

### III. OTRAS DISPOSICIONES

## MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**1943** *Resolución de 21 de enero de 2025, de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, O.A., por la que se publica la Adenda por la que se prorroga y modifica el Convenio con la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, para el Proyecto «Guadalquivir 4.0: Herramientas para un Gemelo Digital de la cuenca con especial atención a Doñana».*

De acuerdo con lo dispuesto en el artículo 48.8 de la Ley 40/2015, de 1 de octubre, de Régimen Jurídico del Sector Público, procede la publicación en el «Boletín Oficial del Estado» de la «Adenda mediante la que se acuerda prorrogar y modificar el convenio suscrito el 24 de febrero de 2023 entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, O.A. y la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, para el Proyecto “Guadalquivir 4.0: Herramientas para un Gemelo Digital de la cuenca con especial atención a Doñana”», otorgado el 19 de diciembre de 2024, que se anexa a esta resolución.

Sevilla, 21 de enero de 2025.—El Presidente de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, O.A., Joaquín Páez Landa.

#### ANEXO

**Adenda mediante la que se acuerda prorrogar y modificar el convenio suscrito el 24 de febrero de 2023 entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, O.A. y la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, para el Proyecto «Guadalquivir 4.0: Herramientas para un Gemelo Digital de la cuenca con especial atención a Doñana»**

En Sevilla, a fecha de firma electrónica.

#### REUNIDOS

De una parte, don Joaquín Páez Landa, Presidente de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Organismo Autónomo adscrito al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, nombrado por resolución de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente de 31 de julio de 2018, en el ejercicio de las competencias que le atribuye el artículo 48.2 de la ley 40/2015, de 1 de octubre, de Régimen Jurídico del Sector Público.

Y de otra parte, la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, en lo sucesivo FIUS, constituida en Sevilla, el 8 de enero de 2002, con CIF número G-91.402.941, domicilio social en Sevilla, Avenida de Reina Mercedes, 4C, Planta 1, C.P. 41012, e inscrita en el Registro de Fundaciones de Andalucía, Sección Primera, número SE-1059 y, en su nombre y representación, don Manuel Felipe Rosa Iglesias, en calidad de Director General de la misma, en virtud de poder otorgado ante el notario de Sevilla, don José Luis Lledó González, en fecha 30 de marzo de 2021, con número 501 de su protocolo.

Ambas partes se reconocen mutuamente, en la calidad en que cada uno interviene, con la capacidad legal necesaria para suscribir la presente adenda de prórroga y modificación del Convenio suscrito con fecha 24 de febrero de 2023 y a tal efecto

## EXPONEN

Primero.

Que con fecha 24 de febrero de 2023, se firmó el Convenio entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, O.A. y la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, para el Proyecto «Guadalquivir 4.0: Herramientas para un Gemelo Digital de la cuenca con especial atención a Doñana».

Segundo.

Que de acuerdo con lo estipulado en la cláusula octava del convenio, y reunida la Comisión de Seguimiento prevista en la cláusula sexta, se ha consensado por ambas partes en primer lugar, la prórroga del convenio por un periodo adicional al inicialmente pactado de dos años y en segundo lugar, modificar el anexo I de Descripción de los trabajos.

Por cuanto antecede, las partes, de conformidad con el artículo 49.g) de la Ley 40/2015, de 1 de octubre, de Régimen Jurídico del Sector Público, en relación con lo dispuesto en la cláusula octava del convenio, acuerdan por unanimidad la modificación del contenido del convenio, mediante la suscripción de la presente adenda, de conformidad con las siguientes

## CLÁUSULAS

Primera.

El objeto de la presente adenda es la prórroga y modificación del Convenio de fecha 24 de febrero de 2023 suscrito entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (O.A.) y la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, para el proyecto Guadalquivir 4.0: Herramientas para un Gemelo Digital de la cuenca con especial atención a Doñana, consistente en la ampliación de la duración inicial del mismo por un periodo adicional de dos años y la modificación del anexo I: Descripción de los trabajos que se detallan a continuación y la cláusula cuarta.

Segunda.

Se modifican los apartados 4 (Plan de trabajo) y 5 (Cronograma) del anexo I: Descripción de los trabajos, quedando dispuesto de la siguiente forma:

El plan de trabajo aprobado inicialmente constaba de los siguientes paquetes de trabajo:

### *Paquete de Trabajo 1 (PT1). Gestión del Proyecto*

Consta de dos tareas:

- T1.1 Gestión y Coordinación del Proyecto.
- T2.1 Difusión y Explotación de resultados.

