



# INFORME DEL PROYECTO REF. SV-23-GIJON-1-10

Análisis de la resiliencia hidrológica de infraestructura verde urbana bajo escenarios futuros de cambio climático en la ciudad de Gijón (ARHIVU)

---

## **Fechas inicial y final del proyecto:**

01 / 09 / 2023 al 30 / 12 / 2023

## **Investigador/a Principal:**

Luis Ángel Sañudo Fontaneda

## **Otros investigadores:**

Cristina Allende Prieto y Jorge Rocés García

## **Personal contratado:**

Valeria Guerbartchouk Pérez

## **Fechas inicial y final de contratación:**

01 / 09 / 2023 al 30 / 12 / 2023

## **Empresas o instituciones colaboradoras:**

Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A. y EXCADE S.L.

## **Redes sociales de investigadores y empresas:**

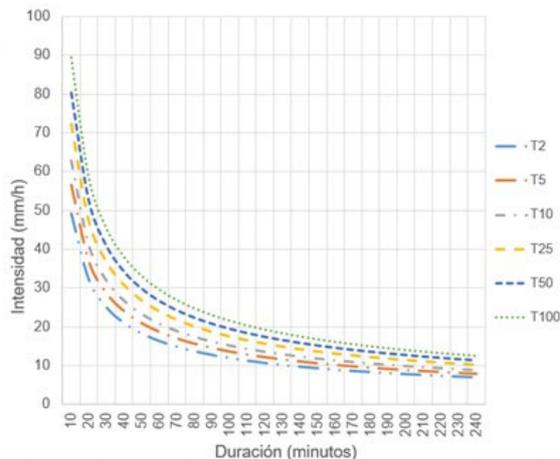
Grupo de investigación CEGE de la Universidad de Oviedo (Twitter e Instagram):

@cege\_uniovi

EMASA (Instagram): @aguagijon

EXCADE (Instagram): @excade\_sl

## Resumen Gráfico



## Memoria descriptiva del proyecto

### 1. Resumen ejecutivo

Los problemas asociados a la gestión de las aguas pluviales representan una de las mayores causas de pérdidas de vidas humanas y daños económicos en las ciudades. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) proyectó un incremento de los episodios de inundaciones pluviales en gran parte de Europa durante los próximos años, siendo las infraestructuras de drenaje la primera línea de defensa urbana, convirtiéndose en un campo de gran interés para la comunidad científica.

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han sido elegidos por la Unión Europea como la infraestructura verde preferencial en la mitigación de riesgos climáticos asociados con la gestión de pluviales. Gijón es un referente en el Norte de España dentro de la temática a través del proyecto de desarrollo del manual técnico de SUDS llevado a cabo por el presente equipo investigador del IUTA en colaboración con EMASA y el Ayto. de Gijón. No obstante, existe un hueco en el conocimiento sobre el desarrollo de metodologías para el análisis de las condiciones de diseño actuales y su adaptación al cambio climático. Se ha destacado la necesidad de modificar las características hidrológicas de los SUDS para gestionar los incrementos de volúmenes de las proyecciones climáticas. La modelización de las condiciones presentes y futuras es fundamental para asentar dichos cambios, requiriéndose una mejora en la precisión de los modelos hidrológicos de SUDS usando casos de estudio en ambientes urbanos.

La realización de este proyecto, el cual consta de dos fases diferenciadas, permitiría desarrollar una metodología de análisis local en Gijón para el estudio de la resiliencia hidrológica de SUDS bajo escenarios climáticos presentes y futuros. Dichas fases consisten en el análisis hidrológico de las precipitaciones de la ciudad de Gijón y las variables de diseño SUDS necesarias para su posterior modelización y construcción. En una segunda fase, se utiliza un caso de estudio para el barrio de La Camocha.



Los resultados del proyecto permiten identificar el impacto significativo de la implementación de SUDS en áreas urbanas de la ciudad de Gijón, además de proporcionar los valores de la lluvia de diseño para el tratamiento de la calidad de aguas y las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) necesarias para dimensionar las secciones transversales de las técnicas SUDS en Gijón. Este proyecto supone un apoyo decidido a la práctica profesional de ingenieros/as y arquitectos/as de empresas consultores y de la administración pública de Gijón en el diseño de estos elementos de ingeniería en los proyectos de infraestructura verde de la ciudad.

