

García Díaz, D.; Marín Salcedo, J.; Rodríguez Ramírez, A.; Bustamante Díaz, J. Cambios en la estructura vegetal y el régimen hídrico de lagunas temporales del Espacio Natural de Doñana

Cambios en la estructura vegetal y el régimen hídrico de lagunas temporales del Espacio Natural de Doñana

García Díaz, Diego ¹ Marín Salcedo, José ² Rodríguez Ramírez, Antonio ³ Bustamante Díaz, Javier ¹

¹ Estacion Biologica de Doñana, España

² Tragsatec

³ Universidad de Huelva

ORCID: García Díaz 0000-0002-2757-7112 Marín Salcedo 0000-0001-7888-2355 Rodríguez Ramírez 0000-0001-8437-6811 Bustamante Díaz 0000-0001-7515-0677

Correspondencia: diegogarcia@ebd.csic.es josesingla@gmail.com arodri@uhu.es jbustamante@ebd.csic.es

RESUMEN

Las lagunas temporales de Doñana están experimentando una transformación ecológica profunda y acelerada, evidenciada tanto por cambios en la estructura vegetal como por la reducción drástica de sus períodos de inundación. El análisis mediante datos LiDAR (2014, 2020 y 2024) sobre 591 lagunas revela una inversión completa del paisaje lagunar en apenas una década. El suelo desnudo se redujo un 44,6%, mientras que la vegetación herbácea baja aumentó un 918,7% y el matorral consolidado un 36%. En 2014, 121 lagunas presentaban menos del 10% de cobertura vegetal; en 2024, ese grupo se ha reducido a solo 20, mientras que 103 lagunas tienen ya más del 90% de su superficie cubierta por vegetación. El recubrimiento vegetal medio pasó del 35,3% al 64%, indicando que la mayoría de las lagunas han perdido su carácter de lechos inundables. Este proceso es coherente con la reducción del hidroperíodo documentada mediante imágenes Landsat desde 1984. El análisis por décadas muestra anomalías positivas hasta 2004 (+8,3 y +9,7 días), seguidas de un deterioro progresivo que alcanza -15,2 días en el período 2014-2024, equivalente a una reducción del 44% respecto a las condiciones de los años 80-90. Las lagunas principales muestran el deterioro más alarmante: Santa Olalla perdió 98,5 días de hidroperíodo en la última década (-7,9 días/año), y el Acebuche ha quedado prácticamente seco, con una pérdida del 99,8% de su hidroperíodo. En total, el 53,1% de las lagunas presentan tendencias negativas en 2014-2024, y el 28,4% ha perdido más del 40% de su hidroperíodo original. Estos resultados evidencian una crisis hídrica y ecológica sistémica que compromete gravemente la biodiversidad y funcionalidad de uno de los humedales más importantes de Europa.

Palabras clave: lagunas temporales, hidroperíodo, matorralización, Doñana, LiDAR

Fecha de recepción: 22 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 22 febrero 2026


Cambios en la estructura vegetal y el régimen hídrico de lagunas temporales del Espacio Natural de Doñana

García Díaz, Diego ⁽¹⁾, Marín Salcedo, José ⁽²⁾, Rodríguez Ramírez, Antonio ⁽³⁾, Bustamante Díaz, Javier ⁽¹⁾


⁽¹⁾ Estación Biológica de Doñana.

 0000-0002-2757-7112, diegogarcia@ebd.csic.es ;  0000-0001-7515-0677, jbustamante@ebd.csic.es

⁽²⁾ Tragsatec.

 0000-0001-7888-2355, joselsingla@gmail.com

⁽³⁾ Universidad de Huelva.