*Paquete de Trabajo 2 (PT2). Datos para construir, validar, actualizar y mejorar un SWAT de la cuenca de la cuenca del Guadalquivir*

Consta de cuatro tareas:

- T2.1 Investigación de los datos necesarios.
- T2.2 Estudio de los datos y modelos disponibles.
- T2.3 Investigación de despliegue de nuevas estaciones de medida para la captación de datos no disponibles.
- T2.4 Investigación en técnicas de *Machine Learning* para modelado de alto nivel con los datos existentes.

*Paquete de Trabajo 3 (PT3). Definición de metodologías y protocolos para la adquisición, recogida, almacenamiento y tratamiento de los datos*

Cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales y siguiendo los criterios orientados a una gestión FAIR de los datos.

Consta de tres tareas:

- T3.1 Investigación de las metodologías y protocolos para la captación, transmisión y recogida de datos.
- T3.2 Investigación de las metodologías y protocolos para el almacenamiento, procesamiento y visualización de datos.
- T3.3 Investigación de integración con bases de datos nacionales e internacionales y terceros, Políticas de acceso e intercambio de datos.

*Paquete de Trabajo 4 (PT4). Necesidades de recogida, almacenamiento y visualización de datos*

Consta de tres tareas:

- T4.1 Investigación de las necesidades HW y SW y de infraestructura TIC para la recogida, almacenamiento y visualización de datos.
- T4.2 Estudio de las capacidades existentes en el centro de información de la CHG.
- T4.3 Propuesta de mejora y actualización de las capacidades existentes en el CHG.

*Paquete de Trabajo 5 (PT5). Arquitectura de un sistema de simulación*

Consta de cuatro tareas:

- T5.1 Investigación en una arquitectura que permita simular y combinar las simulaciones de los modelos existentes.
- T5.2 Investigación en técnicas de *Machine Learning* para modelar la evolución de sectores concretos.
- T5.3 Propuesta de arquitectura de simulación del SWAT.
- T5.4 Servicios de apoyo al proceso de toma de decisiones basados en algoritmos de Inteligencia Artificial.

El cronograma ampliado extenderá la duración del PT1 del mes M24 al mes M48, puesto que el proyecto se extiende veinticuatro meses con la prórroga y con ello la gestión del mismo y las tareas de difusión de resultados.

El PT2 se alargará desde el mes M16 al mes M24, puesto que se van a considerar más fuentes de datos gracias a los resultados que se han obtenido en la primera anualidad de ejecución del proyecto. Por el mismo motivo el PT3 se va a extender del mes M16 al mes M20.

El PT4 se va a extender del mes M24 al mes M30, puesto que se han obtenido muy buenos resultados con tecnologías que inicialmente no estaban previstas, como satélites o imágenes de video.

Por último, el PT5 se extiende desde el mes M24 al mes M48, puesto que el número de casos de uso se ha ampliado (T5.2 ML y T5.AI), por las necesidades identificadas por CHG y los buenos resultados obtenidos.

Los Hitos del proyecto seguirán siendo los dos originales, y se añade uno intermedio a la finalización de las dos primeras anualidades (M24). El hito final se desplaza hasta el mes M48:

Hitos:

Hito 1: Arquitectura del Sistema (M12).

Hito 2: Finalización de la investigación ML (M24).

Hito 3: Fin del proyecto (M48).

Por tanto, se propone el siguiente cronograma para la prórroga del convenio:

	M 00	M 02	M 04	M 06	M 08	M 10	M 12	M 14	M 16	M 18	M 20	M 22	M 24	M 26	M 28	M 30	M 32	M 34	M 36	M 38	M 40	M 42	M 44	M 46	M 48	
PT1. Gestión del Proyecto.	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T1.1 Gestión y Coordinación.	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T1.2 Difusión y Explotación.											█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT2. Datos para SWAT.	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T2.1 Datos necesarios SWAT.	█	█																								
T2.2 Datos disponibles.		█																								
T2.3 Nuevas esta. captadores.			█	█																						
T2.4 Investigación en ML.			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT3. Metodol., protocolos datos.					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T3.1 De capt. transm. y recog.					█																					
T3.2 De almac., proc. y visual.						█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T3.3 Integración con BDs.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT4. Nec. centro informaci. CHG.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T4.1 Necesidades infraest. TIC.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T4.2 Capacidades.											█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T4.3 Propuesta mejora y actu.												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT5. Arquitectura Sist. Sim.					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.1 Inv. Arqu. Sim.				█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.2 ML.							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.3 Arqu. Sim. SWAT.							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.4 AI.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Tercera.

