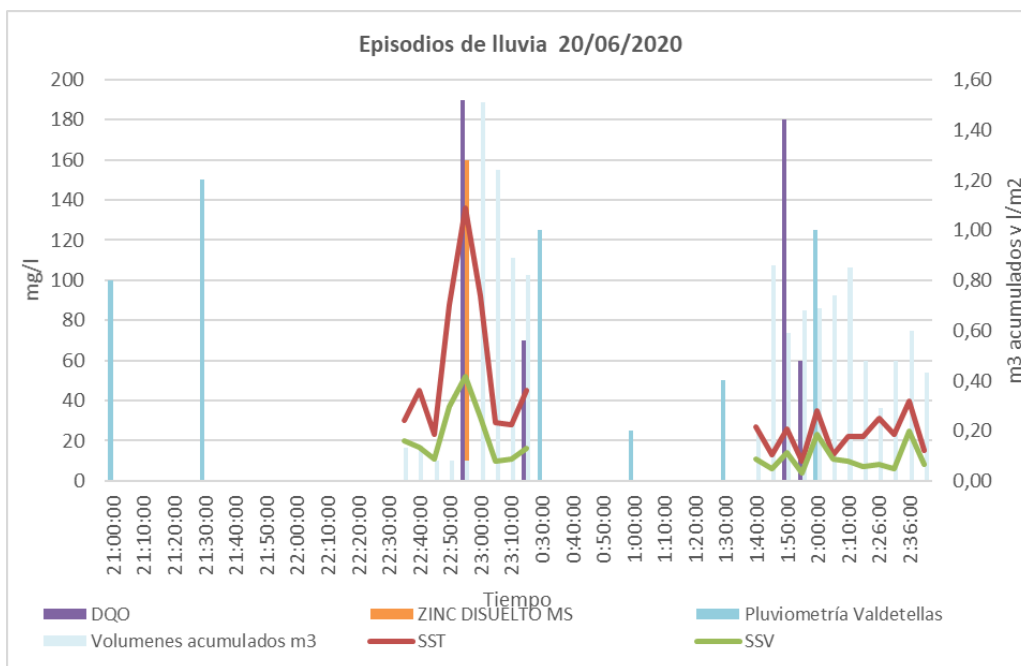


Figura 11 Representación de parámetros físico químicos de las muestras recogidas en el episodio de junio de 2019.

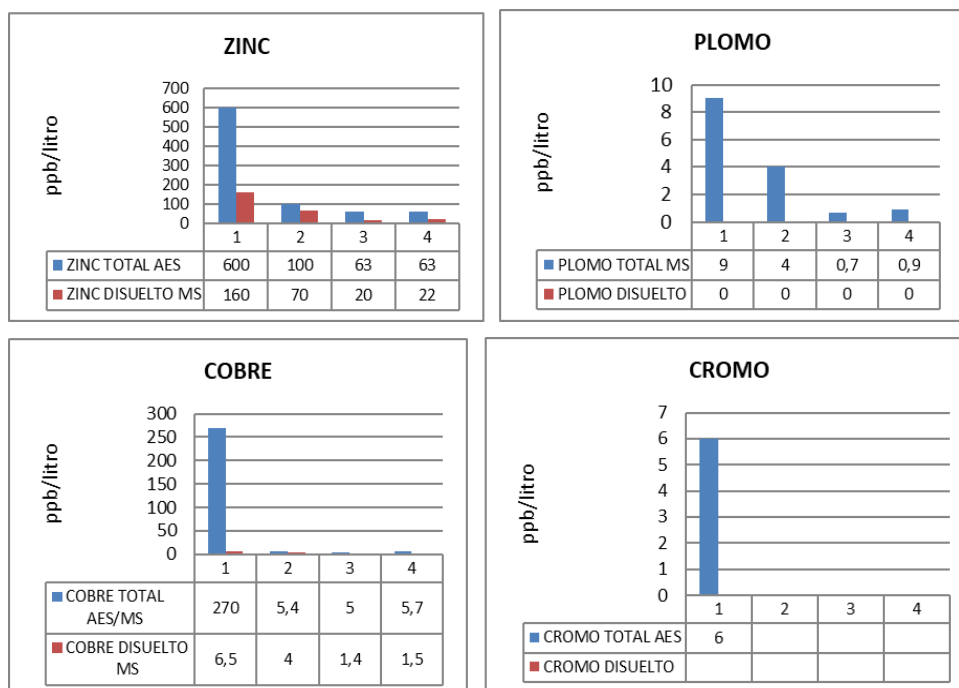


Figura 12 Resultados de concentración de metales total y en disolución.

La Figura 12 muestra la evolución de la concentración de metales en las diferentes muestras puntuales recogidas.

Con todo ello se puede determinar que hay una relación entre la cantidad de sólidos presentes en la muestra y la concentración de metales. Para corroborar esta afirmación, en la [Figura 13](#) se representa la concentración del metal frente a los sólidos en suspensión, obteniéndose unas elevadas correlaciones para plomo, zinc, cobre y cromo.

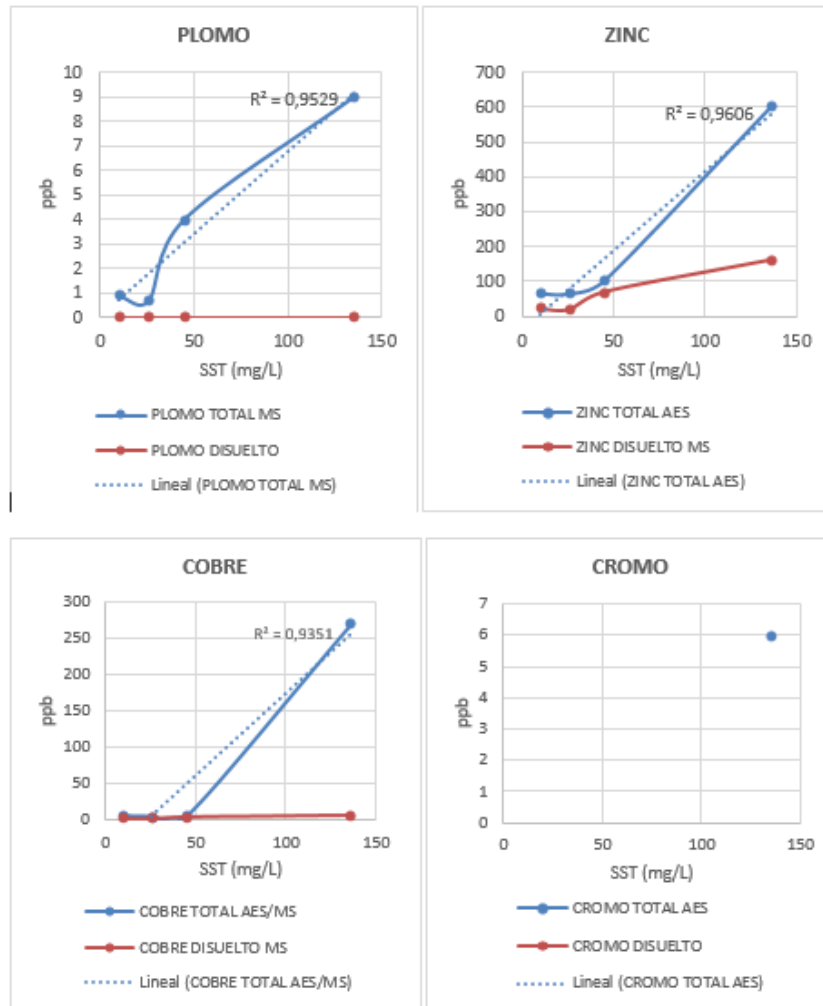


Figura 13 Representación de concentración de metales frente a sólidos en suspensión para establecer posibles correlaciones

La segunda campaña de 2019 tuvo lugar en septiembre [15/09/2020], y también se registraron dos episodios de lluvia, con 9 horas de diferencia. Cabe destacar que la primera muestra presentó un contenido de SST de 1320 mg/l pero el volumen muestreado fue tan reducido que no permitió el análisis de otros parámetros de contaminación y que el segundo episodio de lluvias desencadenó un repunte del polutograma pese a haber descendido los valores de contaminantes al final del primer episodio. Los resultados se adjuntan como anexo a este informe. Ver Anexo 2- Análisis muestras de escorrentía. Sección: Hidrogramas, polutogramas y correlaciones de la campaña de 2019.

2.2 Conclusiones

Los episodios de lluvia son muy variables en cuanto cantidad, intensidad, duración y movilización de contaminantes.

El carácter marcadamente local de algunas lluvias justifica la necesidad de instalar pluviómetros cercanos a la zona de muestreo.

Una vez que se registra agua en el punto de control, tras el inicio de la lluvia, aumenta rápidamente la concentración de contaminantes y posteriormente desciende [*first flush*]. Para caracterizar el *first flush* ocasionado por un episodio de lluvia es necesario la toma de muestras puntuales en intervalos de pocos minutos.

Los metales pesados analizados están asociados a los sólidos en suspensión. Se relacionan los sólidos cuantificados con zinc y plomo. En el caso de cromo y cobre los valores los metales pesados en el sobrenadante quedan por debajo del límite de cuantificación. Para poder cuantificar los metales pesados es necesario recurrir a técnicas analíticas como ICP masas [ppb].

No se detectan valores significativos de nitrógeno ni fósforo en las muestras recogidas.

Es necesario establecer prioridades en cuanto a los parámetros que queremos determinar en función del volumen disponible, puesto que, en nuestra localización, para lluvias de poca cuantía los volúmenes muestreados pueden ser limitantes.

3. SUDS

3.1 Diseño de los SUDS

El diseño inicial de los SUDS se planteó principalmente para laminar la escorrentía generada y minimizar impactos en la red unitaria aguas abajo. Además, se planteó reducir la carga contaminante arrastrada mediante la aplicación de un sencillo tren de tratamiento. Un tren de tratamiento es uno o varios SUDS conectados con los que se consigue un tratamiento en serie mejorando la calidad final del agua.

Teniendo en cuenta el espacio con el que se contaba se diseñaron tres SUDS (Figura 14). Dos de ellos forman el tren de tratamiento y el tercero consiste en un sistema de biorretención. La función de este último principalmente es la laminación de caudales y gestionar parte de la contaminación arrastrada. Esto es importante en el contexto de la red de colectores de Tudela, donde la prioridad es minimizar el impacto de los caudales unitarios en la red.

El dimensionamiento de cada uno de ellos se ha realizado siguiendo las directrices del borrador de las “Normas Técnicas para el diseño de las obras e instalaciones para la gestión de aguas de escorrentía” elaborado por el Ministerio. Los criterios para la gestión sostenible de la escorrentía pluvial tienen como objetivo fundamental reducir el impacto de los desbordamientos de sistemas de saneamiento, tanto si son unitarios como separativos. En el documento “se establece un criterio de dimensionamiento de los sistemas de control y tratamiento de escorrentías pluviales con el fin de limitar la contaminación movilizada hacia las masas acuáticas a través de los desbordamientos de sistemas pluviales”. Estas normas proponen “como estándar para el dimensionamiento de las obras e instalaciones para la gestión de las aguas de escorrentía pluvial contaminada la eliminación del 80% de la masa promedio anual de precipitación de sólidos en suspensión [SS]. El volumen asociado a este estándar se define en las referencias internacionales como “volumen de calidad de agua”. Y “Este volumen de calidad se puede definir a través del volumen de escorrentía que genera una lluvia de diseño que permite que el porcentaje de eliminación [retención] de la carga de sólidos en suspensión totales anuales sea igual o superior al 80%.”