El presente proyecto se alinea, por tanto, con el Plan Estratégico de Gijón 2026 y con el Plan de Acción Local de Gijón de la Agenda Urbana de Gijón 2030, apoyando a su vez al sector estratégico del IUTA en “Sostenibilidad y Economía Circular”, con énfasis en “vigilancia ambiental y cambio climático” y “urbanismo sostenible”.

## 2. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Se presenta, a continuación, la Tabla 1 con la descripción de los objetivos principales y secundarios del proyecto, así como su correspondiente grado de consecución.

Tabla 1. *Objetivos principales y secundarios del proyecto.*

Tipo	Objetivo	Grado de consecución
Principal	Desarrollo de una metodología de análisis de la resiliencia hidrológica de infraestructura urbana de drenaje sostenible frente al cambio climático en la ciudad de Gijón, a través de la modelización del comportamiento hidrológico de SUDS bajo escenarios climáticos presentes y futuros	90 - 100%
Secundario/ Específico	Identificar los agentes participantes en el planeamiento y diseño de infraestructura de drenaje sostenible en Gijón, proponiendo los criterios e indicadores relacionados con la resiliencia hidrológica de SUDS en el Concejo	100 - 100%
Secundario/ Específico	Determinación de la información geoespacial de Gijón necesaria para la modelización hidrológica a partir de Sistemas de Información Geográfica	100 - 100%
Secundario/ Específico	Analizar los parámetros de diseño hidrológico de SUDS: lluvia de diseño para calidad de aguas, caudales de gestión de volúmenes, materiales y elementos constructivos	100 - 100%
Secundario/ Específico	Caracterizar las series de precipitaciones históricas de la ciudad de Gijón en las etapas pasada (1961-1990) y presente (1991-2020), identificando los patrones de modificación de cambio climático en las precipitaciones	100 - 100%
Secundario/ Específico	Determinar las proyecciones climáticas futuras de las precipitaciones en la ciudad de Gijón	50 - 100%
Secundario/ Específico	Aplicar metodología de análisis al caso de estudio del barrio de La Camocha, Gijón, utilizando herramientas geomáticas y de modelización del comportamiento de SUDS, proponiendo diversos escenarios de implementación de SUDS bajo condiciones presentes	90 - 100%
Secundario/ Específico	Proponer valores de cálculo futuros para el diseño hidrológico de SUDS: lluvia y caudales de diseño, y modificaciones de elementos estructurales SUDS	90 - 100%
Secundario/ Específico	Desarrollar una red internacional de grupos de investigación que desarrollen estrategias de adaptación al cambio climático mediante la implementación de SUDS	100 - 100%

Algunos de los objetivos secundarios más específicos no pudieron finalizarse al quedarse en proyecto en apenas 4 meses de duración (ver Tabla 1). Sin embargo, éstos serán completados durante los dos primeros meses del año 2024 asociados a los proyectos de investigación que han aportado apoyo económico y/o logístico al presente proyecto, y serán incorporados en el trabajo fin de grado (TFG) de la becaria de investigación del proyecto, Valeria Guerbartchouk. El TFG de Valeria es uno de los resultados académicos principales del proyecto de investigación.

### 3. Tareas realizadas:

En este apartado se muestran las tareas realizadas en cada una de las dos fases principales del proyecto, así como la duración de cada una de ellas dentro del periodo de ejecución del proyecto de investigación (Tabla 2).

Tabla 2. Fases y tareas del proyecto, incluyendo la duración de cada una de ellas.

ID	Descripción	MESES			
		1	2	3	4
<b>Fase 1</b>	<b>Inicial de caracterización de precipitaciones y desarrollo de la metodología de análisis hidrológico</b>				
Tarea 1.1	Identificación de los agentes participantes en el planeamiento y diseño de infraestructura de drenaje en Gijón				
Tarea 1.2	Propuesta de criterios e indicadores de resiliencia hidrológica de infraestructura de drenaje				
Tarea 1.3	Recopilación de información geoespacial tridimensional de la zona de estudio: Obtención de la información geoespacial derivada a partir de Sistemas de Información Geográfica; e integración de estos datos en el software de modelado hidrológico				
Tarea 1.4	Análisis de los parámetros de diseño hidrológico de SUDS: lluvia de diseño para calidad de aguas, caudales de gestión de volúmenes, materiales y elementos constructivos				
Tarea 1.5	Caracterizar las precipitaciones de la ciudad de Gijón en la etapa pasada (1961-1990)				
Tarea 1.6	Caracterizar las precipitaciones de la ciudad de Gijón en la etapa presente (1991-2020)				
Tarea 1.7	Identificación de los patrones de modificación de precipitaciones por cambio climático (1961-2020)				
Tarea 1.8	Determinación de las proyecciones climáticas futuras de las precipitaciones en la ciudad de Gijón (2020-2100)				