De acuerdo con lo previsto en la cláusula octava del convenio, se acuerda prorrogar el convenio por un periodo adicional de dos años al inicialmente previsto.

Cuarta.

Se modifica la financiación del convenio y, por consiguiente, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir aportará una cantidad económica para completar la aportación al proyecto. Dicha aportación cubrirá parte del desarrollo de los equipos (desarrollo HW, desarrollo SW y desarrollo de algoritmos) y los materiales necesarios para construir los equipos que quedarán en posesión de la Confederación para la demostración piloto del proyecto.

El importe total de las actividades de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir se estima en 200.000 euros (impuestos no incluidos), distribuidos en partidas proporcionales a los años de vigencia del presente convenio, con cargo a la aplicación presupuestaria 23.105.452A.227.06 y en concreto con las siguientes anualidades:

2025: 100.000 euros (más 21.000 euros en concepto de IVA).

2026: 100.000 euros (más 21.000 euros en concepto de IVA).

El importe total de las actividades de la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, sin contar con la aportación económica de CHG se estima en:

2025: 32.000 euros.

2026: 32.000 euros.

	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir	Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla - Euros
Año 2025.	100.000 € (más 21.000 € de IVA)	32.000
Año 2026.	100.000 € (más 21.000 € de IVA)	32.000
Total.	242.000 €	64.000

Puesto que el convenio se prorroga en las mismas condiciones, las cuantías económicas se ven duplicadas con respecto a las que figuran en el convenio. En la siguiente tabla se muestra el nuevo presupuesto, incluyendo las dos nuevas anualidades:

	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir	Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla - Euros
Dos primeras anualidades.	200.000 € + 42.000 € de IVA	64.000
Dos nuevas anualidades incluidas en la prórroga.	200.000 € + 42.000 € de IVA	64.000
Total por entidad.	400.000 € + 84.000 € de IVA	128.000

Respecto a los hitos de pago de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para las dos anualidades incluidas en la prórroga se mantienen las mismas condiciones que para las dos anualidades originales, es decir, un presupuesto total de 200.000 euros (más 42.000 euros de IVA) para las dos nuevas anualidades incluidas en la prórroga, distribuidas de la siguiente forma:

- 50.000 euros más 10.500 euros de IVA al inicio de la prórroga (mes M25 de la entrada en vigor de la prórroga del convenio en marzo 2025).
- 50.000 euros más 10.500 euros de IVA al mes 6 de la primera anualidad de la prórroga (mes M30 en septiembre de 2025).
- 50.000 euros más 10.500 euros de IVA al inicio de la segunda anualidad de la prórroga (mes M36 en marzo de 2026).

- 25.000 euros más 5.250 euros de IVA al mes 6 de la segunda anualidad de la prórroga (mes M42 en septiembre de 2026).
- 25.000 euros más 5.250 euros de IVA a finalización de la prórroga del proyecto (mes M48 en febrero de 2027).

De esta forma, el presupuesto total de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, incluyendo la prórroga alcanzará los 400.000 euros más 84.000 euros de IVA.

La Universidad de Sevilla también duplicará su presupuesto, en horas de investigadores, equipamiento y horas de personal técnico pasando de 64.000 euros a un total de 128.000 euros, incluyendo las dos anualidades de la prórroga. La universidad de Sevilla contribuirá a lo largo de cada anualidad de la prórroga de forma proporcional a su presupuesto:

- 32.000 euros durante la primera anualidad de la prórroga. Meses marzo 2025 (M25) a febrero de 2026 (M36).
- 32.000 euros durante la segunda anualidad de la prórroga. Meses marzo 2026 (M37) a febrero de 2027 (M48).

Quinta.

En todo lo no previsto ni expresamente modificado en la presente adenda, seguirá en vigor y será de aplicación el convenio suscrito por las partes con fecha 23 de febrero de 2023.

Sexta.

La presente adenda resultará eficaz una vez inscrita en el Registro Electrónico Estatal de Órganos e Instrumentos de Cooperación del Sector Público Estatal de conformidad con lo dispuesto en el artículo 48.8 de la Ley 40/2015, de 1 de octubre. Asimismo, será publicada en el «Boletín Oficial del Estado».

En prueba de conformidad se firma digitalmente.–Por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, O.A., Joaquín Páez Landa.–Por la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla, Manuel Felipe Rosa Iglesias.