Para lograr este objetivo consideran “que el volumen de diseño de las técnicas SUDS debe ser, como mínimo, el necesario para tratar la lluvia total registrada en 24 horas del percentil del 80% de la zona de estudio”. Para obtener este dato se deben emplear series de precipitaciones diarias de 10 años consecutivos y recientes. Esto quiere decir que un SUDS como mínimo tiene que ser capaz de almacenar el volumen de lluvia equivalente al 80% de los eventos.

El dato de lluvia del percentil 80%, se convertirá al valor de lluvia en 24 horas empleando el factor k_b , incluido en la norma 5.2. - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras [Ecuación 1].

$$P_{24h,80\%} = k_b \cdot P_{diaria,80\%} = 1.13 \cdot P_{diaria,80\%} \quad [1]$$

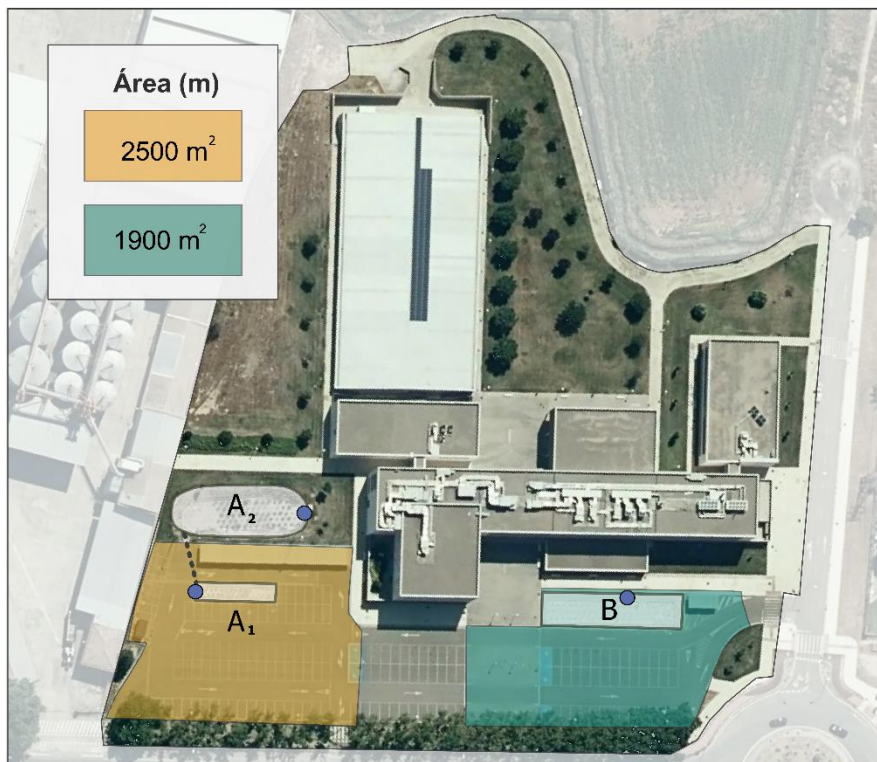


Figura 14 Áreas drenadas a los SUDS.

El estudio de las precipitaciones de la Comunidad Foral de Navarra se ha llevado a cabo durante los últimos años con el grupo de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Pública de Navarra. Fruto de este estudio, se desprende que el percentil del 80% en la localidad de Tudela es de 9,2 mm, aplicando el factor k_b se convertiría en 10,4 mm [López y Goñi, 2020]. Cada uno de los SUDS tiene que ser capaz de retener como mínimo la escorrentía generada para 10,4 mm del área que recoge.

El primer SUDS, A1 es la primera etapa del tren de tratamiento. Este SUDS captará la escorrentía generada en 2500 m² de superficie impermeable del aparcamiento ([Error! No se encuentra el origen de la referencia.]). Estos 2500 m² con el percentil del 80% de 10,4 mm generaran un volumen de aproximadamente de 26 m³ de escorrentía.

La segunda etapa del tren de tratamiento, el SUDS A₂ captará el agua de lluvia que pase de A₁ ([Error! No se encuentra el origen de la referencia.]). Esto quiere decir que entre los dos como mínimo tienen que ser capaces de retener 26 m³ de escorrentía más la escorrentía directa que llegue a A₂.

El SUDS B, se diseñó como una zona de biorretención, principalmente para laminar la escorrentía y mejorar la calidad del agua antes de un posible alivio a la red. Este es independiente y recogerá la escorrentía de 1900 m². Con los 10,4 mm mencionados anteriormente se generarán unos 19,8 m³ de escorrentía que se habría de almacenar en la balsa.

Conociendo el volumen mínimo a almacenar en cada uno de los SUDS (Tabla 1) se realizó el dimensionamiento de cada uno de ellos, siempre con una capacidad mayor aplicando el criterio de seguridad.

Tabla 3 Volumen mínimo almacenable en cada SUDS.

	A ₁ + A ₂	B
V _{min} [m ³]	26	19,8

La primera etapa de tren de tratamiento, A₁ al encontrarse dentro del propio aparcamiento, se quería minimizar la repercusión y se diseñó con menor capacidad. El volumen que no es capaz de almacenar pasa a la segunda etapa la cual se dimensionó con mayor capacidad. Esta zona será un “cuello de botella” que retenga volumen y lamine caudal hasta la siguiente etapa. Contando con las características del terreno la profundidad del SUDS se determinó en 0,5 metros con una superficie de unos 100 m².

La segunda etapa, el SUDS A₂ se ha dimensionado para diferentes configuraciones pudiendo llegar a recoger la escorrentía generada en 3000 m² si se incluyen los tejados traseros. Este cuenta con un aliviadero conectado a la red de pluviales del aparcamiento para que, en caso de sobrecarga, no haya problemas de inundaciones. A día de hoy está configurado para recibir únicamente el agua de salida de la primera etapa y la pluviometría directa, concluyendo con el tren de tratamiento.

El SUDS B, se diseñó como una zona de biorretención, principalmente para laminar la escorrentía y el control de la calidad del agua antes de un posible alivio a la red. Las capas inferiores cuentan con gravas lo que permite una alta permeabilidad. Esto permite que la escorrentía se infiltre, se evapore y se sedimenten las partículas. El SUDS se dimensiono con un coeficiente de seguridad, tiene 200 m² con una profundidad de 0,5 m.

Todos los jardines tienen una primera capa de cantos rodados. La segunda capa son unos 15 cm de tierra vegetal seguido de otra capa de tierra y una capa de gravas de unos 40 cm. Además, cada SUDS tiene un aliviadero con un vertedero en V de 90° que se utiliza para poder medir el caudal de evacuación con equipos específicos para tal finalidad. La ubicación de los tres vertederos se puede ver en la [Figura 14](#), marcados con un círculo azul. La altura de los vertederos se puede variar en función de los volúmenes mínimos que se quieran retener. Para calcular la altura de los aliviaderos, se calcularon los volúmenes diferenciales en franjas de 5 cm de altura para cada uno de los SUDS. Con el percentil 80, de 10,4 mm y sabiendo la superficie impermeable redirigida a cada uno de los SUDS se obtiene el volumen mínimo que debe almacenar cada uno de ellos (Tabla 1). En el caso del tren de tratamiento el aliviadero del A₁ es el elemento de conexión entre un jardín y otro. Los 26 m³ a almacenar se reparten entre el A₁ y A₂, la altura del vertedero en V del A₁ se calculó para almacenar hasta 6 m³ y los 20 m³ restantes pasaran al A₂. El vertedero en V de esta segunda conecta con los colectores de pluviales. En el caso del B, el vertedero en V también conecta con los colectores de pluviales y la altura del vertedero está calculada para retener 19,8 m³.

3.2 Construcción

En 2018 se realizó un levantamiento topográfico de la zona y se elaboró propuesta de proyecto constructivo que tras ser evaluada por la Gerencia de la Universidad Pública de Navarra fue aceptada mediante un convenio de colaboración. Tras la aprobación de este se finalizó el proyecto constructivo, se solicitó la licencia de obra y se licitaron las obras, que comenzaron en septiembre de 2019 (Figura 15). La obra se finalizó en febrero de 2020 y posteriormente se iniciaron los trabajos de jardinería (Figura 16).



Figura 15 Construcción de los SUDS.



Figura 16 SUDS finalizados sin vegetación.

3.3 Jardinería

Entre los criterios más importantes para la elección de la vegetación se encuentran la utilización de especies autóctonas adaptadas a las características climáticas del lugar y con bajas necesidades hídricas. Estas características son comunes a las de los jardines sostenibles, que intentan adaptarse a las condiciones naturales de la zona, ahorrar agua seleccionando especies adecuadas, empleando métodos de riego eficientes y aprovechando el agua de lluvia.

Se considera que Tudela tiene un clima mediterráneo continental, con precipitaciones anuales medias entorno a los 400 mm y oscilaciones térmicas marcadas con veranos calurosos e inviernos fríos. Estas características han sido la base para la elección de la vegetación. Las especies seleccionadas para los SUDS son similares para los tres jardines [Figura 17, Figura 18 y Figura 19]. En los taludes se plantaron plantas aromáticas más resistentes a condiciones áridas [*Thymus zygis*, *Thymus mastichina*, *Salvia lavandulifolia*, *Santolina chamaecyparissus*, *Rosmarinus officinalis prostrates*, *Iris germánica*, *Sedum sediforme*] y en la base arbustos de mayor tamaño habituados a zonas húmedas [*Vitex agnus-castus*, *Salix eleagnos*, *Salix purpurea*, *Cornus sanguínea*]. La base de los SUDS puede quedar bajo el agua durante algunas horas por lo que las plantas tienen que ser adecuadas para esta situación [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.].

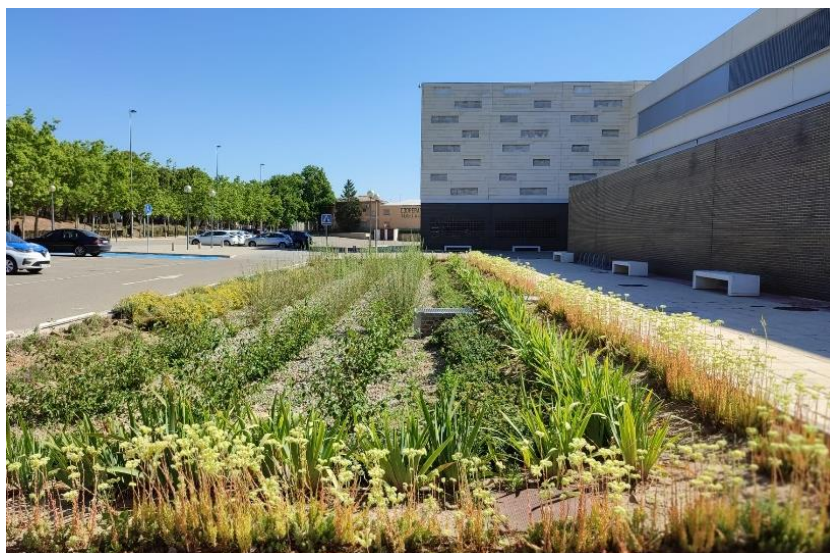


Figura 17 Imagen del jardín B



Figura 18 Imagen del jardín A₂.



Figura 19 Imagen del jardín A₂.



Figura 20 Imagen del jardín B en un evento de lluvia.



Figura 21 Vista aérea de los SUDS.

3.4 Sensorización

El sistema prototipo cuenta con diferentes sistemas de medición para llevar a cabo una monitorización exhaustiva. Los datos obtenidos se utilizarán para la modelización de la instalación, con el objetivo de poder optimizar el diseño y dimensionamiento de futuros SUDS, así como para estudiar y caracterizar sus beneficios en cuanto a volúmenes y contaminantes retenidos. Dentro del seguimiento se están midiendo las lluvias, el volumen retenido en cada una de las balsas, la calidad del suelo y su acumulación de contaminantes y la calidad del agua de entrada y salida de los sistemas.