<b>Fase 2</b>	<b>Aplicación en caso real: Barrio de La Camocha, Gijón</b>				
Tarea 2.1	Aplicación de la metodología al caso de estudio del barrio de La Camocha, Gijón, utilizando herramientas geomáticas y proponiendo diversos escenarios de implementación de SUDS bajo condiciones presentes y futuras de precipitaciones				
Tarea 2.2	Propuesta de valores de diseño futuros para SUDS, así como potenciales modificaciones de elementos estructurales para aumentar su resiliencia al cambio climático				

- **Fase 1:** Inicial de caracterización de precipitaciones y desarrollo de la metodología de análisis hidrológico. Durante esta fase se recabaron los datos meteorológicos asociados con las precipitaciones en la ciudad de Gijón y se hizo su análisis en clave hidrológica asociada con las variables de diseño de un SUDS.
  - **Tarea 1.1:** Identificación de los agentes participantes en el planeamiento y diseño de infraestructura de drenaje en Gijón. Se estudiaron los principales agentes asociados con los elementos de drenaje en la ciudad de Gijón, así como aquellos que pudieran estar relacionados con los SUDS, los cuales al tratarse de infraestructura verde multifuncional pueden depender de varios departamentos dentro del mismo Concejo, además de llevar diversas empresas constructoras de diferente especialización.
  - **Tarea 1.2:** Propuesta de criterios e indicadores de resiliencia hidrológica de infraestructura de drenaje. Estudio de la literatura científica y de las guías técnicas existentes sobre el diseño hidrológico de drenaje del tipo SUDS, centrándose en la identificación de los criterios e indicadores que permiten analizar y cuantificar la resiliencia. Para ello, se utilizó la base de datos científica Scopus (ELSEVIER) utilizando las palabras clave asociadas con los SUDS y la resiliencia.
  - **Tarea 1.3:** Recopilación de información geoespacial tridimensional de la zona de estudio: Obtención de la información geoespacial derivada a partir de Sistemas de Información Geográfica; e integración de estos datos en el software de modelado hidrológico. Esta tarea consistió en la recolección de los principales datos asociados con la infraestructura de drenaje de la zona de estudio, así como de su topografía, permitiendo su paso al software de modelado hidrológico SWMM. Se utilizó el software QGIS para dicha labor.

- **Tarea 1.4:** Análisis de los parámetros de diseño hidrológico de SUDS: lluvia de diseño para calidad de aguas, caudales de gestión de volúmenes, materiales y elementos constructivos. Estudio de las variables de diseño hidrológico de un SUDS desarrollando los cálculos específicos de la zona de estudio. Para ello, se estudiaron las funciones de distribución de datos extremos que mejor se ajustasen a los registrados en las estaciones meteorológicas de estudio (Moccia et al., 2021), sirviéndose del análisis estadístico con el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el test Chi, el error mínimo cuadrático (ECM) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ).
- **Tarea 1.5:** Caracterizar las precipitaciones de la ciudad de Gijón en la etapa pasada (1961-1990). Estudio de las variables hidrológicas de diseño de la tarea 1.4 para el periodo específico de 1961 a 1990, siguiendo las recomendaciones metodológicas de la World Meteorological Organization (WMO) (2015). Dicho periodo es el denominado pasado, el cual será usado para comparar con el presente (época actual) y el futuro, obtenido a través de las proyecciones climatológicas. Todas las series temporales deberán de tener, al menos, 30 años de duración.
- **Tarea 1.6:** Caracterizar las precipitaciones de la ciudad de Gijón en la etapa presente (1991-2020). El siguiente paso viene marcado por el siguiente periodo de tiempo recomendado por la WMO y correspondiente con la época actual.
- **Tarea 1.7:** Identificación de los patrones de modificación de precipitaciones por cambio climático (1961-2020). En esta tarea se examinaron las principales variables y sus posibles modificaciones influyendo en el diseño de los SUDS hasta la época actual según la WMO.
- **Tarea 1.8:** Determinación de las proyecciones climáticas futuras de las precipitaciones en la ciudad de Gijón (2020-2100). Identificación de los principales modelos climáticos asociados con el área geográfica de estudio y de las principales técnicas de regionalización en la desescalada espacial desde un ámbito prácticamente continental a uno regional y local. Posteriormente, se desarrollarán los cálculos que permitan obtener los valores de diseño hidrológico para la época futura hasta el año 2100 divididos en tres etapas temporales de 30 años cada una.
- **Fase 2:** Durante esta fase se recabaron los datos meteorológicos asociados con las precipitaciones en la ciudad de Gijón y se hizo su análisis en clave hidrológica asociada con las variables de diseño de un SUDS. Se diseñará el modelo de drenaje de La Camocha en SWMM, a partir de los datos geospaciales previamente tratados, aplicando diferentes escenarios de implementación de SUDS como sigue, así como la utilización del modelo de onda dinámica recomendado por Rosa et al. (2015) para la modelización de SUDS en cuencas urbanas, y el modelo de infiltración Green-Ampt utilizado en Sañudo-Fontaneda et al. (2018): Escenario 0 (control): situación actual sin SUDS; Escenario 1: 10% del área drenada de la zona de estudio ocupado por SUDS; Escenario 2: 25% del área drenada de la zona de estudio ocupado por SUDS.