## ANEXO I

### Descripción de los trabajos

A continuación, se describe en detalle la metodología y plan de trabajo que se seguirá para la realización del sistema electrónico descrito anteriormente para la ejecución del Proyecto Guadalquivir 4.0: Herramientas para un Gemelo Digital de la cuenca con especial atención a Doñana.

Plan de trabajo:

#### 1. Introducción

Un gemelo digital no es más que una representación digital del mundo físico que combina datos, modelos y visualizaciones que permiten profundizar en el conocimiento del mismo, con el objeto de ayudar en el proceso toma de decisiones. La calidad del modelo digital se puede evaluar en función de diferentes características: completitud, resolución, precisión, oportunidad y fiabilidad.

Desde la aparición de las tecnologías digitales, éstas han sido empleadas para ganar un mejor conocimiento del mundo real y ayudar en la toma de acciones. Así, por ejemplo, los ingenieros hacen un modelo de un motor eléctrico para entender mejor su funcionamiento, caracterizar sus parámetros de operación y determinar la necesidad de mantenimiento o sustitución.

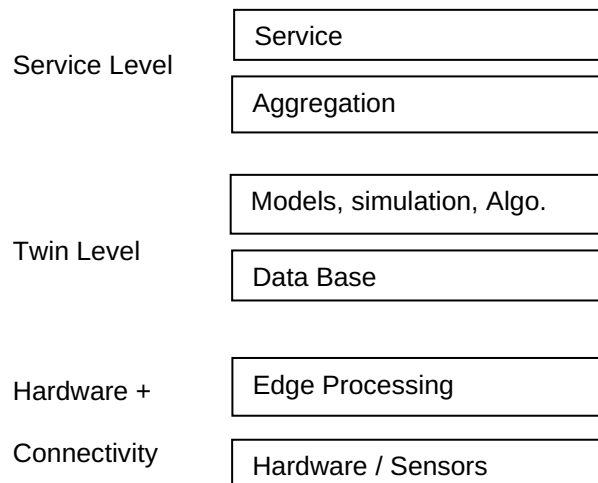
El concepto de modelo digital lo introdujeron los técnicos de la NASA Michael Grieves y John Vickers (director de tecnología) en una charla en la Universidad de Michigan relativa al ciclo de vida de un producto, donde se mencionó la posibilidad de crear representaciones digitales de sistemas físicos que tuvieran entidad por sí mismas; esa información digital sería un «gemelo» vinculado al sistema físico durante todo su ciclo de vida.

El concepto de modelo digital ha ganado gran popularidad en la Industria 4.0 impulsado por el desarrollo de las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) y de la Internet de las Cosas (IoT) que, de manera conjunta, recién el nombre actual de Artificial IoT (AIoT). Como ejemplo, General Electric tiene en su planta de Minden (Nevada) más de 800.000 gemelos digitales para monitorizar la cadena de suministro. Los gemelos digitales no son representaciones estáticas de un mundo físico cambiante, sino que evolucionan con ellos, dado que tienen la posibilidad de monitorizar sus cambios (mediante un conjunto de sensores, y ahí tiene un papel importante la IoT) y adaptarse de forma dinámica a los mismos (empleando técnicas de *Machine Learning*, y ahí tiene un papel importante la Inteligencia Artificial).

Los modelos digitales han saltado de la industria a otros sectores administrativos y económicos. Como ejemplo la ciudad de Singapur ha construido una copia digital de la ciudad, combinando datos estáticos de edificios e infraestructuras con información en tiempo real del uso de las mismas, del movimiento de tráfico, y de personas, así como de nacimientos, fallecimientos y enfermedades. Con ello proporciona una visualización 3D de la ciudad, que facilita la comprensión de la situación y permite explorar situaciones futuras, ayudando en la toma de decisiones a diseñadores, planificadores y gestores de la ciudad-estado.

El objetivo final es el de proporcionar servicios de soporte a la toma de decisiones a partir de las posibilidades de simulación que ofrece un gemelo digital:

Figura 1. Arquitectura de un gemelo digital para la provisión de servicios



En cuanto a la gestión de cuencas, en marzo de 2019, el Centro Tecnológico Nacional para tecnologías Avanzadas de Fabricación de la Universidad de San Petersburgo Pedro el Grande anunció un gran proyecto federal para el desarrollo de un gemelo digital de la cuenca Obi-Ortisch, que con sus 5410 km puede considerarse el séptimo río más largo del mundo, siendo la tercera mundial en cuanto a tamaño de cuenca. Este modelo ayudará a identificar los factores que afectan de manera más crítica al nivel de impacto antropogénico, encontrar soluciones a los daños acumulados en el medio ambiente y a llevar a la implementación de medidas sistemáticas para la rehabilitación de la calidad del agua.