 0000-0001-8437-6811, arodri@uhu.es

Resumen: Las lagunas temporales de Doñana están experimentando una transformación ecológica profunda y acelerada, evidenciada tanto por cambios en la estructura vegetal como por la reducción drástica de sus períodos de inundación. El análisis mediante datos LiDAR (2014, 2020 y 2024) sobre 591 lagunas revela una inversión completa del paisaje lagunar en apenas una década. El suelo desnudo se redujo un 44,6%, mientras que la vegetación herbácea baja aumentó un 918,7% y el matorral consolidado un 36%. En 2014, 121 lagunas presentaban menos del 10% de cobertura vegetal; en 2024, ese grupo se ha reducido a solo 20, mientras que 103 lagunas tienen ya más del 90% de su superficie cubierta por vegetación. El recubrimiento vegetal medio pasó del 35,3% al 64%, indicando que la mayoría de las lagunas han perdido su carácter de lechos inundables. Este proceso es coherente con la reducción del hidroperiodo documentada mediante imágenes Landsat desde 1984. El análisis por décadas muestra anomalías positivas hasta 2004 (+8,3 y +9,7 días), seguidas de un deterioro progresivo que alcanza -15,2 días en el período 2014-2024, equivalente a una reducción del 44% respecto a las condiciones de los años 80-90. Las lagunas principales muestran el deterioro más alarmante: Santa Olalla perdió 98,5 días de hidroperiodo en la última década (-7,9 días/año), y el Acebuche ha quedado prácticamente seco, con una pérdida del 99,8% de su hidroperiodo. En total, el 53,1% de las lagunas presentan tendencias negativas en 2014-2024, y el 28,4% ha perdido más del 40% de su hidroperiodo original. Estos resultados evidencian una crisis hídrica y ecológica sistémica que compromete gravemente la biodiversidad y funcionalidad de uno de los humedales más importantes de Europa.

Palabras clave: lagunas temporales, hidroperiodo, matorralización, Doñana, LiDAR

Vegetation structure and hydrological regime changes in temporary ponds of Doñana Natural Area

Abstract: *The temporary ponds of Doñana are undergoing a profound and accelerating ecological transformation, driven by changes in vegetation structure and a dramatic reduction in their flooding periods. Analysis of LiDAR data (2014, 2020 and 2024) across 591 ponds reveals a complete reversal of the pond landscape within just one decade. Bare soil cover decreased by 44.6%, while low herbaceous vegetation increased by 918.7% and consolidated scrubland by 36%. In 2014, 121 ponds had less than 10% vegetation cover; by 2024, that group had shrunk to just 20, while 103 ponds now have more than 90% of their surface covered by vegetation. Mean vegetation cover rose from 35.3% to 64%, indicating that the majority of ponds have lost their character as floodable basins. This process is consistent with the hydroperiod reduction documented using Landsat imagery since 1984. Decadal analysis shows positive anomalies up to 2004 (+8.3 and +9.7 days), followed by a progressive deterioration reaching -15.2 days in the 2014–2024 period, equivalent to a 44% reduction compared to conditions recorded in the 1980s–90s. Key ponds show the most alarming decline: Santa Olalla lost 98.5 hydroperiod days over the last decade (-7.9 days/year), and Acebuche has become almost entirely dry, with a 99.8% loss of its hydroperiod. Overall, 53.1% of ponds show negative trends in 2014–2024, and 28.4% have lost more than 40% of their original hydroperiod. These results provide evidence of a systemic hydrological and ecological crisis that seriously threatens the biodiversity and functioning of one*

of Europe's most important wetlands.

Keywords: temporary ponds, hydroperiod, scrubland encroachment, Doñana, LiDAR

1. INTRODUCCIÓN

El Espacio Natural de Doñana (END) alberga uno de los sistemas de lagunas temporales más importantes del Mediterráneo occidental. Estos humedales, caracterizados por su régimen hídrico estacional y su conexión con el acuífero subyacente, constituyen hábitats prioritarios para la conservación de la biodiversidad europea (Green *et al.*, 2016). El sistema lagunar de Doñana comprende más de 3000 cuerpos de agua temporales que varían enormemente en tamaño, profundidad y duración del hidropereodo (Serrano *et al.*, 2006).

Sin embargo, diversos estudios han alertado sobre el progresivo deterioro de estos ecosistemas. Díaz-Paniagua y Aragonés (2015) documentaron que las lagunas permanentes y temporales de Doñana están amenazadas por la desecación, evidenciando una reducción significativa de sus hidropereodos. El 24 de junio de 2021, el Tribunal de Justicia Europeo dictó sentencia condenatoria contra España por no haber evitado la alteración de los hábitats protegidos de Doñana, vinculada a las extracciones de agua subterránea.

La teledetección ofrece herramientas objetivas para cuantificar estos cambios a escala espacial y temporal. Los datos LiDAR permiten caracterizar la estructura vertical de la vegetación, mientras que las series temporales de imágenes Landsat posibilitan el cálculo del hidropereodo desde 1984 (Díaz-Delgado *et al.*, 2016).

El objetivo de este trabajo es cuantificar: (1) el proceso de matorralización de las lagunas temporales entre 2014 y 2024 usando datos LiDAR, y (2) la evolución del hidropereodo desde 1984, estableciendo la relación entre ambos procesos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Se analizaron 591 lagunas temporales del END, delimitadas según la cartografía de Labourdette (Ruiz-Labourdette *et al.*, 2005), con una superficie total de 804 ha. El sistema incluye lagunas epigénicas (alimentadas por precipitación directa), mesogénicas (con influencia mixta) e hipogénicas (dependientes del nivel freático), siendo estas últimas las más sensibles a las extracciones del acuífero.