- **Tarea 2.1:** Aplicación de la metodología al caso de estudio del barrio de La Camocha, Gijón, utilizando herramientas geomáticas y proponiendo diversos escenarios de implementación de SUDS bajo condiciones presentes y futuras de precipitaciones.
- **Tarea 2.2:** Propuesta de valores de diseño futuros para SUDS, así como potenciales modificaciones de elementos estructurales para aumentar su resiliencia al cambio climático.

#### 4. Resultados obtenidos:

Los principales resultados obtenidos en el proyecto se presentan a continuación, destacando el cálculo de una lluvia de diseño de SUDS para el Concejo de Gijón.

- Se ha determinado la altura de la lluvia de diseño para la calidad de aguas de los SUDS en el Concejo de Gijón, aportando los valores en mm en función de los percentiles asociados con las probabilidades de no ocurrencia de un evento de tal magnitud. Los valores fueron determinados utilizando 3 periodos de tiempo de 30 años de datos de precipitaciones: época pasada (1973-2002), representando el periodo básico de comparación de los posteriores; época actual a través de dos periodos de 30 años solapados 10 años (1983-2012 y 1993-2022), que permiten analizar el patrón actual y la diferencia existente con el pasado. Dichos periodos supusieron una variación respecto de los propuestos inicialmente en la metodología, dado que la serie de precipitaciones era más robusta en esos rangos temporales (Tabla 3).

*Tabla 3. Altura (mm) de la lluvia de diseño SUDS para el Concejo de Gijón en función del periodo temporal de estudio y el percentil de distribución.*

	99 <sup>th</sup>	95 <sup>th</sup>	90 <sup>th</sup>	80 <sup>th</sup>	70 <sup>th</sup>	50 <sup>th</sup>
<b>1973-2002</b>	39	21	15	9	6	3
<b>1983-2012</b>	38	21	15	9	5	3
<b>1993-2022</b>	38	21	15	9	6	3

- Además de la determinación de los cálculos de frecuencias estadísticas extremales mostrados en la Tabla 3, se obtuvieron los valores del óptimo de la curva de distribución de la precipitación diaria máxima en mm y la probabilidad de no excedencia de dicho evento. Fruto de ello, se proponen los siguientes valores de la lluvia de diseño para el Concejo de Gijón en su vertiente de diseño para el tratamiento de la calidad de aguas mediante un elemento constructivo de infraestructura de drenaje del tipo SUDS (ver Tabla 4). En todos los periodos de estudio puede apreciarse que el valor óptimo de la curva se alcanza en el percentil 90 o ligeramente por encima (92).