En octubre de 2020 un estudio de Gartner reveló que, para 2023, un tercio de las compañías de tamaño medio y grande que han implementado la IoT tendrán

implementado, al menos, un gemelo digital. El mismo porcentaje tendrán igualmente implementada la AIoT.

Son muchas las expectativas que se han creado con la utilización conjunta de las tecnologías de AIoT y de modelado digital, y en especial en el sector de la gestión integral del agua.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Gemelo Digital.

Los gemelos digitales son, en realidad, plataformas multimodelos. En el sector del agua un gemelo digital podría incluir tres submodelos:

– Modelos de Activos. Son típicamente modelos CAD 3D especialmente relacionados a un sistema de información geográfica (GIS), donde se registran los activos físicos y las infraestructuras, y que son utilizados para configurar y limitar los modelos de procesos de Agua.

– Modelos de Procesos de Agua. Estos son modelos basados en procesos físicos o dirigidos por datos que son impulsados por medidas externas (tales como medidas de las cargas del sistema, predicciones meteorológicas, etc.) y forzados a cumplir un conjunto de condiciones de contorno. Este tipo de modelos se construyen con herramientas como HEC-RAS, IBER o SWAT.

– Modelos de Prestaciones. Son modelos que, a partir de los resultados de los modelos de proceso generan puntos de referencia y métrica que sirven como entradas para los programas de ayuda a la toma de decisiones.

A su vez los modelos se basan en tres componentes básicos:

– Visualización, que proporcionan la capacidad de representación digital, a través de tablas y gráficos, representaciones 3D, incluso en realidad virtual, de datos o resultados, en muchos casos, geolocalizados, a fin de ayudar a la comprensión del problema y de sus soluciones.

– Análisis, que permiten la comparación entre el mundo físico, los resultados procedentes de los modelos físicos de los procesos (cuando es posible) y los procedentes de la simulación, para identificar la necesidad de cambios, establecer prioridad y evaluar el impacto de la toma de decisiones.

– Simulación, que permiten interpolar o extrapolar datos acerca del mundo real, cuando los procesos físicos son demasiado complejos para poder ser resueltos de manera analítica, cuando no hay suficientes datos medidos o cuando se pretende predecir comportamientos futuros.

Y en dos componentes para su validación y actualización:

– Validación, que permite determinar la calidad de los modelos actuales, comparando comportamientos y predicciones sobre datos presentes y pasadas con los datos obtenidos en el mundo real, y que permiten ajustar el valor de los parámetros desconocidos.

– Actualización, que permiten mejorar la precisión del modelo, introducir los nuevos datos medidos y realizar el ajuste continuo de los parámetros, a fin de que el modelo continúe siendo una representación útil del sistema físico a lo largo de la vida útil del mismo.

### 2.2 Datos de Partida.

La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir dispone de redes de monitorización y control distribuida por toda la cuenca que genera la siguiente información:

– En cuencas superficiales: se realizan capturas de datos de calidad para el cumplimiento de los requerimientos legislativos a nivel nacional<sup>1</sup> (datos físico-químicos y biológicos) en unos 200 puntos en ríos y 50 en embalses; y se obtiene información de



caudales en continuo en unos 61 embalses, 63 aforos, 29 marcos de control (altura de lámina), 59 pluviómetros,... y otros 90 aforos –incluyendo los manantiales– con información mensual distribuidos por toda la cuenca...

<sup>1</sup> Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.

– En acuíferos: se dispone de una red de control para el cumplimiento de los requerimientos legislativos a nivel nacional igual que en las redes hidrológicas, de manera que se dispone de información de calidad (parámetros físico-químicos) en unos 200 puntos e información de niveles piezométricos en unos 301 piezómetros en Doñana y 209 distribuidos por el resto de la cuenca.

Estas redes de datos generan mucha información que ayudan a la gestión del día a día del recurso y al desarrollo y ejecución de la Planificación Hidrológica con la utilización de modelos hidrológicos y de contaminación.

### 2.3 Modelo Físico.

Las modelos que emplean las Confederaciones Hidrológicas sirven para gestionar los flujos de agua en función de las demandas predefinidas y estimadas (por ejemplo, para suministros de agua, de riego e industria) y la infraestructura reguladora asociada. Además, suelen disponer de modelos de avenidas, para poder anticipar eventos catastróficos. Sin embargo, el balance hídrico es dinámico en el tiempo y el espacio. Por lo tanto, para modelar la gestión del agua en un gemelo digital, se deben incluir numerosas variables para lograr un balance hídrico más preciso, incluyendo la dinámica del uso de la tierra y las prácticas de las tierras de cultivo.