2.2. Análisis de matorralización (LiDAR)

Se utilizaron los Modelos Digitales de Superficies Vegetación (MDSnV, resolución 2,5 m, densidad 0,5 puntos/m²) de la primera y segunda cobertura LiDAR del PNOA (2014 y 2020), y las nubes de puntos de la tercera cobertura PNOA 2024, a partir de las cuales se generó el correspondiente Modelo de Altura de la Cubierta Vegetal (CHM, del inglés Canopy Height Model) a resolución 1 m (densidad ≥ 5 puntos/m²). Tanto el

MDSnV como el CHM representan la altura de los elementos vegetales sobre el terreno, de modo que los valores de cada píxel reflejan directamente la altura de la vegetación. A partir de estos valores se reclasificó la superficie en cuatro categorías: suelo desnudo ($\leq 0,1$ m), vegetación baja (0,1–0,3 m), matorral (0,3–2 m) y arbolado (> 2 m). Mediante estadísticas zonales sobre los perímetros de las 591 lagunas se calculó el porcentaje de cobertura de cada categoría para cada fecha.

2.3. Análisis de hidropereodo (Landsat)

Se empleó el producto de hidropereodo del Protocolo de Normalización v2 del LAST-EBD (García Díaz, D. & Bustamante, J. 2024), generado a partir de máscaras de agua extraídas de cada escena Landsat disponible desde 1984/85 hasta 2024/25. El hidropereodo se define como el número de días de inundación por píxel a lo largo de cada ciclo hidrológico. Para su cálculo, la interpolación temporal se basa en el punto medio entre escenas consecutivas: a cada píxel se le asignan días de inundación, sequedad o NoData en función de su estado (agua/seco/nodata) en las escenas que delimitan cada intervalo, lo que permite aprovechar el máximo número de imágenes disponibles por ciclo.

Esta metodología está implementada en la librería de Python Phydroperiod (García Díaz, D. & Bustamante, J. 2026; <https://pypi.org/project/phydroperiod/>). Se calculó el hidropereodo medio de toda la serie como referencia y se obtuvieron las anomalías anuales con respecto a la media, así como las tendencias temporales y correlaciones con datos de precipitación se estimaron mediante regresión lineal.

Los datos de precipitación utilizados proceden de la estación meteorológica manual del Palacio de Doñana (ICTS-RBD / EBD-CSIC, 2026).

3. RESULTADOS

3.1. Matorralización de lagunas (2014-2024)

El análisis LiDAR revela una transformación profunda del paisaje lagunar en una década (Tabla 1, Figuras 1-2). El suelo desnudo se redujo un 44,6% (de 507 a 284 ha), mientras que la vegetación baja aumentó un 918,7% (de 14,6 a 148,4 ha) y el matorral consolidado un 36% (de 274,5 a 372,9 ha).

La Figura 1 muestra la inversión del paisaje: en 2014, 521,6 ha correspondían a suelo/vegetación baja frente a 274,5 ha de matorral; en 2024 la relación se invirtió (372,9 ha frente a 432,2 ha). La Figura 2 evidencia el desplazamiento dramático de la distribución: en 2014 el pico se situaba en 0-10% de vegetación (121 lagunas), mientras que en 2024 se desplazó a 90-100% (103 lagunas).

Tabla 1. Cambios en la distribución de lagunas según cobertura vegetal en el vaso lagunar.

Parámetro	2014	2024	Cambio
Lagunas 0-10% veg.	121	20	-83%
Lagunas 10-90% veg	458	468	2,2%
Lagunas 90-100% veg.	12	103	758%
Recubrimiento medio	35,3%	64%	81%

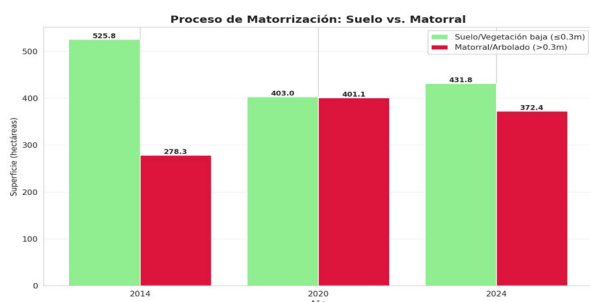


Figura 1. Evolución de la superficie ocupada por suelo/vegetación baja ($\leq 0,3m$) frente a matorral/arbóladado ($>0,3m$) en las 591 lagunas (2014-2024).