*Tabla 4. Valor óptimo de la altura (mm) de la lluvia de diseño SUDS para el Concejo de Gijón en función del periodo temporal de estudio y el percentil de distribución en el que se alcanzó dicho valor óptimo.*

Gijón	1973-2002	1983-2012	1993-2022
	15 (90 <sup>th</sup> )	16 (92 <sup>nd</sup> )	15 (90 <sup>th</sup> )

- Se obtuvieron las funciones de distribución de valores extremos del tipo Gumbel, GEV y SQRT-max mediante el método de los L-momentos, llegando a los valores mostrados en la Tabla 5, los cuales permiten determinar que las funciones que ofrecen un mejor ajuste con los datos registrados en las estaciones meteorológicas del Concejo de Gijón son las SQRT-max en los dos primeros periodos temporales y GEV en el periodo de tiempo actual. Las funciones de distribución permitieron la posterior construcción matemática de las curvas IDF, las cuales son fundamentales para la determinación de los hietogramas sintéticos de diseño y las modelizaciones en software especializado.

Tabla 5. Funciones de distribución elegidas y resultados de las pruebas de la bondad de ajuste.

1973-2002	R <sup>2</sup>	NSE	ECM	Chi
<b>SQRT-max</b>	0,9252	0,9111	58,4412	0,9544
1983-2012	R <sup>2</sup>	NSE	ECM	Chi
<b>SQRT-max</b>	0,9610	0,9590	30,9739	0,9733
1993-2022	R <sup>2</sup>	NSE	ECM	Chi
<b>GEV</b>	0,9512	0,9380	14,7104	0,9999

- En el proyecto se construyeron las curvas IDF para el Concejo de Gijón (Figura 1), utilizando el periodo de tiempo actual, dada la similitud entre las series temporales de 30 años con solapes de 10 años utilizadas en el estudio. La función de distribución utilizada para su construcción fue la GEV, dado que fue la de mejor ajuste para el periodo de estudio actual (ver Tabla 5). Las curvas calculadas serán de gran apoyo para los proyectistas de SUDS en la ciudad de Gijón, permitiendo el desarrollo de los hietogramas sintéticos, especialmente para cuencas urbanas pequeñas con tiempos de concentración inferiores a las 6 horas, como es el caso de Gijón, y periodos de retorno típicos de los SUDS ente 2 y 10 años.

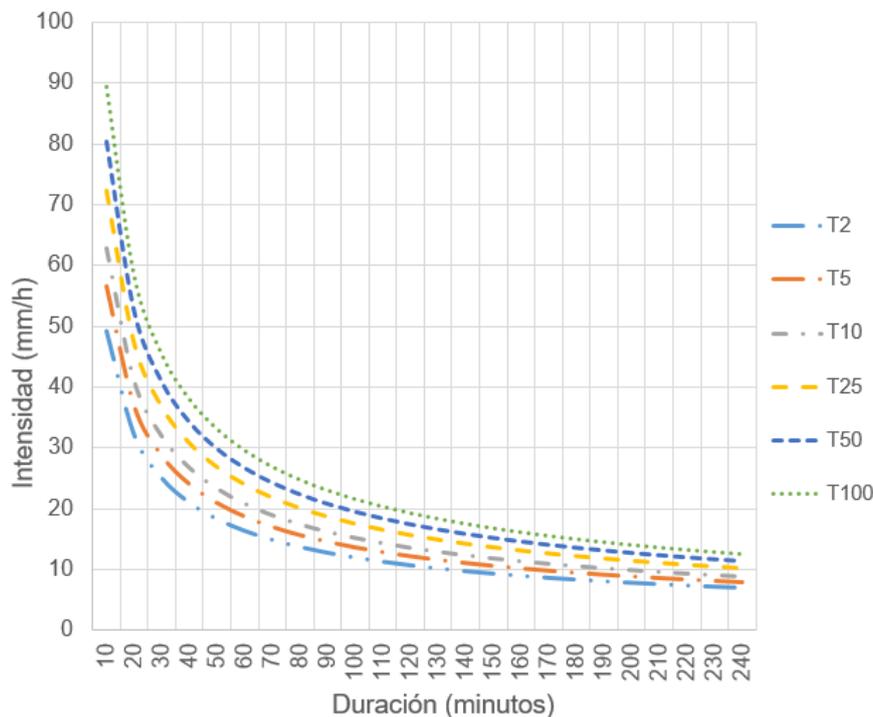


Figura 1. Curvas IDF para el Concejo de Gijón en el periodo actual 1993-2022.

- Por último, cabe destacar los resultados obtenidos en la aplicación del caso de estudio en el barrio de La Camocha, Gijón. Se llegó a la conclusión de que, dadas las circunstancias especiales del barrio en cuanto a sus características específicas locales, tanto topográficas y de zonas inundables, como geológicas e hidrológicas, los SUDS más recomendables son los parterres inundables o jardines de lluvia y los pavimentos permeables. Dichas recomendaciones se basan principalmente en el condicionante de que los SUDS serían aplicados en infraestructuras verdes asociadas con espacios públicos, descartando otras tipologías SUDS más apropiadas para su implementación en edificaciones privadas. Se desarrolló un modelo en el software US EPA SWMM en su versión 5.2 como el que se muestra en la Figura 2. Se representaron el comportamiento hidrológico de la zona de estudio incluyendo la capa atmosférica, capa del terreno, las aguas superficiales y subterráneas, y los modos de transporte.

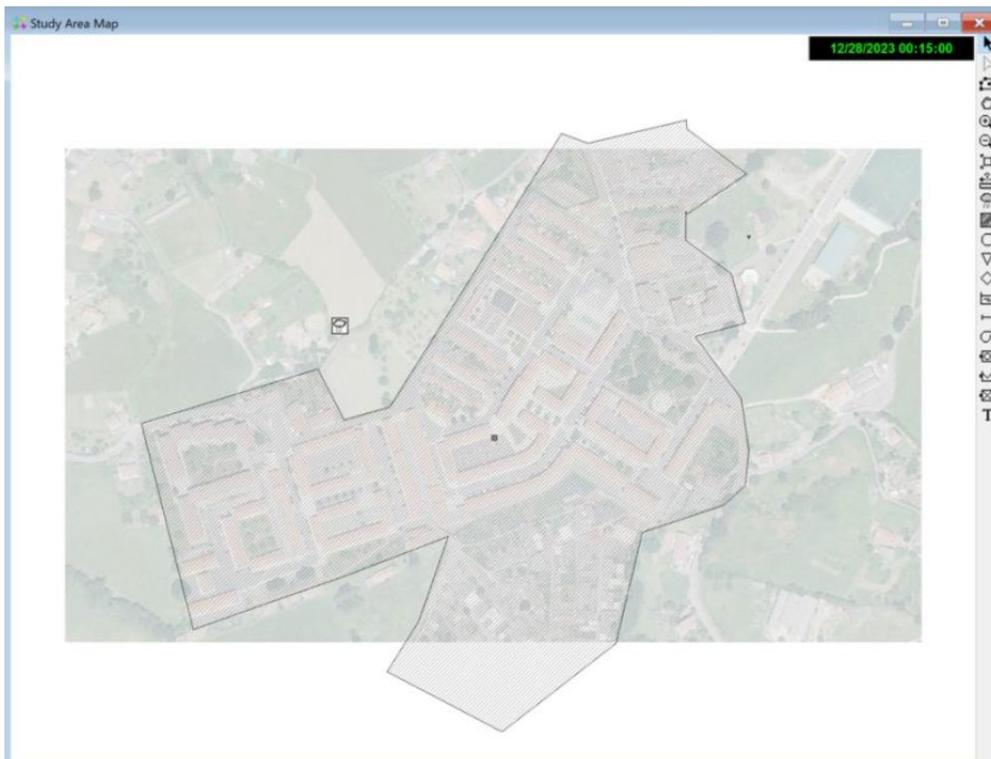


Figura 2. Esquema de la zona de estudio dentro del software SWMM.

- La aplicación del evento de diseño sintético sobre diferentes escenarios en la zona de estudio de La Camocha permitió identificar el impacto hidrológico de la implementación de las dos tipologías de SUDS seleccionadas, determinando una reducción significativa en la escorrentía superficial medida en el punto de desagüe del área de estudio. Dicha reducción se obtiene en comparación a la situación actual de toda la cuenca, demostrando que la implementación de técnicas SUDS permite lograr reducciones de hasta un 75% en los caudales de escorrentía (Tabla 6) que serían posteriormente transportados por el drenaje convencional y alcanzarían las estaciones de tratamiento de aguas. Por tanto, se podría alcanzar una reducción importante, tanto en la hidrología, como en el gasto energético de los bombeos y tratamientos.

## 5. Trabajos o necesidades futuras

El trabajo realizado en el presente proyecto ha sido extenso a pesar del poco tiempo que se ha tenido para su realización y a lo ambicioso de sus objetivos iniciales. A partir de los resultados alcanzados, los investigadores proponen las siguientes líneas de trabajo:

- Determinación de los valores futuros de diseño, los cuales no pudieron finalizarse durante el presente proyecto.
- Comparación de los escenarios futuros con los actuales.
- Estudio de otras técnicas SUDS y de diferentes escenarios.

Además, se continuará con la presente línea de trabajo mediante el desarrollo de dos proyectos de investigación detallados a continuación:

- Grupo emergente Civil, Environmental and Geomatics Engineering (CEGE) de la Universidad de Oviedo a través de la modalidad COMIENZA para la financiación de grupos de investigación. El periodo de ejecución del proyecto comienza el 5 de julio de 2023, extendiéndose hasta el 15 de mayo de 2024. I.P.: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.
- “Proyección de la Resiliencia de infraestructura Verde urbana al fallo hidrológico bajo escenarios presentes y futuros de cambio climático a través de la monitorización de campo y la modelización (PReVer)”. Proyecto de investigación asociado con la beca estancias de movilidad en el extranjero “José Castillejo” para jóvenes doctores (modalidad b) en colaboración con el Programa Fulbright de los EE. UU. Duración desde el 1 de mayo de 2024 hasta el 31 de agosto de 2024. I.P.: Luis Ángel Sañudo Fontaneda.

## 6. Divulgación de los resultados

Los resultados del proyecto serán presentados en las jornadas de proyectos del IUTA durante el año 2024, cuyas fechas aún están pendientes de concretarse. De igual manera, los resultados serán presentados como TFG de finalización de estudios de ingeniería civil por parte de Valeria, tal y como se señala en mayor detalle en la Tabla 7. Además, se espera poder enviar los resultados a congresos de la International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), la International Water Association (IWA) y/o las Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA) en España durante el año 2024, los cuales aún no tienen fecha definida de celebración.

Tabla 7. Divulgación de los resultados.

Título	Autores	PTT	Congreso	Lugar y fecha
<i>Proyecto SV-23-GIJON-1-10</i>	Valeria Guerbartchouk Pérez, Luis Á. Sañudo Fontaneda, Cristina Allende Prieto y Jorge Rocés García	Com. Oral	<i>Jornadas de Proyectos IUTA</i>	Gijón (Spain), fecha por determinar en 2024
<i>Diseño de SUDS en el barrio de La Camocha bajo escenarios de cambio climático</i>	Valeria Guerbartchouk Pérez	TFG	<i>TFG del Grado en Ingeniería Civil (mención de construcciones civiles)</i>	Mieres (España), junio-julio de 2024

## Memoria económica:

### 1. Gastos:

Se presentan, a continuación, los gastos asociados al proyecto durante las fechas de ejecución del mismo (ver Tabla 8). No se incluyen gastos derivados de ponencias en congresos y conferencias debido a que los congresos tendrán lugar en fechas posteriores a la ejecución del proyecto.

Tabla 8. Gastos asociados al proyecto.

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	4.750 €
Fungibles	200 €
Amortización	550 €
Datos de precipitaciones (cedidos al proyecto)	0 €
Otros (Desplazamientos, Inscripciones a Congresos, etc.)	0 €
<b>TOTAL GASTOS</b>	<b>5.500 €</b>

### 2. Ingresos:

Los ingresos finales que han permitido y apoyado el desarrollo del proyecto de investigación se presentan a continuación en la Tabla 9. Cabe destacar también la provisión de datos de precipitaciones a través de otro de los proyectos colaboradores.

Tabla 9. Ingresos asociados al proyecto y provisión de datos sin coste al proyecto.

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA mediante proyecto con ref. SV-23-GIJON-1-10	Ayuda IUTA: Contratación de personal	4.750 €
Empresa Municipal de Aguas de Gijón, S.A. mediante proyecto con ref. FUIO-21-226	Datos de precipitación 10-minutales de Gijón (cedidos sin repercusión económica a través del proyecto)	0 €
Universidad de Oviedo a través de financiación para grupo de investigación emergente CEGE mediante proyecto con ref. PAPI-23-GR-COM-05	Fungibles	250
Financiación propia procedente del grupo de investigación emergente CEGE	Equipos informáticos y fungibles	500 €
<b>TOTAL INGRESOS</b>		<b>5.500 €</b>

Firmado: Investigador Principal