Como en cualquier ejercicio de modelización, los modelos hidrológicos suponen simplificaciones de un sistema de cuencas reales y, por tanto, es inevitable tener un cierto grado de incertidumbre. No obstante, las simplificaciones deben considerarse con cautela, ya que podrían afectar los resultados.

El SWAT es un modelo ecohidrológico espacial, semidistribuido y de base física, desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de EE. UU. El uso de SWAT como herramienta para evaluar los caudales diarios mejora el balance hídrico general. SWAT, a diferencia de otros modelos de gestión hidrológica a, incluye la demanda de agua agrícola en el espacio y el tiempo, dado que está muy influenciado por las rotaciones de cultivos y las prácticas agrícolas (Seeboonruang, 2012). Este modelo se utiliza también para evaluar el impacto en la gestión de la tierra durante períodos de tiempo prolongados (Arnold *et al.*, 1998). SWAT opera con una discretización diaria en el tiempo, lo que permite evaluar de parámetros hidrológicos relacionados con prácticas de gestión del suelo (Kaur *et al.*, 2004) (Tripathi *et al.*, 2003).

De fundamental importancia para la obtención de un modelo de calidad es disponer de datos precisos, obtenidos mediante medida remota e inspecciones *in situ* (Ashraf Vaghefi *et al.*, 2015; Guzinski *et al.*, 2014; Laurent y Ruelland, 2011).

SWAT presenta un entorno basado en GIS (ArcSWAT) que es útil para definir los límites de las cuencas hidrográficas y sus subcuencas. Estas subcuencas se dividen a su vez en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), que son combinaciones únicas de tipos homogéneos de uso de la tierra, características del suelo y prácticas de gestión (Gassman *et al.*, 2007), a la escala a la que SWAT simula el balance de agua. La representación de la cuenca mediante URHs es una simplificación capaz de reproducir procesos biofísicos muy detallados. Estos procesos están asociados con la dinámica del agua, el ciclo de nutrientes, el crecimiento de los cultivos, el manejo agrícola, los patrones de sedimentación y las implicaciones de la infraestructura de regulación (Di Luzio *et al.*, 2005). SWAT proporciona una descripción distribuida de los procesos hidrológicos desde URH hasta el nivel de subcuenca.

El balance hídrico se puede definir para la cuenca o para cualquier punto de la corriente definido por el usuario (Neitsch *et al.*, 2005). SWAT resuelve la dinámica del agua entre la relación de infiltración/escorrentía (método de número de curva SCS), evapotranspiración (cobertura del suelo, etapa de la vegetación y dependencia de la gestión), percolación (incluidas las propiedades del suelo), flujo lateral (dependencia topográfica), enrutamiento del canal (principal y tributario) y relaciones de recarga de acuíferos (Moriassi *et al.*, 2012). Finalmente se necesita información complementaria que describan la gestión global de la tierra y su influencia en el comportamiento hídrico de la cuenca (Neitsch *et al.*, 2002).

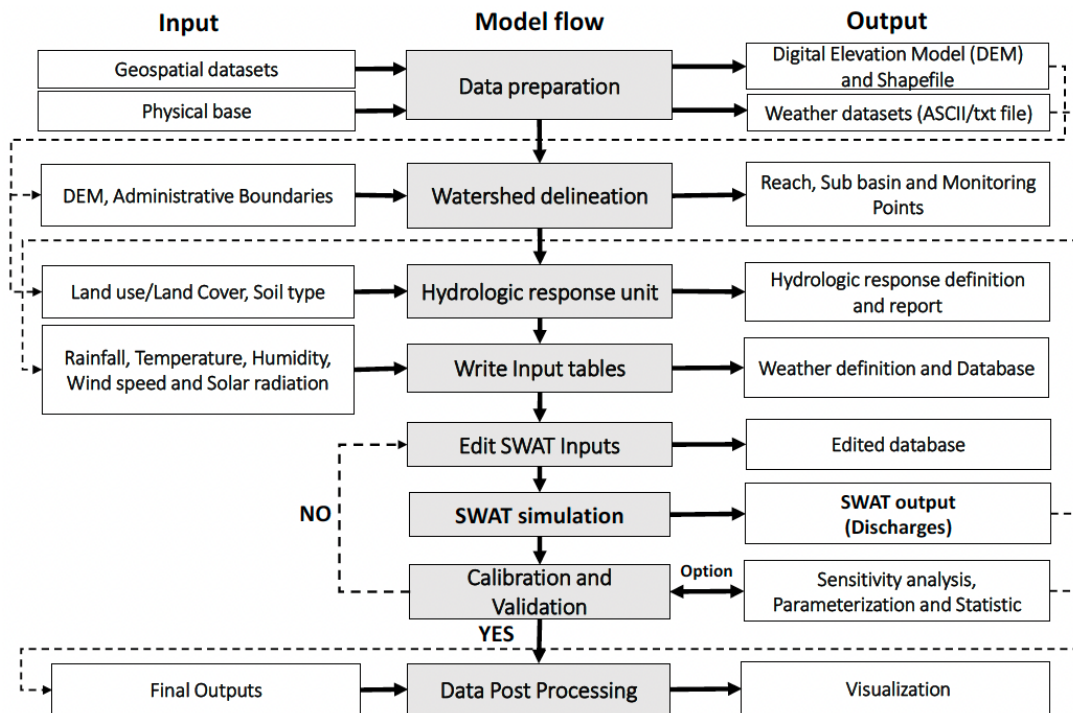
De una manera simplificada, el ciclo hidrológico en SWAT se controla mediante una ecuación de balance, definida como