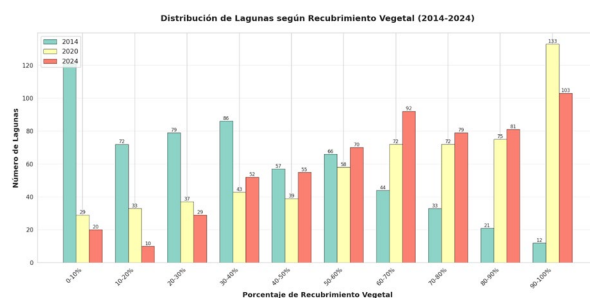


Figura 2. Distribución del número de lagunas según porcentaje de recubrimiento vegetal en 2014, 2020 y 2024.

3.2. Evolución del hidroperiodo (1984-2024)

El análisis por décadas evidencia un cambio de régimen hídrico (Figuras 3 y 4). Las anomalías pasaron de positivas (+8,3 días en 1984-1994; +9,7 días en 1994-2004) a negativas (-2,5 días en 2004-2014; -15,2 días en 2014-2024). Esta última anomalía representa una reducción del 44% del hidroperiodo respecto a las décadas de 1980-90. Para las 87 lagunas principales, la tendencia es de -1,17 días/año, con el 54,1% (320 lagunas) presentando hidroperiodos medios inferiores a 5 días.

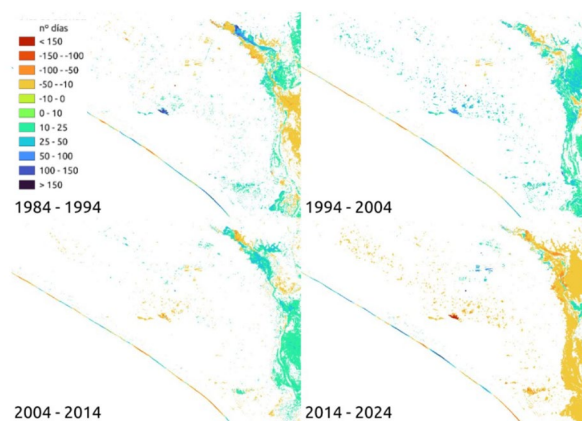


Figura 3. Distribución espacial de la anomalía media del hidroperiodo por década en las lagunas temporales de Doñana (1984-2024).

3.3. Deterioro de lagunas emblemáticas

Las lagunas principales muestran el deterioro más alarmante: **Santa Olalla** perdió 98,5 días en 2014-2024 (-39,5%), pasando de 249 a 150 días de hidroperiodo, con tendencia de -7,9 días/año; **Acebuches** perdió 84,5 días (-99,8%), quedando prácticamente seca desde 2015 con un déficit acumulado de -587 días en 2020-2024 (suma de anomalías anuales respecto al hidroperiodo histórico medio, a razón de ~ -147 días/ciclo); **Laguna Dulce** perdió 40,1 días (-20,9%), con aceleración del deterioro en los últimos 4 años. Para el conjunto de las 87 lagunas principales (hidroperiodo medio ≥ 20 días), el hidroperiodo medio se ha reducido un 63,7% entre los años 80 (93,9 días) y los 2020 (34,1 días), con una tendencia de -1,17 días/año ($p=0,011$).

En total, el 53,1% de las 591 lagunas (314) presentan tendencias negativas en 2014-2024, y el 28,4% (168 lagunas) ha perdido más del 40% de su hidroperiodo original.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La correlación temporal entre reducción del hidroperiodo y matorralización es inequívoca: el hidroperiodo medio descendió de 52,2 días (2010-2014) a 34,1 días (2020-2024), coincidiendo con el incremento de cobertura vegetal detectado por LiDAR. Este patrón confirma las alertas previas sobre la desecación progresiva del sistema lagunar (Díaz-Paniagua y Aragónés, 2015).

El análisis de correlación hidroperiodo-precipitación ($r=0,895$, $R^2=0,80$) indica que el 80% de la varianza se explica por factores climáticos. Sin embargo, la tendencia negativa en los residuos (-0,15 días/año, $p=0,013$) evidencia un factor adicional no climático: la ratio hidroperiodo/precipitación descendió un 59% desde los años 1980 (3,53 días/100mm) hasta los 2020 (1,44 días/100mm), indicando que cada milímetro de lluvia produce menos de la mitad del hidroperiodo que producía hace cuatro décadas.