Para ello se cuenta con diferentes sistemas de medición:

- Pluviómetro instalado en la propia Universidad para la medición de las lluvias in situ.
- Sensores para la medición del nivel del agua en los aliviaderos. Hay tres tipos de medidores instalados: radares, ultrasonidos y de presión. Con ellos se cuantifican las horas de alivio y se mide el caudal del mismo.
- Caudalímetro portátil para medir el flujo o caudal total de la salida de la red de pluviales del aparcamiento.
- Tubos piezométricos para medir la saturación del suelo, y un medidor de nivel automático de medición del nivel de agua bajo el nivel del suelo. Se adjunta como anexo a este informe un documento sobre la instalación de los tubos piezométricos. Ver Anexo 1- Instalación de puntos de control de infiltración en los SUDS. IONAVARRA
- Tomamuestras portátiles para recoger muestras de escorrentía de entrada y salida de los sistemas.



Figura 22 Pluviómetro, radar y medidor de presión analógico.

4. RESULTADOS: TOMA DE MUESTRAS Y ANALÍTICAS

Una vez finalizada la construcción del SUDS se comenzó a hacer un seguimiento de los sensores para ver la relación entre los eventos, los alivios y la infiltración. A su vez, en 2021, con la finalización de la instalación de los equipos descentralizados, se comenzaron los muestreos en los SUDS que esta previstos hasta final de proyecto [2025]. Se han realizado muestreos de escorrentía y suelos.

El objetivo de los muestreos es cuantificar la retención de contaminantes en los SUDS así como compararlo con la situación previa a la construcción.

4.1 Eventos de lluvia y muestras de escorrentía

Entre septiembre del 2020 y septiembre del 2021 han caído un total de 450 mm aproximadamente. Los SUDS han recogido el 100% de la escorrentía generada para estas lluvias en todos los eventos, salvo en uno ocurrido el 1 de septiembre del 2021, donde cayeron 68 mm y hubo un alivio a la red. Esto indica, además, que la contaminación arrastrada por la escorrentía, también ha sido retenida. Se estima que el volumen retenido es de unos 1750 m³ para este periodo de un año. La máxima intensidad registrada es de 144 mm/h en cinco minutos.

Hasta enero del 2021 el A₁ y el B tenían los vertederos a 5 cm del suelo, no se habían optimizado las alturas todavía. Se han recopilado los alivios ocurridos hasta ese momento y se adjuntan como anexo a este informe. Ver Anexo 2- Análisis muestras de escorrentía. Sección: Resumen de alivios 2020, alturas de vertederos sin optimizar.

En la recogida de muestras se tuvieron en cuenta tanto los parámetros a analizar, como los métodos analíticos y la forma de muestreo en intervalos de las campañas anteriores. Entre los parámetros físico químicos se han analizado pH, DQO, DQO filtrada, Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno total, Conductividad, Turbidez, Sólidos en Suspensión y Solidos Suspendidos Volátiles [se requieren 1000 ml de muestra]. En cuanto a metales pesados, además de analizar el plomo, zinc, cobre y plomo como en las anteriores campañas, se añadieron el níquel y el cadmio [se requieren 100 ml de muestra]. Estos dos últimos pueden venir de las ruedas, los frenos y el asfalto.

Los metales pesados, como en la anterior campaña, se cuantificaron por ICP-MS. Además, se comenzaron a analizar los Hidrocarburos [C10-C40] por cromatografía de gases/ionización de llama [CG-FID], [se requieren 250 ml de muestra]. Todos los análisis se han realizado en laboratorios externos acreditados. Debido a que los volúmenes de muestras que se han ido recogiendo son muy limitados, no se pudieron analizar todos los parámetros en todas las muestras y se han priorizado los Sólidos en Suspensión y los metales pesados. El resto de parámetros físico químicos se ha visto que se mantienen bastante constantes debido a que no hay gran carga de materia orgánica en el agua de lluvia.

Los muestreos se han planteado para recoger escorrentía de entrada y de salida de los SUDS. De esta forma se puede ver la contaminación que se queda retenida. Los puntos seleccionados para ellos se muestran en la Figura 23. Los círculos verdes muestran los puntos donde se ha planteado la recogida de las muestras de entrada a los SUDS, todos ellos son la entrada de escorrentía proveniente de rejillas de drenaje de unos ocho metros de longitud. Los círculos azules son los puntos de muestreo de salida de cada SUDS que son los aliviaderos de cada uno de ellos.



Figura 23 Puntos de muestreos de entrada [círculos verdes] y salida [círculos azules].

Para facilitar la instalación de los tomamuestras portátiles en la salida del A₁ y del B se han construido dos soleras de 80 x 80 cm con argollas para poder asegurar los equipos (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Para ocultar los tomamuestras se van a utilizar



compostadores [Figura 24].

Figura 24 Soleras construidas para instalar los tomamuestras



Figura 25 Compostadores ubicados en las soleras para ocultar los tomamuestras.

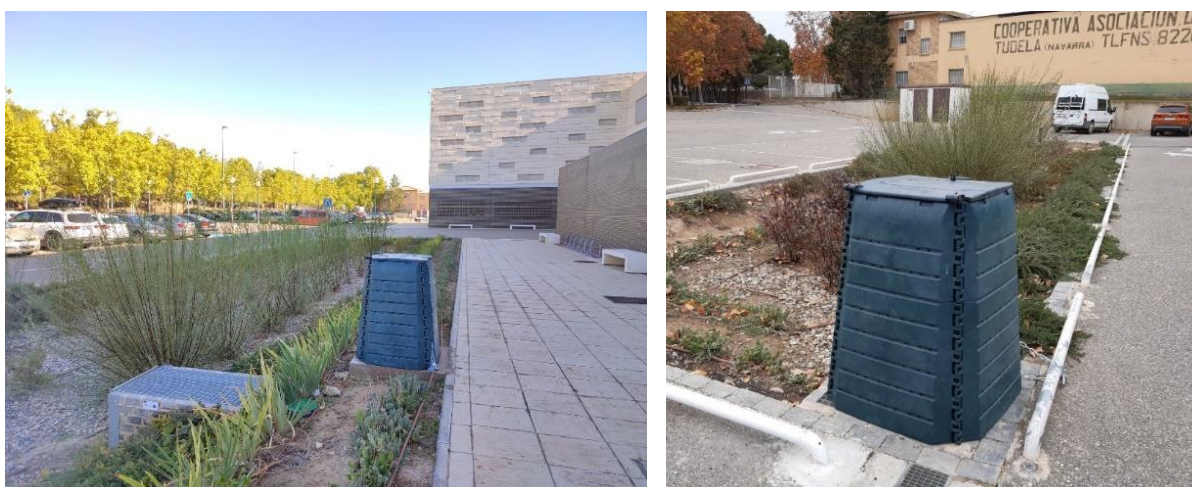


Figura 26 Tramex instalados en los aliviaderos.

Para evitar la acumulación de sedimentos y hojas en los aliviaderos, que empeora el funcionamiento de los medidores de nivel de agua y la recogida de muestras se han colocado unos tramex cubriendo los mismos (Figura 26).

A continuación, se muestran algunos resultados de los medidores y de las muestras recogidas. Hasta ahora, en la mayoría de los casos las muestras se han recogido manualmente. Las siguientes campañas de muestreo se realizarán con tomamuestras portátiles a intervalos irregulares y caracterizando de manera exhaustiva el primer lavado o *first flush* (Ejemplo de tiempos de muestreo: muestra inicial, 2 minutos, 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos).

4.1.1 Episodios:

1 de junio de 2021

El 1 de junio de 2021 con un volumen acumulado de 38 mm, hubo una salida de la balsa A₁ a A₂. Es decir, la primera etapa rebosó por el vertedero y el agua paso a la segunda etapa del tren de tratamiento. En la [Figura 27](#) se muestra un resumen de todo el evento con las alturas marcadas por los medidores de nivel y la pluviometría. Al inicio del evento se puede ver cómo subió el nivel del agua de manera muy rápida, con una lluvia totalizada de aproximadamente 9 mm. El recuadro verde indica el tiempo de salida de agua. Al finalizar el primer evento de lluvia el nivel del agua fue bajando conforme se iba infiltrando. La mañana siguiente, comenzó otro evento donde hubo otro alivio. Esta vez la infiltración en el suelo fue más lenta ya que el suelo estaba saturado. Este evento demuestra que el tren de tratamiento funciona de manera correcta y las alturas de los vertederos a pesar de estar diseñadas para 10,4 mm pudo retener 38 mm en 14 horas, lo que equivale a un volumen aproximado de 90 m³ que no se introdujeron en la red de saneamiento. En el caso del jardín B, retuvo alrededor de 70 m³.

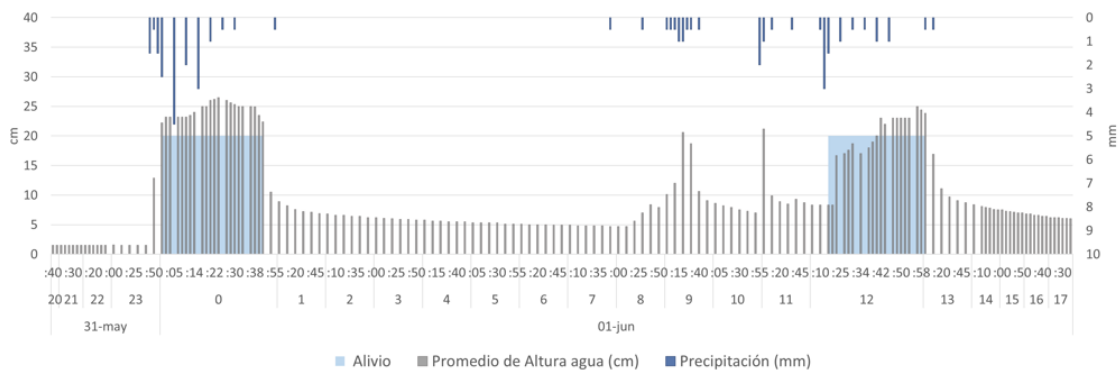


Figura 27 Grafica del agua de salida del A₁ al A₂ [tren de tratamiento] 1 de junio.

Este día se recogieron 3 muestras. Una muestra compuesta de toda la noche que representa el *first flush* o pico de contaminación, una muestra del alivio y otra muestra puntual de entrada al sistema en el segundo evento. En la Tabla 4 se muestran algunos resultados para los análisis realizados. La muestra de alivio contiene alrededor de un 90% menos de los contaminantes registrados a la entrada. Prácticamente todos los sólidos suspendidos han sido retenidos y a su vez los metales pesados adheridos a ellos también se han reducido en porcentajes muy elevados. Todos los resultados de las analíticas se adjuntan como anexo a este informe. Ver Anexo 2- Análisis muestras de escorrentía. Sección: Resumen de resultados analíticos obtenidos en 2021.

Tabla 4 Resultados análisis evento con salida de A₁.

	Muestra entrada	Muestra salida	% de eliminación
SS [mg/l]	1490	51	97
Zinc [total] mg/l	0,9	0,042	95
Cromo [total] mg/l	0,029	<0,0050	83

Cobre [total] mg/l	0,057	0,003	95
Plomo [total] mg/l	0,028	0,0015	95
Cadmio [total] mg/l	0,00026	<0,00002	92
Niquel [total] mg/l	0,026	0,0016	94
DQO	40	10	75

11 de junio de 2021

El 11 de junio hubo un evento de 10 mm en el que no hubo ningún alivio, sin embargo, se recogieron cuatro muestras puntuales de escorrentía de entrada al SUDS A₁ para caracterizar la entrada. Los resultados de las analíticas se adjuntan como anexo a este informe. Ver Anexo 2- Análisis muestras de escorrentía. Sección: Resumen de resultados analíticos obtenidos en 2021. Los parámetros físico químicos como la DQO y el Nitrógeno total dieron resultados muy bajos, como es de esperar en el agua de lluvia. A diferencia de las analíticas del 2019, en los casos en los que se pueden cuantificar los metales pesados, hay mayor concentración en la parte decantada, es decir un mayor porcentaje de metales retenido en los sólidos en suspensión.

1 de septiembre de 2021

El día 1 de septiembre comenzó una tormenta DANA o una gota fría, muy impredecible y con lluvias intensas. Este mismo día hubo inundaciones en algunas partes de Tudela. Cayeron 68 mm y fue la primera vez, desde que se habían optimizado los vertederos, que alivió uno de ellos, el B. En las [Figura 28](#) y [Figura 29](#) se muestran las señales de los medidores con los momentos de alivio en el A₁ y en el B. No se pudo cuantificar el caudal aliviado debido a la elevada altura de agua que llegó hasta el medidor impidiendo una correcta medición.

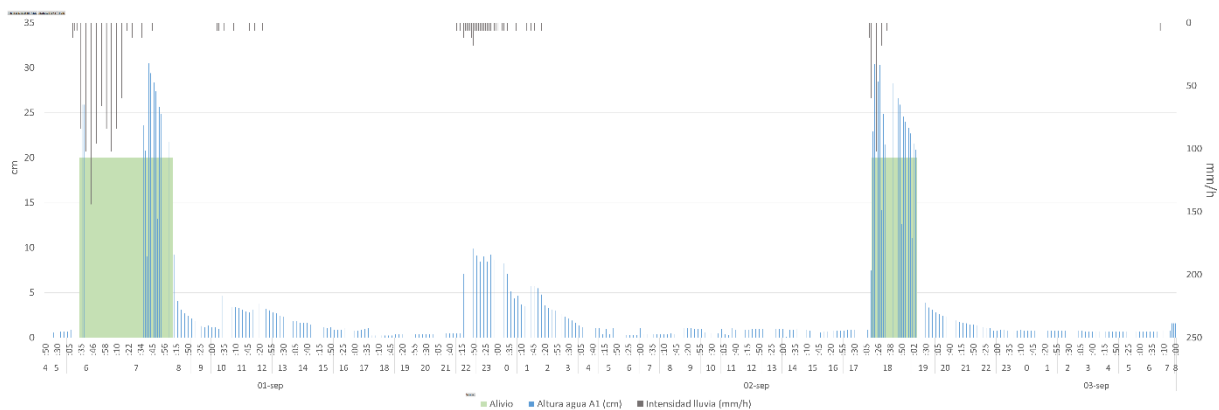


Figura 28 Grafica del agua de salida del A₁ al A₂ (tren de tratamiento) 1 de septiembre.

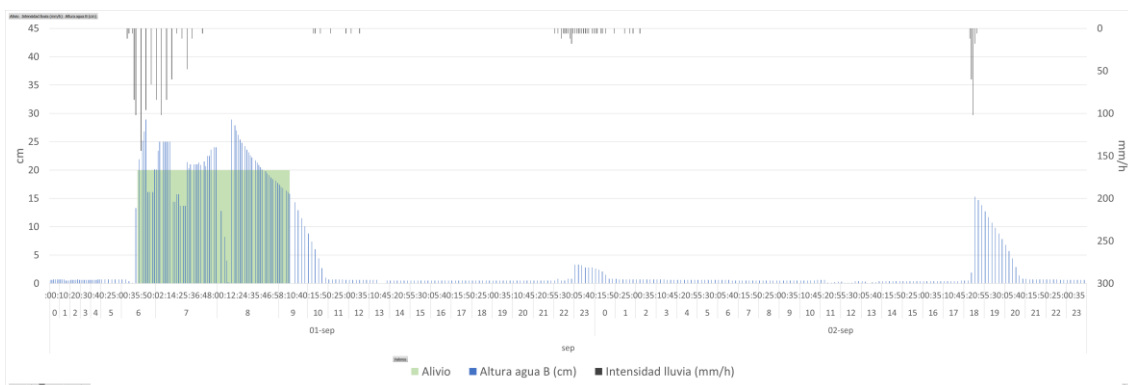


Figura 29 Grafica de la altura de agua en el B, 1 de septiembre.

23 de noviembre de 2021

En el siguiente evento hubo una precipitación de 35 mm. Esta vez se recogieron con el tomamuestras tres muestras iniciales en la entrada del A₁ (Figura 30). Y otras dos muestras recogidas manualmente que correspondían una a la *first flush* y otra a la salida. (Ver Anexo 2- Análisis muestras de escorrentía. Sección: Resumen de resultados analíticos obtenidos en 2021).



Figura 30 Tomamuestras en el punto de entrada del A₁.

La primera muestra (M1) tuvo una muy alta concentración de sólidos en suspensión, 8823 mg/l, esto es debido a que se recogió en un recipiente todos los sólidos que llegaron las primeras horas del evento (Figura 30). En las muestras tomadas con el tomamuestras únicamente se pudieron cuantificar los metales debido al volumen limitado. En las primeras dos (M3 y M4) no había apenas metales pesados, se puede corroborar con el color que mostraban las muestras (Figura 31). En cambio, la tercera muestra del tomamuestras (M5), presentó una elevada concentración de zinc total, 6,3 mg/l. Esta última también se presenta en la Figura 31, con una turbidez elevada evidente. Por último, la muestra M2 corresponde a la salida del A₁ y tuvo una concentración mucho menor en todas las medidas. Los sólidos suspendidos únicamente fueron de 17,8 mg/l y los metales pesados concuerdan con la baja concentración de sólidos. Se ha visto que en las muestras que presentaban una menor

turbidez, es decir menor concentración de sólidos, los metales pesados retenidos en los sólidos estaban casi por debajo del 50% mientras que en las otras representaban casi un 100%.



Figura 31 Muestras M3, M4 y M5.

4.2 Conclusiones

Los SUDS han retenido cerca del 100% del volumen de escorrentía y de la contaminación asociada a ésta.

Los medidores de nivel han resultado muy útiles para la caracterización de los eventos.

Los tomamuestras portátiles se comenzarán a utilizar de forma más continuada en 2022, ya que se ve necesaria su uso para realizar polutogramas de entrada y salida.

Teniendo en cuenta que el volumen de muestreo es limitado debido a la configuración de los puntos de muestreo y de los propios eventos, se hace necesario priorizar parámetros. Se continuará priorizando sólidos en suspensión y metales pesados dado su interés.

4.3 Muestras de suelos

Debido a que la escorrentía se redirige a los SUDS, los contaminantes arrastrados por la misma también llegan a ellos. Así pues, se decidió recoger muestras de suelo para cuantificar los metales pesados e hidrocarburos presentes.

Se realizó un muestreo inicial en octubre de 2020 y al cabo de un año en octubre del 2021 para cuantificar la posible retención de contaminantes. El muestreo fue realizado por el grupo “Evaluación y gestión sostenible del suelo” de la UPNA, socios del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC.

4.3.1 Muestreo inicial 2020

Se recogieron un total de 24 muestras de suelo procedentes del SUDS B. Para la recogida se utilizó una barrena [Figura 32]. Las muestras fueron codificadas tal y como aparece en la Figura 33. La primera y segunda cifra del código indica la posición de la muestra, y última cifra designa la profundidad a la que se tomó la muestra. Se realizaron tres transectos lineales, donde se muestrearon cuatro puntos a dos profundidades distintas 0-10 cm y 10-30 cm. En general se considera que la movilidad de los metales pesados es muy baja, y suelen quedarse acumulados en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes subsuperficiales en muy pequeñas cantidades. Es por ello que la presencia de altas concentraciones en el horizonte superficial seguida de un drástico decrecimiento a los pocos centímetros de profundidad es un buen criterio de diagnóstico de contaminación antrópica.



Figura 32 Toma de muestras de suelo con una barrena

Desde el grupo de la UPNA se realizaron los análisis texturales, conductividad, pH, carbonatos, C orgánico e intercambio catiónico del suelo que se adjuntan como anexo a este informe. Ver Anexo 2- Resultados analíticas suelo y escorrentía. Sección: Análisis muestras de suelo. El suelo se considera franco arcilloso o franco arcillo arenoso dependiendo del método. El pH en

todos los casos era básico con una media de 8,3. La conductividad es más bien baja salvo en un par de casos que ha llegado a una conductividad media de 1245 ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Las analíticas de metales pesados e hidrocarburos se realizaron en un laboratorio externo. Los metales pesados se cuantificaron por ICP/MS y los hidrocarburos [C10-C40] por CG/FID. En la Tabla 5 se muestran los resultados de las analíticas. El cadmio no se muestra en la tabla debido a que estaba por debajo del límite de cuantificación ($<0,5 \text{ mg/kg}$). Los hidrocarburos salvo en dos de las muestras se encontraban por debajo del límite de cuantificación. La concentración del zinc ha sido la más elevada entre los metales pesados, igual que en las muestras de escorrentía. Comparando los resultados con los rangos normales de Cd, Cu, Ni, Pb, Zn (mg/kg) según la Directiva Europea 86/278/EEC, y concentración máxima aceptable de hidrocarburos en mg/kg [

Tabla 6], todas las muestras están por debajo del máximo aceptable.

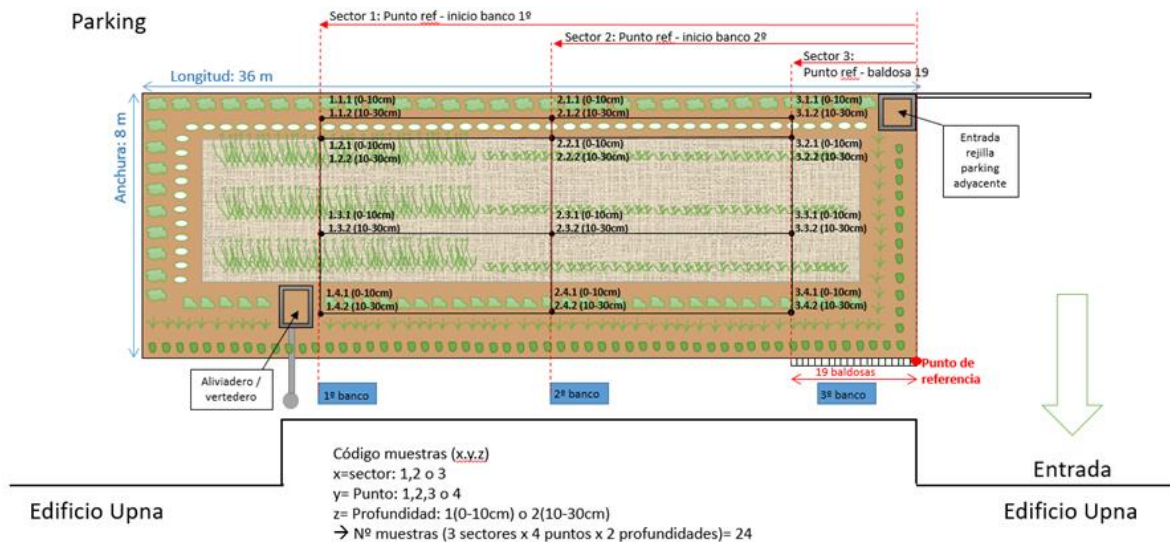


Figura 33 Esquema de la ubicación y codificación de los puntos de muestreo en el SUDS B.

Tabla 5 Resultados de metales pesados e hidrocarburos en las muestras de suelo (2020).

Punto de muestreo	Cobre (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Hidrocarburos C10-C40 (mg/kg)
1.1.1.	12,8	13,1	13,5	15,4	32,6	< 25
1.1.2.	12,2	12,7	12,8	14,6	31,5	< 25
1.2.1.	11,8	11,7	12,5	13,3	34,5	< 25
1.2.2.	10,1	12,9	13,1	13,8	31,7	< 25
1.3.1.	8,47	13,5	12,9	10,7	30,7	< 25
1.3.2.	8,92	14,2	13,7	12,3	32	< 25
1.4.1.	12,1	13,7	13,9	14,6	33,5	< 25
1.4.2.	11,5	12,6	12,7	13,8	30,4	< 25
2.1.1.	10,8	11,8	12	12,8	31,2	< 25
2.1.2.	11,9	13,6	13,8	15,6	34,6	< 25
2.2.1.	9,07	11,5	11,7	11,4	30,3	< 25
2.2.2.	8,38	13,8	13,1	11	30,8	< 25
2.3.1.	7,97	13,4	12,8	11,5	29,6	< 25
2.3.2.	7,25	12,4	11,7	10,3	27,2	30,1
2.4.1.	11	11,8	12,6	13,9	34,4	< 25
2.4.2.	10,6	1,3	11,6	12,9	28,8	< 25
3.1.1.	11,8	11,3	12,5	13,9	33,8	< 25
3.1.2.	12	12	15,6	13,9	32,7	< 25
3.2.1.	10,9	10,6	11,7	12,9	34	< 25
3.2.2.	10,5	11,1	12,1	13,3	35,9	< 25
3.3.1.	12,2	17,3	17,7	19,5	42,5	< 25
3.3.2.	11,2	17,5	16,5	17,3	39,1	< 25
3.4.1.	11,9	16,2	15,8	15,7	37,4	< 25
3.4.2.	11,8	14,1	14,6	15,8	35,4	50

Tabla 6 Rangos normales de Cd, Cu, Ni, Pb, Zn [mg/kg] en suelos ph=6-7, según la Directiva Europea 86/278/EEC, y concentración máxima aceptable de hidrocarburos en mg/kg

Cadmio	Cobre	Cromo	Níquel	Plomo	Zinc	Hidrocarburos
1-3	50-140	-	30-75	50-300	150-300	50

4.3.2 Muestreo 2021

En el segundo muestreo realizado en 2021 se recogieron 24 muestras del SUDS B en los mismos puntos y se enviaron a analizar los mismos análisis que en 2020.

En la toma de muestras se observaron costras de sal en la superficie del suelo (Figura 34) se espera que la conductividad de estas muestras sea superior al anterior muestreo ya que cuanto mayor sea la conductividad del suelo, mayor cantidad de sales contiene. Las sales se acumulan en la superficie por capilaridad.



Figura 34 Costra de sal en el suelo del SUDS B.

Los análisis texturales, conductividad, pH, carbonatos, C orgánico e intercambio catiónico del suelo se realizarán en la UPNA como en el anterior muestreo. Estos resultados se presentarán en un informe posterior.

Los metales pesados se cuantificaron por ICP/MS y los hidrocarburos (C10-C40) por CG/FID, en el mismo laboratorio externo que en 2020. En la Tabla 7 se muestran los resultados de los metales pesados e hidrocarburos. Al igual que en 2020, el cadmio no se muestra en la tabla debido a que estaba por debajo del límite de cuantificación (<0,5 mg/kg). Esto no resulta extraño si tenemos en cuenta el límite de rango normal del cadmio que se muestra en la Tabla 6 y es de 1-3 mg/kg. En el muestreo anterior únicamente 2 de las 24 muestras tuvieron hidrocarburos cuantificables, sin embargo, esta vez 10 muestras están por encima del límite de cuantificación (>25 mg/kg). En su mayoría, las concentraciones más altas se encontraron a 10-30 cm, como indica el estudio de Tedoldi *et al.* (2016). En cuanto a los metales pesados, el zinc ha vuelto a tener una concentración más elevada frente al resto. Todas las concentraciones vuelven a estar dentro de los rangos normales según la Directiva Europea 86/278/EEC. Se ha visto un aumento de concentración de metales pesados en gran parte de las muestras, sin embargo, no es un aumento muy elevado. En la tabla Tabla 8 se ha realizado una resta entre los resultados del 2021 y 2020 para ver la acumulación en un año. Algunos valores han dado negativo y algunos pocos muestran un aumento muy elevado, esto puede ser resultado tanto de la incertidumbre de los análisis como de deslizamiento de tierras. Las

concentraciones de metales se encontraron en el siguiente orden: Zinc > Cromo > Niquel > Plomo > Cobre > Cadmio. Este orden es casi igual al del estudio de Wigington Jr. *et al.* (1983)

Tabla 7 Resultados de metales pesados e hidrocarburos en las muestras de suelo (2021).

Punto de muestreo	Cobre (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Niquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Hidrocarburos C10-C40 (mg/kg)
Incertidumbre	27,8	39	30,4	31,5	30,6	39,3
1.1.1.		19,9	16,6	12,1	38	32,1
1.1.2.	12,3	21,1	18	13,6	36,3	26
1.2.1.	11,3	19	16,5	11,3	34,3	< 25
1.2.2.	11,9	24,6	20	12,9	37,9	< 25
1.3.1.	9,9	24	19,3	10,7	33,3	< 25
1.3.2.	9,47	22,3	17,7	10,3	33,6	27,5
1.4.1.	12,7	18,2	17	13,8	38,8	< 25
1.4.2.	12,7	21,9	18,1	13,2	34,9	< 25
2.1.1.	13	16,4	15,8	13,4	39,2	< 25
2.1.2.	11,5	22,2	17,6	13	33,3	< 25
2.2.1.	12,2	20,3	17,1	13,1	37,7	< 25
2.2.2.	9,38	19,8	16,4	11,6	31,2	< 25
2.3.1.	12,5	22,4	19,4	14,7	34,9	< 25
2.3.2.	10,7	22,4	19	13,3	35	< 25
2.4.1	12,4	20,5	17,9	37,2	36,1	< 25
2.4.2.	12	29,8	23,1	15,2	35,3	26
3.1.1.	12,1	16,1	16,2	14,6	35,4	< 25
3.1.2.	13,1	18,8	17,4	16,1	35,9	35,7
3.2.1.	13,3	20,8	17,9	25,3	39,2	87,4
3.2.2.	12,8	23,9	19,7	15,3	35,3	43,4
3.3.1.	11,7	21,5	19,6	17,7	34,8	30,6
3.3.2.	11,9	22,7	20,3	17,3	35,1	33,3
3.4.1.	14	17,6	17,4	22	36,3	< 25
3.4.2	12,6	22,4	21,3	16,3	32,2	28

en diferentes áreas de biorretención.

No se aprecia una gran diferencia entre la concentración de las muestras de 0-10 cm y de las de 10-30 cm, pero siguiendo la bibliografía puede ser que este efecto se pueda ver al cabo de unos años.

Debido a que los valores de concentración son bastante bajos no se puede hablar de un patrón con zonas donde haya habido una acumulación mayor de metales pesados. En el caso de los hidrocarburos las concentraciones más elevadas están en las zonas de los extremos y más concretamente en el extremo más cercano a la entrada de la universidad, corresponden a las muestras codificadas que empiezan por 3. Esto se estudiará más en profundidad en futuros estudios. Wigington Jr. *et al.* (1983) aparentemente atribuyeron los patrones de acumulación de metales en la superficie del suelo de un SUDS a la microtopografía y el tiempo de residencia resultante del agua estancada. Esto mismo podría ocurrir en este SUDS.

No hay muchos estudios de retención de metales pesados e hidrocarburos en SUDS. En el estudio de Gavrić *et al.* (2021), realizaron una revisión bibliográfica sobre la retención de

metales pesados en cunetas verdes, además de realizar un estudio experimental sobre ello. Sin embargo, el tipo de SUDS de este estudio es una zona de biorretención con la zona central deprimida.

Tabla 8 Resta de las concentraciones obtenidas en 2020 y 2021.

Punto de muestreo	Cobre (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Niquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Hidrocarburos C10-C40 (mg/kg)
1.1.1.	-0,7	6,8	3,1	-3,3	5,4	7,1
1.1.2.	0,1	8,4	5,2	-1	4,8	1
1.2.1.	-0,5	7,3	4	-2	-0,2	0
1.2.2.	1,8	11,7	6,9	-0,9	6,2	0
1.3.1.	1,43	10,5	6,4	0	2,6	0
1.3.2.	0,55	8,1	4	-2	1,6	2,5
1.4.1.	0,6	4,5	3,1	-0,8	5,3	0
1.4.2.	1,2	9,3	5,4	-0,6	4,5	0
2.1.1.	2,2	4,6	3,8	0,6	8	0
2.1.2.	-0,4	8,6	3,8	-2,6	-1,3	0
2.2.1.	3,13	8,8	5,4	1,7	7,4	0
2.2.2.	1	6	3,3	0,6	0,4	0
2.3.1.	4,53	9	6,6	3,2	5,3	0
2.3.2.	3,45	10	7,3	3	7,8	-5,1
2.4.1	1,4	8,7	5,3	23,3	1,7	0
2.4.2.	1,4	28,5	11,5	2,3	6,5	1
3.1.1.	0,3	4,8	3,7	0,7	1,6	0
3.1.2.	1,1	6,8	1,8	2,2	3,2	10,7
3.2.1.	2,4	10,2	6,2	12,4	5,2	62,4
3.2.2.	2,3	12,8	7,6	2	-0,6	18,4
3.3.1.	-0,5	4,2	1,9	-1,8	-7,7	5,6
3.3.2.	0,7	5,2	3,8	0	-4	8,3
3.4.1.	2,1	1,4	1,6	6,3	-1,1	0
3.4.2	0,8	8,3	6,7	0,5	-3,2	-22

Guo [1997] cuantificó la retención de plomo, zinc y cobre en un área de biorretención de 18 años. Los resultados medidos también se utilizaron para evaluar la aplicabilidad de valores recomendados para predecir cantidades de sedimentos y acumulación de metales pesados. Sin embargo, con la predicción se obtuvieron concentraciones mucho más elevadas que las reales. Los primeros centímetros de suelo muestreados tuvieron una concentración superior. Si comparamos las concentraciones del estudio con las obtenidas en el presente proyecto, las del estudio fueron superiores, muy posiblemente por el hecho de haber recogido la escorrentía durante 18 años.

4.4 Conclusiones

En las muestras iniciales de suelo todos los parámetros estaban dentro de los límites normales de contaminación. En un único año se ha visto la acumulación de metales pesados, pero sobre todo de hidrocarburos. Resulta interesante seguir con estos muestreos y se realizarán más análisis y estudios en esta línea.

Para futuras muestras de suelo se plantea la posibilidad de realizar especiación de metales, ya que es un factor importante que indica el grado de movilidad, toxicidad y biodisponibilidad de los metales pesados. Mediante la especiación se identifican y cuantifican las distintas especies, formas o fases definidas en las que un elemento existe en un material.

5. MODELIZADO

Se han desarrollado varios modelos para la caracterización de la cantidad de agua que llega a la salida general del aparcamiento de la UPNA de Tudela, y cómo influye la instalación de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) en estos parámetros. Para el modelizado de la cuenca se ha utilizado el programa Storm Water Management Model (SWMM) de la EPA, se trata de un programa de dominio público (software libre).

Para el calibrado del modelo se utilizaron datos de caudal y volumen obtenidos a partir de un caudalímetro portátil situado en la salida general del sistema de drenaje durante eventos en los años 2019, 2020 y 2021 ([Figura 35](#)).



Figura 35 Adquisición de datos de caudal mediante un caudalímetro portátil en el aparcamiento de la UPNA de Tudela.

Sin SUDS

Se diseñó un modelo de la cuenca antes de la instalación de los SUDS, se dividieron las áreas de aparcamiento y tejados en función de la pendiente y el punto de conexión con el sistema de drenaje ([Figura 36](#)). Para el modelado se supuso que toda el área de las subcuencas es zona impermeable, asignando números de curva de entre 98 y 91 según el tipo de superficie.

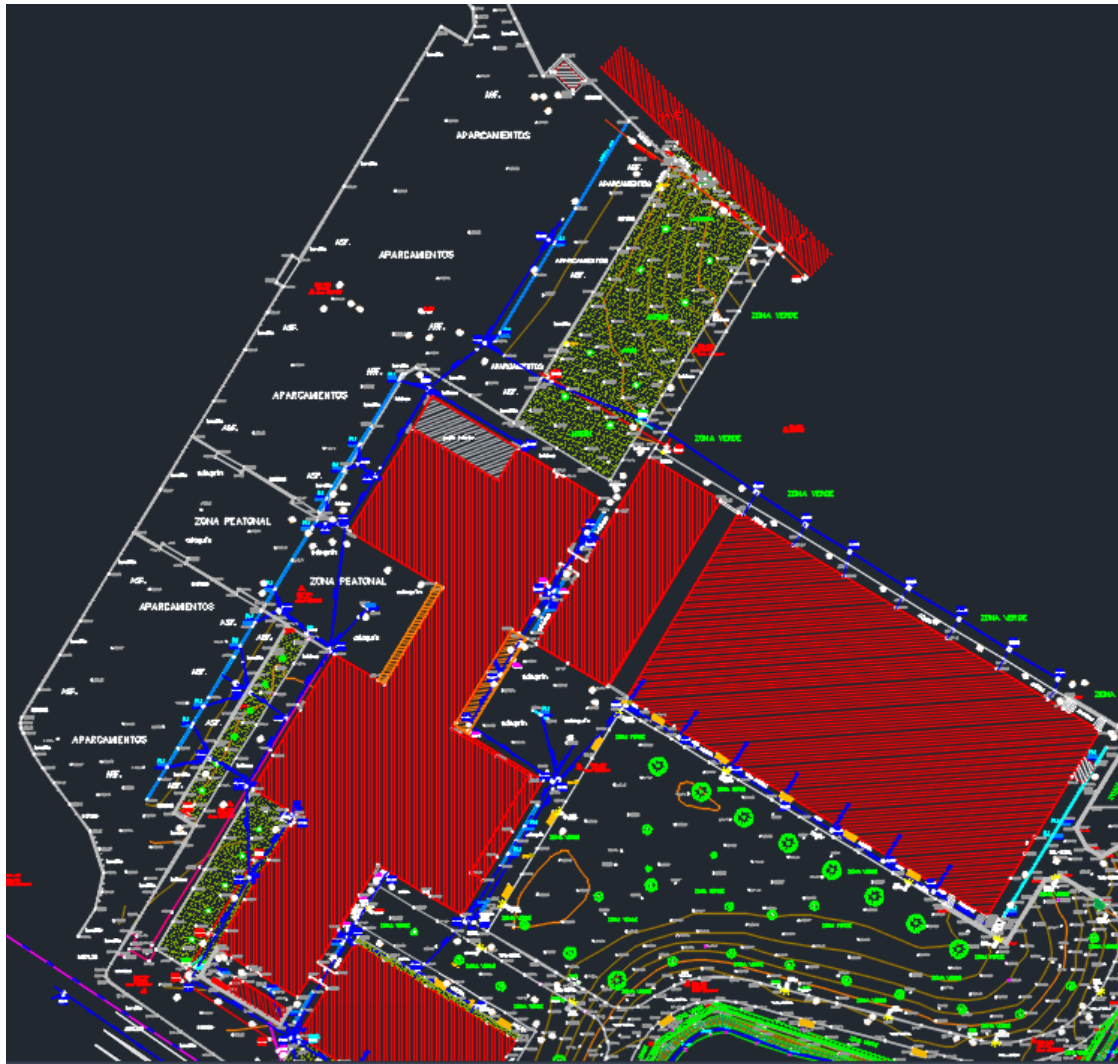


Figura 36 Plano del sistema de alcantarillado de la UPNA de Tudela antes de la instalación de los SUDS.



Figura 37 Captura del mapa del modelo antes de la instalación de los SUDS.

Los parámetros definidos durante el modelizado fueron establecidos en base a los valores de los manuales del programa, y calibrados utilizando los datos de caudal y volumen adquiridos en 2019 de un caudalímetro situado en la salida general (SG) de la cuenca, marcado en naranja en la [Figura 37](#).

El hidrograma obtenido en la simulación ([Figura 38](#)) se ajusta bastante al del caudalímetro, teniendo en cuenta que los datos de entrada de precipitación están definidos cada 30 minutos lo que genera cierta incertidumbre en la distribución del evento.

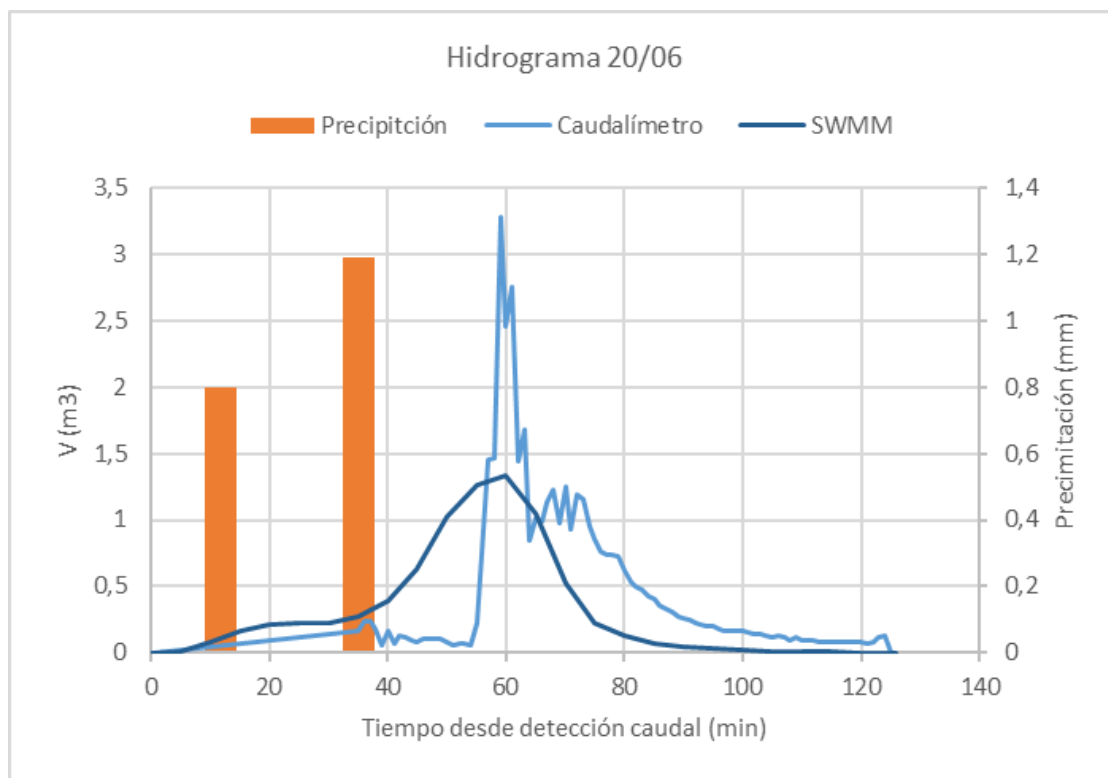


Figura 38 Hidrograma de calibración del modelo sin SUDS en SWMM.

Con SUDS

Debido a las modificaciones en las conexiones entre subcuencas y SUDS y los cambios en las alturas de los vertederos, se definieron 4 modelos distintos según las características de la cuenca en cada momento. En todos los casos los parámetros de las zonas impermeables fueron los mismos que se definieron para el modelo sin SUDS, la característica del área específica de los SUDS solo se ha podido calibrar para las zonas A₁ y B debido a la limitación en los datos de los que se disponía.

Para la definición de los SUDS se ha utilizado la opción LID Control del propio programa. Este apartado permite definir una subcuenca con características de un tipo de SUDS, concretamente, se ha utilizado el tipo Bio-Retention Cell, por ser el tipo de sistema que más se asemeja a los sistemas de drenaje instalados en el aparcamiento de la UPNA.

El modelado de los SUDS de la UPNA utilizando este programa está limitado por las características del programa, ya que este no contempla la posibilidad de colocar un vertedero en la capa superficial del sistema de drenaje. Se observó que al definir la altura de las paredes como la altura real solo llegaba agua al aliviadero cuando la altura de agua superaba la de las paredes. Para simular el vertedero se decidió definir Berm Height como la altura a la que se encuentra la punta de abajo del vertedero y que el agua que desbordará llegará a un nodo conectado a una tubería triangular de 0,19 m [altura del vertedero] y 0,01 m de longitud.

Los parámetros de B se calibraron utilizando los datos de alivio del día 16/04/2020 y se comprobaron utilizando el resto de datos de alivio todos ellos, ocurrieron cuando los SUDS se encontraban en las condiciones generales. La [Figura 39](#) muestra el ajuste de los alivios simulados respecto a los datos reales de alivios de los que se disponía, en ella se puede intuir que la exactitud depende en gran medida del tipo de precipitación.

El modelizado es una herramienta muy útil sobre todo para simular diferentes tipos de SUDS en una zona donde se quieran construir. De esta manera se puede seleccionar la mejor opción de drenaje sostenible adaptada a cada sitio. Por ello se va a seguir trabajando en esta línea de modelizado. Además, en 2021 el Gobierno de Navarra adjudicó a NILSA un proyecto de I + D denominado “Evaluación de la mitigación del impacto de la escorrentía urbana con Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en las Redes de Saneamiento” en el que se participa junto a la UPNA, en el que se está trabajando con modelos de SUDS en SWMM e IBER. Ambos tienen módulos específicos para el modelizado de drenaje sostenible. En este proyecto además de continuar con el modelizado de los SUDS de Tudela, también se va a modelizar el aparcamiento del campus de la UPNA de Pamplona para la posible incorporación de SUDS.

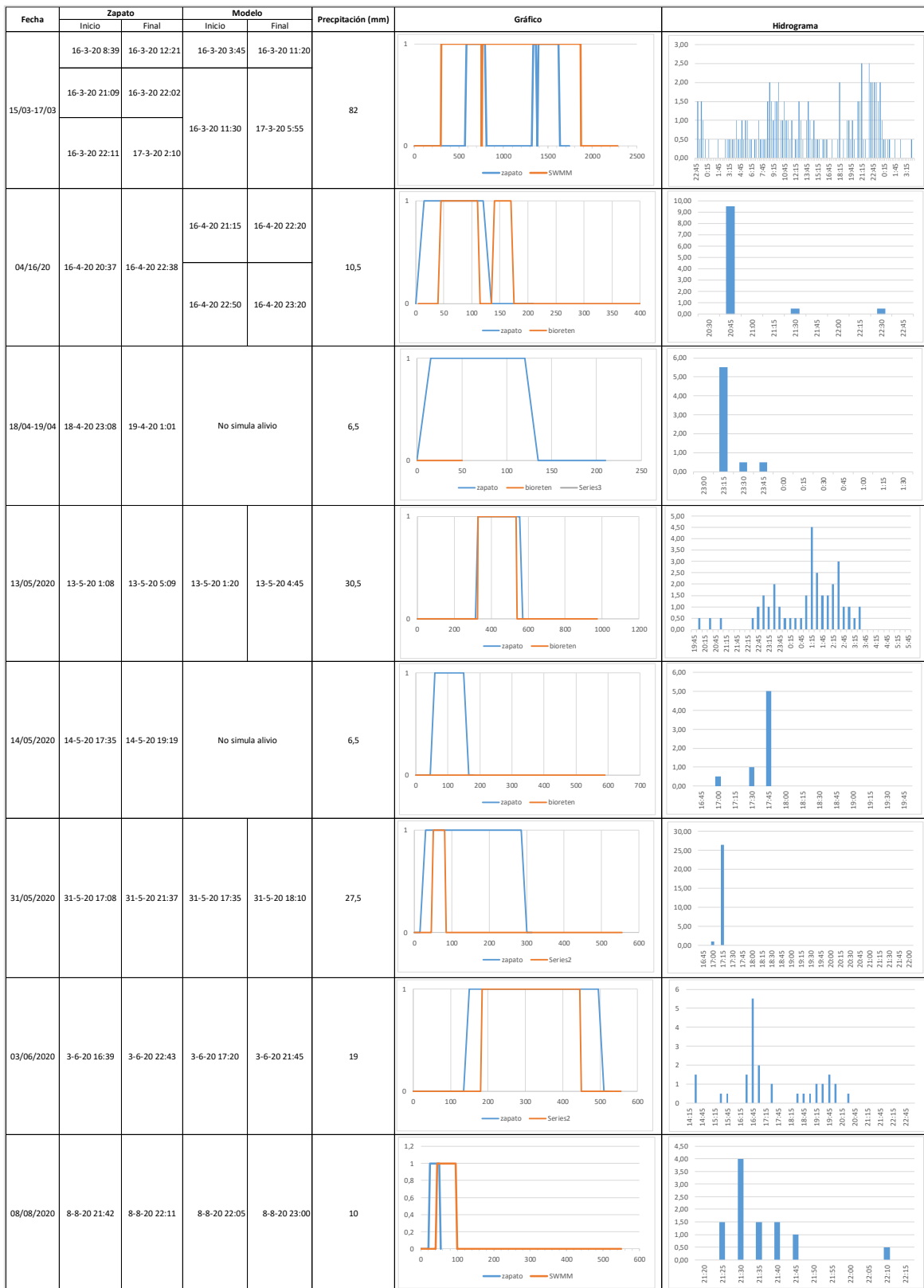


Figura 39 Modelado de alivios en la zona B.



6. GUIA DE DISEÑO

NILSA ha elaborado las “Recomendaciones básicas de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible [SUDS] en Navarra”, contando con la colaboración de Green Blue Management S.L. [empresa especializada en SUDS del Grupo TYPESA]. Esta acción también se enmarca en el cumplimiento del Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano 2019-2030, promovido y dirigido por el Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente del Gobierno de Navarra, en cuya elaboración han participado las empresas públicas NILSA y GAN-NIK, que participan en LIFE-IP NAdapta-CC

Para impulsar unos desarrollos urbanos más sostenible, que integren el empleo de Soluciones basadas en la Naturaleza [SbN] como son los SUDS, es necesario un cambio de paradigma respecto a la manera convencional de edificar y urbanizar, de modo que el agua de lluvia se considere un valioso recurso y no un residuo del que deshacerse rápidamente. Aunque esta transición ya se inició en España hace dos décadas, es ahora cuando está evolucionando con más fuerza, tratando de vencer las barreras que perduran, principalmente de índole regulatorio y de gobernanza [Andrés-Doménech et al., 2021].

Para seguir superando estas barreras, este documento busca incorporar una serie de recomendaciones básicas de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en Navarra, con el objeto de crear un documento sencillo con un propósito múltiple técnico-didáctico y dirigido a un público diverso, que favorezca la implantación del drenaje sostenible en la Comunidad Foral, trasladando los beneficios que aportan e introduciendo una metodología que está cada vez más extendida en el mundo.





A diferencia de otras Guías de drenaje urbano sostenible publicadas en los últimos años por los Ayuntamientos de Madrid [2018], Castelló de la Plana [2019], Barcelona [2020] y València [2021], el ámbito de aplicación de estas recomendaciones de criterios de diseño de SUDS sobrepasa el municipal, con el objetivo de ser un documento de referencia y consulta para todo el territorio de Navarra. Las recomendaciones de este documento van asociadas al desarrollo urbano y rural, tanto público como privado, en la región de Navarra, para el fomento de la gestión de la escorrentía urbana de manera sostenible, bien como una actuación en zonas de nuevo desarrollo, bien como apoyo en otras zonas donde se busque mitigar la presión sobre la red de drenaje existente y el medio receptor. Es especialmente necesaria su aplicación en actuaciones de regeneración urbana, para no seguir perdiendo oportunidades de incrementar la resiliencia de nuestros pueblos y ciudades.

El documento va dirigido tanto a responsables políticos, para que valoren este tipo de soluciones y propicien el contexto normativo y marco regulatorio adecuado para promover su utilización; como a profesionales del sector, para que incorporen Soluciones de Drenaje Sostenible en sus proyectos; así como al público general y cualquier interesado en conocer un poco más acerca de los beneficios de la aplicación de SUDS, para apreciar su valor y que los SUDS sean una demanda ciudadana.

Las Recomendaciones contienen una introducción al drenaje sostenible con el empleo de Soluciones basadas en la Naturaleza [SbN], donde se explica la filosofía de los SUDS y la importancia de contar con un tren de tratamiento, y resume el desarrollo de estos sistemas en España, antes de pasar a describir los diferentes tipos de SUDS, tanto estructurales (aljibes, cubiertas vegetadas, pavimentos permeables, alcorques estructurales, parterres inundables, zanjas y pozos de infiltración, depósitos reticulares, drenes filtrantes, franjas filtrantes, cunetas vegetadas, balsas de detención e/o infiltración, humedales artificiales y estanques] como no estructurales (normativa, medidas educativas, mantenimiento, coordinación, etc.).

Se incluyen ideas sobre actividades de difusión y concienciación social, conducentes a mejorar la comprensión de las personas en cómo la escorrentía de sus edificios, barrios y ciudades puede ser gestionada y aprovechada.

Tras estas descripciones, se presenta la propuesta de los parámetros pluviométricos a emplear en el diseño de SUDS en Navarra, en base a la parametrización de la pluviometría para el diseño de SUDS realizada a través de una colaboración con la Universidad Pública de Navarra (UPNA). Fruto de dicha colaboración se han establecido tanto los valores de diseño para eventos extremos, como los basados en percentiles volumétricos, más particulares del diseño de SUDS. Tras la realización de un análisis clúster y de reagrupamiento de estaciones, se tomó la decisión de proceder a un análisis multirregional, para agrupar las series pluviométricas en 4 regiones, tomando posteriormente una de ellas como estación pluviométrica representativa de las características climáticas de la zona [Figura 40]. Así, las cuatro regiones, y su respectiva estación representativa, son:

-  Región 1, correspondiente a la zona sur. Estación representativa: Tudela.
-  Región 2, correspondiente a la zona media-sur. Estación representativa: Pamplona.
-  Región 3, correspondiente a la zona media-norte. Estación representativa: Oskotz.
-  Región 4, correspondiente a la zona norte. Estación representativa: Gorramendi.

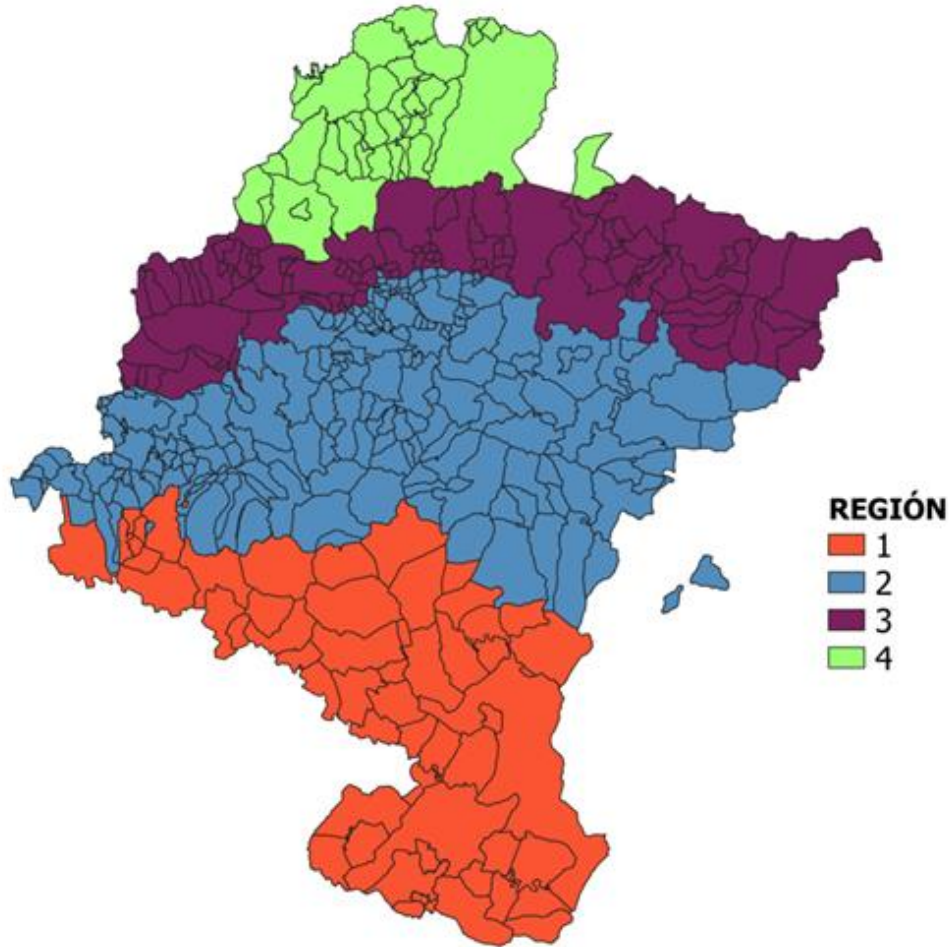


Figura 40 Distribución de las series pluviométricas por regiones.

A continuación, se presentan las recomendaciones de criterios de diseño para la implementación del drenaje sostenible en diferentes ámbitos (urbanización densa, edificación abierta, casas unifamiliares, áreas industriales, centros comerciales y sector terciario, red viaria, aparcamientos y parques.), tanto en nuevos desarrollos como en actuaciones de regeneración urbana.

Las recomendaciones también destacan la importancia del mantenimiento y monitorización de los SUDS, ya que es un factor clave para su correcto y continuo funcionamiento de los SUDS a lo largo de su ciclo de vida, así como para seguir mejorando los sistemas. Para terminar, se presenta el prototipo de SUDS construido en el aparcamiento de las instalaciones de la UPNA en Tudela, así como los primeros resultados de su monitorización.

A lo largo de todo el documento, se introducen referencias a otras guías de diseño de SUDS de ámbito nacional e internacional, con las que profundizar acerca de diferentes aspectos de los SUDS descritos (diseño, construcción, mantenimiento, monitorización...).

Este documento debe interpretarse como un documento básico sobre SUDS con recomendaciones particularizadas para la región de Navarra. Se concibe como un punto de partida que abre el abanico de soluciones para una gestión sostenible de las aguas pluviales, aglutinando experiencias y bibliografía de referencia (incluyendo manuales técnicos de diseño y cálculo), que sirvan de apoyo a la redacción de planes y proyectos, así como a la construcción, el mantenimiento y la monitorización de los SUDS.

7. INFORME JURÍDICO

Para la posible inclusión de los SUDS en la normativa se realizó un estudio con un abogado especializado en urbanismo. El estudio lo realizó de Urban Abogados y se adjunta como anexo a este informe. Ver Anexo 3- Informe jurídico sobre adaptación de las redes de alcantarillado urbano a través de la implementación de Sistemas de Drenaje Sostenibles en áreas urbanas.

El informe hace una contextualización de la situación legislativa respecto a los drenajes sostenibles y finaliza con una propuesta de las posibles modificaciones en la legislación foral que serían necesarias para conseguir el objetivo de la implementación real de los sistemas de drenaje sostenible [Cita a continuación]:

“Propuesta de modificaciones a introducir en la normativa foral.

La legislación foral en materia de urbanismo, Texto Refundido de la Ley Foral de Ordenación del Territorio y Urbanismo (TRLFOTU), aprobada por Decreto Foral Legislativo 1/2017, de 26 de julio,

no hace referencia específicamente a los sistemas de drenaje sostenible. El art. 52 (redactado por la Ley Foral 5/2015) podía haber dado cabida a estos temas, como incluyó la eficiencia energética, la movilidad sostenible, la accesibilidad o el paisaje como determinaciones sobre desarrollo sostenible

El Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano de Navarra 2019-2030, aprobado por el Gobierno de Navarra el 8 de mayo de 2019, siendo uno de los principios del Plan es «El desarrollo del Plan promoverá la lucha contra el cambio climático y la apuesta por la economía circular en materia de aguas». El Plan se define asimismo como «...la principal herramienta de Navarra en materia de aguas para luchar contra el cambio climático y avanzar en la economía circular».

Entre los retos para el saneamiento y depuración (pág.71) ya se fija:

«Las bases de la planificación son:

- Extender el saneamiento separativo en todo el territorio.
- Conseguir que las redes de saneamiento en baja sean eficientes e incorporen el menor volumen posible de aguas limpias.

- Disminuir, por tanto, el volumen y carga de los alivios y desbordamientos del sistema de saneamiento de aguas residuales.
- Ordenar adecuadamente el sistema de pluviales, reduciendo su volumen de vertido en la medida de lo posible [por ejemplo, mediante el empleo creciente de sistemas de drenaje sostenible] y minimizando su impacto en el medio».

Y en el Plan de Actuaciones se incorpora:

«6.4.1 Acciones generales de saneamiento – Línea de acción 6 En esta línea de acción 6 se agrupan varias subacciones con sus medidas correspondientes, que no son de tipo infraestructural. Suman casi 1,5 M € en el horizonte de este Plan Director.

Las subacciones son las siguientes:

- Drenaje urbano sostenible.
- Saneamiento en alta de polígonos industriales.
- Gestión de riesgos de inundación.
- Contaminantes emergentes.
- Especies exóticas invasoras.

6.4.1.1 Drenaje urbano sostenible

La gran incorporación de aguas de lluvia a los sistemas de saneamiento constituye un problema de elevado alcance. Además de las líneas de actuación infraestructurales, se propone que, en el futuro, las nuevas áreas urbanizadas, tanto residenciales como industriales o dotacionales, así como las zonas que se reurbanicen, disminuyan al mínimo las áreas impermeables y apliquen técnicas SUDS [drenaje urbano sostenible] en la mayor fracción posible de la superficie. A tal efecto, se proponen estas medidas:

- Antes de fin de 2019 se publique una guía sobre aplicación de técnicas SUDS. Financiada por el programa LIFE NADAPTA, tiene un presupuesto aproximado de 30.000 €.
- Antes de fin de 2021 el Gobierno de Navarra aprobará una normativa general [preferentemente mediante Decreto Foral] en la que se regule la aplicación de técnicas SUDS en nuevas áreas urbanizadas o reurbanizaciones y que complemente y amplíe la actual regulación incluida en los Planes de Ordenación Territorial vigentes».

Por tanto, el Plan Director del Ciclo Integral del Agua aprobado en 2019 por el Gobierno de Navarra, mandata y obliga al propio Gobierno a aprobar una normativa general antes de final del presente año 2021 en que se regule la aplicación de los sistemas de drenaje urbano sostenible.

El Anteproyecto de Ley Foral de Cambio Climático y Transición Energética [versión 26(01/2021)], norma en la que puede tener perfecta acogida los SUDS como forma de mitigar el cambio climático, dedica un artículo a la adaptación al cambio climático del ciclo integral del agua [art.48], en el que se indica que la planificación hidrológica deberá ir encaminándose a incorporar el cambio climático, y para ello deberá tener en cuenta, al menos, « c) Identificar y promover prácticas de adaptación sostenibles que persiguen objetivos múltiples en materia de uso y gestión del agua,...».

El art.47 se refiere a la adaptación al cambio climático en el medio urbano. Este apunta la obligación de establecer criterios para integra la adaptación al cambio climático en los instrumentos de ordenación territorial, en los planes generales municipales y en el planeamiento de desarrollo.

Este nuevo artículo 48 ha sido introducido en base a la propuesta efectuada en el “Informe Jurídico sobre el Borrador de Anteproyecto de Ley Foral de cambio climático y transición y Proyecto de Ley de cambio climático y transición energética, aprobado por el Gobierno de España en relación con el ciclo integral de agua de uso urbano y residuos” [junio 2020], encargado por NILSA y redactado por el firmante del actual Informe. La redacción que se proponía de un nuevo artículo era más amplia y ambiciosa e incluía expresamente el «fomento de los drenajes urbanos sostenibles como mejora de la gestión de pluviales y de la red de saneamiento en baja»²⁰.

En el texto definitivo de la Ley Foral de Cambio Climático, art. 48.5, se podía incluir, con el mismo texto del art. 123 ter.7 RDPH, la obligación de fomentar en los nuevos desarrollos urbanísticos y en las actuaciones de reforma o renovación de la urbanización la introducción de los sistemas de drenaje sostenible

«a) Las actuaciones de nueva urbanización en suelo urbanizable y las de reforma o renovación de la urbanización en suelo urbano, deberán introducir sistemas de drenaje sostenible, tales como superficies y acabados permeables, de forma que el eventual incremento del riesgo de inundación se mitigue. A tal efecto, los instrumentos de ordenación urbanística que establezcan las determinaciones de ordenación pormenorizada en suelo urbanizable y urbano no consolidado deberán incorporar en su Memoria un estudio hidrológico-hidráulico que justifique la introducción de los referidos sistemas.

b) Los Proyectos de Urbanización, y los proyectos de obras ordinarias en suelo urbano consolidado previstos en la legislación foral de ordenación del territorio y urbanismo, que llevan a la práctica el planeamiento, contendrán las determinaciones necesarias para dar cumplimiento a la introducción de los sistemas de drenaje sostenible.

c) Los criterios orientativos sobre sistemas de drenaje urbano sostenible, como parte de las directrices para la ejecución de las obras de urbanización, se incorporan a las Instrucciones Técnicas de Planeamiento a elaborar por el Departamento competente en materia de ordenación del territorio y urbanismo».

Este texto, también podría incorporarse como nuevo número 6 del artículo 52 del vigente TRLFOTU, mediante una Deposición Adicional Duodécima en la Ley Foral de Cambio Climático y Transición Energética. El artículo 83 TRLFOTU regula las Instrucciones Técnicas de Planeamiento, documento que, al modo de los citadas para las Obras Hidráulicas en Galicia, debería elaborarse a la mayor brevedad tras la aprobación, en su caso de la modificación legislativa, para posibilitar una efectiva introducción práctica de los SDUS en Navarra. Pero en todo caso, a mi juicio, el artículo 123 ter 7 del RDPH ampara y justifica la exigencia en los instrumentos de ordenación urbanística territorial [PSIS] y urbanística de desarrollo [Plan Parcial, Plan Especial y PEAU] que establecen la ordenación pormenorizada en los nuevos desarrollos urbanísticos [suelo urbanizable] y en la renovación y reforma de la urbanización en suelo urbano, de la introducción de sistemas de drenaje sostenible, y su justificación.”

8. CONCLUSIONES

La instalación de un Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible [SUDS] en el aparcamiento del Campus de Tudela de la Universidad Pública de Navarra [UPNA] ha permitido comprobar la eficiencia y simplicidad de estos sistemas, permitiendo una importante reducción, tanto del volumen de escorrentía aportado a la red de colectores de la localidad, como de su contaminación.

Los resultados obtenidos han permitido, además, validar el sistema de diseño de la instalación, y obtener unos resultados a través de su monitorización, que permitirán su modelización y una optimización para futuros diseños.

La instalación, además, ha servido de apoyo para la redacción de una Guía de Criterios de Diseño de SUDS en Navarra, que servirá para facilitar el diseño y la construcción de estos sistemas a las Entidades Locales que los incluyan entre sus objetivos de mejora, tanto económica como medioambiental.

Desde el inicio de su funcionamiento, la instalación ha recibido numerosas visitas, que han permitido su replicación en otros puntos de la geografía de la Comunidad Foral de Navarra. Además, ha suscitado gran interés y desde los ayuntamientos de Urdazubi/Urdaix, Cascante y Cintruéñigo se ha pedido asesoramiento a Nilsa en la implantación de SUDS para evitar problemas de inundaciones derivados de las pluviales.

9. REFERENCIAS

Ajuntament de Barcelona. Guia Tècnica per Al Disseny de Sistemes Urbans de Drenatge Sostenible [SUDS]. 2020. Accesible online: https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/sites/default/files/PlecPrescripcionsTecniquesDrenatge_Guia.pdf [acceso 19 Diciembre 2021].

Andrés-Doménech, I., Anta, J., Perales-Momparler, S., Rodríguez-Hernandez, J., [2021]. Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis. Sustainability 2021, 13, 2791. <https://doi.org/10.3390/su13052791>

Ayuntamiento de Castelló de la Plana. Guía Básica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible Para El Término Municipal de Castelló de la Plana. 2019. Accesible online: http://www.castello.es/archivos/1466/Guia_Sistemas_Drenaje_Sostenible.pdf [acceso 19 Diciembre 2021].

Ayuntamiento de Madrid. Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión de Pluviales en Zonas Verdes Y Otros Espacios Libres. 2018. Accesible online: [https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Agua/TODOSOBREAGUA\(InformaciónSobreAgua\)/SistemaUrbanosDrenajeSostenible/Guíabásicadedise~nosistemasdegestiónsostenibledeaguaspluviales.pdf](https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Agua/TODOSOBREAGUA(InformaciónSobreAgua)/SistemaUrbanosDrenajeSostenible/Guíabásicadedise~nosistemasdegestiónsostenibledeaguaspluviales.pdf) [acceso 19 Diciembre 2021].

Ayuntamiento de València. Guía básica para el diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València [2021] Accesible online: https://www.ciclointegraldelagua.com/files/normativa/Guia_Basica_para_el_Diseño_de_Sistemas_Urbanos_de_Drenaje_Sostenible_en_la_Ciudad_de_Valencia_V01.pdf [acceso 19 Diciembre 2021].

Gavrić, S., Leonhardt, G., Österlund, H., Marsalek, J., Viklander, M., [2021] Metal enrichment of soils in three urban drainage grass swales used for seasonal snow storage. Science of The Total Environment, 760: 144136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144136>.

Guo, Q., [1997] Sediment and heavy metal accumulation in dry storm water detention basin: Journal of Water Resources Planning and Management, v. 123, no. 5, p. 295–301.

López, J.J. y Goñi, M., [2020] Caracterización de los parámetros de las lluvias de diseño para SUDS en Navarra. Informe no publicado. NILSA [Gobierno de Navarra].

Sansalone, J.J., Buchberger, S.G., [1997a]. Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater. Water Sci. Technol. 36, 15



Teodoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Kovacs, Y., Gromaire, M.-C., [2016] Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: a literature review *Sci. Total Environ.*, 569-570, pp. 904-926

Wigington, Jr. P.J., Randall, C.W., Grizzard, T.J., [1983] Accumulation of Selected Trace Metals in Soils of Urban Runoff Detention Basins1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 19[5]: 709-718. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1983.tb02793.x>.