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (1)$$

donde  $SW_t$  es el contenido final de agua del suelo,  $SW_0$  es el contenido inicial de agua del suelo,  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación,  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía superficial,  $E_a$  es la cantidad de evapotranspiración en  $i$ ,  $W_{seep}$  es la cantidad de agua que ingresa a la zona vadosa desde el perfil del suelo el día  $i$ , y  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno el día  $i$  (mm  $H_2O$ ). Todas las cantidades expresadas en mm  $H_2O$  (excepto  $SW_t$  y  $SW_0$ ) y referidas al día  $i$ .

La Figura 2 muestra el proceso de análisis y modelado requerido para construir un SWAT, en el que se han destacado los datos de entrada, objetivo principal de esta propuesta.

Figura 2. Proceso de análisis y modelado de un SWAT



### 3. Objetivos

El objetivo del presente proyecto es iniciar el camino para el desarrollo de un gemelo digital para la cuenca del Guadalquivir basado en un modelo físico SWAT, junto con el desarrollo de herramientas de visualización y ayuda a la toma de datos.

Un modelo SWAT para la cuenca del Guadalquivir es un objetivo muy ambicioso en el que debe tomar parte numerosos actores, tanto en las fases de análisis como en el modelado y su validación, incluyendo científicos, tecnólogos, gestores, usuarios y ciudadanos.

La construcción de un gemelo digital basado en SWAT requiere además, el concurso de expertos en sistemas de procesamiento de la información, ingeniería hidráulica y agrícola e inteligencia artificial.

Finalmente el desarrollo de un sistema de visualización y ayuda a la toma de decisiones requiere de la participación de científicos tecnólogos y expertos en la gestión de cuencas.

Por todo ello la CHG considera este gemelo digital como un proyecto a medio-largo plazo, definiendo en este anexo los primeros pasos relativos al estudio y análisis de datos, a la propuesta de nuevas estaciones de captación y a los sistemas de recogida y almacenamiento de datos en los sistemas de información de la CHG, dejando los siguientes pasos a futuras ampliaciones del proyecto.

Así pues, los objetivos considerados en esta primera fase del proyecto son:

- Investigación de los datos necesarios para construir, validar y, en el futuro, actualizar y mejorar un modelo SWAT preciso de la cuenca del Guadalquivir. Entre otros: número y tipo de datos, periodicidad, precisión y resolución espacial y temporal.

- Estudio de los datos disponibles en el Sistema de información ya existentes en la CHG y de adecuación para la construcción validación, actualización del modelo SWAT. Se prestará especial atención a los modelos ya desarrollados por CHG (como los modelos de avenidas) y a su integración en una herramienta que permita combinar la información de cada uno de ellos. Además, se realizarán estudios preliminares sobre la capacidad de elaborar modelos de alto nivel y bajo orden a partir de los datos existentes, utilizando técnicas de *Machine Learning*.

- Determinación de los datos necesarios para la construcción, validación y actualización y mejora del SWAT no actualmente disponibles, y decisión respecto a la forma de extraerlo a partir de otras bases de datos existentes (ya sea de la propia CHG o de otros organismos e instituciones) o de medirlos de una manera directa o indirecta.

- Investigación sobre despliegue de una red de captadores para aquellas nuevas variables de las cuencas que se deciden medir, actualización y mejora de los sistemas de adquisición ya existentes.