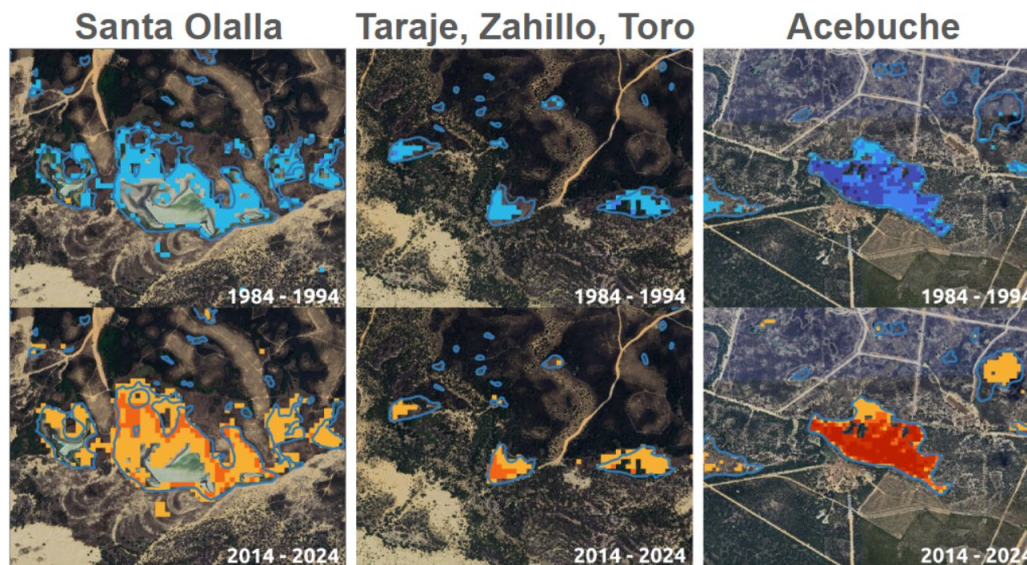


Figura 4. Evolución de la distribución del hidropériodo por décadas en las 591 lagunas de Doñana (1984-2024).

Estos resultados documentan una crisis hídrica y ecológica sistémica vinculada tanto al cambio climático como a la sobreexplotación del acuífero, consistente con la sentencia del TJUE de 2021. Las lagunas temporales de Doñana están perdiendo su carácter de lechos inundables, comprometiendo la funcionalidad ecológica de uno de los humedales más importantes de Europa (Green *et al.*, 2016). Se requieren actuaciones urgentes de gestión hídrica para revertir esta tendencia antes de que las transformaciones sean irreversibles.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Servicio Técnico para el 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 (Exp.: 2023/020).

6. REFERENCIAS

- ICTS-RBD / EBD-CSIC (2026). Datos meteorológicos de la Estación Manual del Palacio de Doñana. Meteo Palacio. Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC). Reserva Biológica de Doñana (ICTS-RBD). Fecha de descarga: 2025-09-24. <https://meteopalacio.icts-donana.es/>
- García Díaz, D. & Bustamante, J. (2026). phydroperiod [Software]. Python Package Index. <https://pypi.org/project/phydroperiod/>
- García Díaz, D. & Bustamante, J. (2024). ProtocoloV2: Protocolo de Normalización de imágenes Landsat (V2) del LAST-EBD [Software]. GitHub. <https://github.com/Digdgeo/ProtocoloV2>
- Green, A. J., Bustamante, J., Janss, G. F., Fernández-Zamudio, R., & Díaz-Paniagua, C. (2016). Doñana wetlands (Spain). In *The Wetland Book* (pp. 1-14). Springer.

Díaz-Delgado, R., Aragonés, D., Afán, I. & Bustamante, J. (2016). Long-Term Monitoring of the Flooding Regime and Hydroperiod of Doñana Marshes with Landsat Time Series (1974–2014). *Remote Sensing*, 8(9), 775. <https://doi.org/10.3390/rs8090775>

Díaz-Paniagua, C., & Aragonés, D. (2015). Permanent and temporary ponds in Doñana National Park (SW Spain) are threatened by desiccation. *Limnetica*, 34(2), 407-424.

Serrano, L., Reina, M., Martín, G., Reyes, I., Arechederra, A., León, D., & Toja, J. (2006). The aquatic systems of Doñana (SW Spain): watersheds and frontiers. *Limnetica*, 25(1-2), 11-32.

Ruiz-Labourdette, D., Coletto, C., Bravo, M.A., Borja, F., Borja, C. & Montes, C. (2005). Mapa del complejo palustre de los arenales de Doñana. Departamento Interuniversitario de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid.