

# **Estudio del comportamiento de las masas de agua subterráneas y sus implicaciones en los Hábitats de Interés Comunitario presentes en el Espacio Natural de Doñana.**

## **Resumen ejecutivo**





## 1. INTRODUCCIÓN

La Consejería de Sostenibilidad y Medio Ambiente, al objeto de dar cumplimiento a sus responsabilidades en relación a las directrices europea para la Red Natura 2000 en materia de seguimiento, evaluación, conservación de los espacios naturales andaluces y, en particular, de las Zonas de Especial Conservación (ZEC): Doñana (ES0000024), Doñana Norte y Oeste (ES6150009) y Dehesa del Estero y Montes de Moguer (ES6150012), pone en marcha en julio 2023 el **Servicio técnico para el estudio del comportamiento de las masas de agua subterránea y sus implicaciones en los Hábitats de Interés Comunitario presentes en el Espacio Natural Doñana**, proyecto también conocido como **Agua y Hábitat Doñana**.

## 2. OBJETIVOS

El objeto de la propuesta consiste en el desarrollo de un sistema de seguimiento y análisis del comportamiento de las aguas subterráneas y los Hábitats de Interés Comunitario (en adelante, HIC) presentes en el ámbito de estudio, a través del cual se pretende obtener un modelo que permita explicar las interacciones entre agua el subterránea y los HIC. De la misma manera, se busca desarrollar un sistema de indicadores para el binomio “aguas subterráneas-HIC” que permita a gestores y administraciones con competencias en el territorio poner en marcha actuaciones inmediatas que aseguren la conservación y la recuperación de las funciones ecológicas de los ecosistemas de este espacio. Para ello, se definen los siguientes objetivos:

- Evaluar la disponibilidad de información para interpretar el funcionamiento hídrico de las masas de aguas subterráneas que afectan al ámbito de Doñana, así como sobre el estado de conservación de los HIC presentes en dicho ámbito.
- Verificar la información disponible e identificar nuevas necesidades respecto a la instalación/restitución y digitalización de aquellos elementos de medida que se consideren necesarios para el correcto seguimiento de las masas de aguas subterráneas y los HIC asociados.
- Definir un modelo específico sobre la dinámica de las aguas subterráneas en Doñana y sus implicaciones en la conservación de los HIC y fauna y flora silvestres del Espacio Natural.
- Definir un sistema de indicadores de seguimiento del estado de conservación de los HIC en relación con la dinámica de las aguas subterráneas en Doñana.

## 3. FASES DE ESTUDIO

El estudio del comportamiento del binomio “aguas subterráneas-HIC” supone una labor de extraordinaria complejidad, debido a la diversidad, variabilidad e interrelación de factores del medio sobre los que llevar a cabo un seguimiento y análisis integrado. Para ello, el proyecto contempla un diseño metodológico dividido en tres fases consecutivas:

A través de la Fase I *Diagnóstico de la situación actual y evolución histórica*, se ha desarrollado una revisión del estado de conocimiento sobre las metodologías disponibles para la monitorización de la evolución temporal de las comunidades vegetales presentes en el ámbito de estudio, en relación con el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero Almonte-Marismas en las últimas décadas. Para ello se procedió a recopilar la información existente sobre el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero: tanto su funcionamiento en estado no influenciado por la acción humana, como



su evolución a lo largo de las últimas cinco décadas. Asimismo, se procedió a recopilar aquellos avances en ecofisiología y teledetección que posibilitasen la monitorización de la evolución temporal de las comunidades de vegetación que conforman los HIC. De este modo, se pudo identificar un conjunto de variables de estudio de diferentes disciplinas del conocimiento, que podrían actuar como indicadores del estado de la vegetación con relación a la disponibilidad de agua freática o la humedad del suelo.

A través de la Fase II *Definición del modelo y toma de datos para su verificación* se pudo concretar una metodología de estudio en torno a tres grandes disciplinas del conocimiento: hidrogeología, ecofisiología vegetal y teledetección; la cual recibió el respaldo del Grupo de Trabajo Hidrología-Ecología Doñana en su segunda sesión de trabajo del 12 de junio de 2025. El desarrollo de dicha metodología implicó la puesta en marcha de un amplio protocolo de análisis de variables y toma de datos que más tarde se materializarían en resultados específicos de cada disciplina.