- Investigación sobre metodologías y protocolos (acordes con los estándares nacionales e internacionales) para la adquisición, tratamiento, almacenamiento y actualización del modelo.

- Investigación de las necesidades para la recogida de datos, su almacenamiento y visualización.

- Estudio de las capacidades del centro de información de la CHG y determinación de las mejoras y actualizaciones necesarias para dar satisfacción a las necesidades anteriores.

- Se prestará especial atención al área del Parque Nacional de Doñana, en el que se intensificarán tanto las tareas de monitorización como del uso de la Inteligencia Artificial para el diseño de herramientas de soporte a la toma de decisiones.

#### 4. Plan de trabajo

El plan de trabajo se estructura en cuatro Paquetes de Trabajo:

##### Paquete de Trabajo 1 (PT1). Gestión del Proyecto

Consta de dos tareas:

- T1.1 Gestión y Coordinación del Proyecto.
- T2.1 Difusión y Explotación de resultados.

Paquete de Trabajo 2 (PT2). Datos para construir, validar, actualizar y mejorar un SWAT de la cuenca de la cuenca del Guadalquivir

Consta de cuatro tareas:

- T2.1 Investigación de los datos necesarios.
- T2.2 Estudio de los datos y modelos disponibles.
- T2.3 Investigación de despliegue de nuevas estaciones de medida para la captación de datos no disponibles.
- T2.4 Investigación en técnicas de *Machine Learning* para modelado de alto nivel con los datos existentes.

Paquete de Trabajo 3 (PT3). Definición de metodologías y protocolos para la adquisición, recogida, almacenamiento y tratamiento de los datos

Cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales y siguiendo los criterios orientados a una gestión FAIR de los datos.

Consta de tres tareas:

- T3.1 Investigación de las metodologías y protocolos para la captación, transmisión y recogida de datos.
- T3.2 Investigación de las metodologías y protocolos para el almacenamiento, procesamiento y visualización de datos.
- T3.3 Investigación de integración con bases de datos nacionales e internacionales y terceros, Políticas de acceso e intercambio de datos.

Paquete de Trabajo 4 (PT4). Necesidades de recogida, almacenamiento y visualización de datos

Consta de tres tareas:

- T4.1 Investigación de las necesidades HW y SW y de infraestructura TIC para la recogida, almacenamiento y visualización de datos.
- T4.2 Estudio de las capacidades existentes en el centro de información de la CHG.
- T4.3 Propuesta de mejora y actualización de las capacidades existentes en el CHG.

##### Paquete de Trabajo 5 (PT5). Arquitectura de un sistema de simulación

Consta de cuatro tareas:

- T5.1 Investigación en una arquitectura que permita simular y combinar las simulaciones de los modelos existentes.
- T5.2 Investigación en técnicas de *Machine Learning* para modelar la evolución de sectores concretos.
- T5.3 Propuesta de arquitectura de simulación del SWAT.

– T.5.4 Servicios de apoyo al proceso de toma de decisiones basados en algoritmos de Inteligencia Artificial.

Hitos:

- Hito 1: Arquitectura del Sistema (M12).
- Hito 2: Finalización de la investigación ML (M24).
- Hito 3: Fin del proyecto (M48).

## 5. Cronograma

Se propone el siguiente cronograma:

Tabla 1. Cronograma del proyecto

	M 00	M 02	M 04	M 06	M 08	M 10	M 12	M 14	M 16	M 18	M 20	M 22	M 24	M 26	M 28	M 30	M 32	M 34	M 36	M 38	M 40	M 42	M 44	M 46	M 48
PT1. Gestión del Proyecto.	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T1.1 Gestión y Coordinación.	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T1.2 Difusión y Explotación.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT2. Datos para SWAT.	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T2.1 Datos necesarios SWAT.	█	█																							
T2.2 Datos disponibles.		█																							
T2.3 Nuevas esta. captadores.			█	█																					
T2.4 Investigación en ML.			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT3. Metodol., protocolos datos.					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T3.1 De capt. transm. y recog.						█																			
T3.2 De almac., proc. y visual.							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T3.3 Integración con BDs.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT4. Nec. centro informac. CHG.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T4.1 Necesidades infraest. TIC.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T4.2 Capacidades.											█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T4.3 Propuesta mejora y actu.												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
PT5. Arquitectura Sist. Sim.					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.1 Inv. Arqu. Sim.					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.2 ML.							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.3 Arqu. Sim. SWAT.							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
T5.4 AI.										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█