A través de la Fase III *Verificación del modelo y propuesta de indicadores* se procedió a integrar los resultados de las diferentes disciplinas del conocimiento en productos de mayor robustez científico – técnica con los que contribuir a la mejor comprensión de las relaciones entre la dinámica de las aguas subterráneas y sus implicaciones en la conservación de los HIC en el Espacio Natural de Doñana y a la confección de las conclusiones del proyecto, entre las que se propone una serie de indicadores y medidas a implementar para la mejora de la monitorización de los procesos de cambio detectados en el ámbito de estudio.

La colaboración científico-técnica ha sido fundamental para obtención de resultados robustos y contrastados y posibilitar un **desarrollo adaptativo de los trabajos**. Fue relevante el esfuerzo realizado en definir sucesivas aproximaciones metodológicas hasta reunir los consensos necesarios para llevarla a cabo, así como la definición de productos necesarios para lograr una comprensión sistémica y multiescalar. En este sentido, uno de los mayores logros del proyecto ha sido la creación de un espacio de diálogo y análisis donde confrontar ideas y posibilitar la construcción colectiva del conocimiento.

## 4. CONCLUSIONES

Se puede afirmar que los trabajos desarrollados han permitido dar cumplimiento con el objeto del encargo, si bien es sabido que, en ecosistemas mediterráneos, cualquier estudio o seguimiento sobre ecosistemas debe contemplar entre tres y cinco años para capturar variaciones anuales e interanuales, y que el plazo administrativo del encargo ha sido significativamente inferior, limitando el alcance del mismo.

### 4.1 Sistema de seguimiento y análisis del comportamiento de las aguas subterráneas y los Hábitats de Interés Comunitario.

El sistema de seguimiento puesto en marcha en el marco del encargo ha permitido alcanzar una mayor comprensión de la evolución de la superficie piezométrica y la vegetación, en tres zonas afectadas por la explotación de las aguas subterráneas, en las que se han evidenciado cambios significativos en la estructura de la vegetación, pero no se ha podido cuantificar la afección hidrodinámica respecto de la afección climática. En este sentido se propone:



- Instrumentalización de nueva estación de seguimiento en el ámbito de Abalarío, que representa el ámbito menos influenciado por las extracciones y permitiría contrastar mejor los resultados obtenidos en ambientes influenciados.
- Realización de vuelo de dron con cámara hiperespectral en el ámbito de La Rocina, para cuantificar la sucesión saucedo-fresneda, la cual no ha sido posible cuantificar a través de productos satelitales. Este tipo de vuelo permitiría también la monitorización de zonas de monte negro, con el objetivo de controlar su evolución temporal.
- Implementar mejoras en el Modelo matemático de funcionamiento del acuífero Almonte-Marismas, encaminadas a ofrecer una mayor discretización en las zonas de estudio con las que poder hacer modelizaciones de escenarios futuros.
- Desarrollo de un visor, alimentado con datos de sensores remotos y medidas en campo, para el monitoreo en tiempo real de datos climáticos, vegetación, humedad del suelo y nivel piezométrico.

#### 4.2 Modelo que permita explicar las interacciones entre agua subterránea e HIC

El sistema de seguimiento ha permitido comprobar cómo los descensos continuados del nivel freático en diferentes ecosistemas merman la capacidad de éstos para adaptarse al aumento de la severidad de los efectos del cambio climático, haciéndoles perder estructura y función, e incluso desaparecer a través de procesos de sucesión ecológica.

De forma general, seguiría una pauta que ya ha sido propuesta con relación a la resiliencia al cambio climático de diferentes ecosistemas icónicos respecto a factores de estrés local, en este caso, descensos del nivel freático (Scheffer et al., 2015).

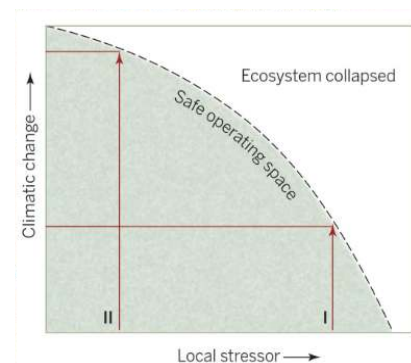


Figura 1: Esquema Espacio Opera-

El proyecto ha evidenciado situaciones contrastadas de algunas formaciones vegetales relevantes, en las que puede observarse cómo aquellas zonas que muestran en la actualidad un comportamiento de recarga respecto al acuífero regional, aunque previamente a las alteraciones de origen antrópico fueran zonas de descarga, se encuentran, en su mayor parte, fuera del espacio operativo de seguridad y muestran signos de colapso; mientras que, aquellas que se mantienen como zonas de descarga, y ésta no ha sido significativamente mermada, se encuentran dentro del espacio operativo de seguridad y conservan aún sus principales valores ecológicos.

#### 4.3 Sistema de indicadores de seguimiento del estado de conservación de los HIC en relación con la dinámica de las aguas subterráneas en Doñana.

A continuación, y a la luz de los resultados obtenidos a través de la implementación del sistema de seguimiento "Aguas subterráneas- HIC" puesto en marcha en el marco del presente encargo, se enumera una propuesta de variables de interés para el seguimiento ecológico las comunidades vegetales presentes en el ámbito de estudio, en relación con la hidrodinámica local.



**Sistema de seguimiento de variables climáticas:** El análisis comparado sobre la variabilidad climática entre datos registrados por la estación de medición manual "Palacio de Doñana", operada por la ICTS-RBD, y datos de la rejilla climática del proyecto SARAI (IGME-AEMET) presentan una alta concordancia, por lo que se propone la utilización de datos de la Estación Palacio de Doñana, ya que cuenta con una serie temporal más extensa, con registros hasta el año 2025. Entre las variables a considerar, se reseñan: Temperatura (media, máxima y mínima diarias y mensuales; desviación estándar mensual); Precipitación: diaria, acumulada mensual; acumulada anual, desviación estándar mensual); Humedad relativa; Evapotranspiración; Déficit de presión de vapor (Vpd)

**Sistema de seguimiento de piezometría superficial:** El ámbito de Doñana cuenta con una red piezométrica bastante nutrida y el conocimiento sobre el estado y evolución de las masas de aguas subterráneas es significativo. La red actual ha permitido interpretar la evolución piezométrica de todas las zonas de interés incluidas en el sistema de seguimiento "Aguas subterráneas- HIC" aportando información de gran valor para interpretar la evolución de los ecosistemas. No obstante, para la correcta interpretación de variables ecofisiológicas (dendrometría y potencial hídrico), se echa en falta contar con una red de piezómetros someros, de 3m a 5m de profundidad, que permita conocer con mayor detalle la evolución de la superficie piezométrica de los niveles superiores.

**Sistema de seguimiento de humedad del suelo:** Para la monitorización de la humedad del suelo se propone un sistema de seguimiento basado en imágenes radar Sentinel-1. A partir de ellas se generará un índice relativo de humedad, con resolución espacial de 30 metros, que será calibrado mediante medidas puntuales obtenidas por termohigrómetros instalados en campo. Esto garantiza un seguimiento continuo y detallado de las condiciones de humedad superficiales.

**Sistema de seguimiento de estrés hídrico de formaciones vegetales:** El sistema de seguimiento "Aguas subterráneas- HIC" ha implementado en sus estaciones de seguimiento dispositivos de medida del potencial hídrico en xilema, en registro continuo. Las medidas tomadas por estos dispositivos han sido calibradas con mediciones mensuales/bimensuales de potencial hídrico en hojas. Asimismo, los resultados han sido comparados mediante el cálculo de índices de vigorosidad vegetal (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI) ofreciendo un nivel de ajuste adecuado a los datos obtenidos mediante medición *in situ*.

Por todo ello se propone aproximar el grado de estrés hídrico de las diferentes formaciones vegetales presentes en el ámbito de estudio a través del análisis de índice NDVI, manteniendo las mediciones en las estaciones de monitoreo actuales para protocolos de calibración.

**Sistema de seguimiento de transformación del paisaje:** El sistema de seguimiento "Aguas subterráneas- HIC" ha llevado a cabo, en una fracción de 15 km<sup>2</sup> pertenecientes a cada una de las zonas de estudio, una revisión de las comunidades vegetales presentes en cada uno de los polígonos de la cobertura del Sistema de Información de Referencia de los Hábitats de Interés Comunitario de Andalucía (IRHICA)-Rediam, actualizando la información mediante la realización de visitas de campo, la recogida de información mediante la realización de observaciones y notas extensas en una nube de puntos (muestreo dirigido), y apoyo de cobertura LiDAR y otros productos de teledetección.