

Herrera, F.; Contreras, E.; Pimentel, R.; Andreu, A. Evaluación del estado de la vegetación de ribera mediante teledetección como referencia para el análisis de caudales ecológicos adaptativos.

Evaluación del estado de la vegetación de ribera mediante teledetección como referencia para el análisis de caudales ecológicos adaptativos.

Herrera, Francisco¹ **Contreras, Eva**¹ **Pimentel, Rafael**¹ **Andreu, Ana**¹

¹ DAUCO, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Córdoba, 14071, Córdoba, España

ORCID: Herrera 0000-0002-1469-992X Contreras 0000-0002-6777-820X Pimentel 0000-0001-6990-4874 Andreu 0000-0001-8346-5417

Correspondencia: o92hegaf@uco.es econtreras@uco.es rpimentel@uco.es ana.andreu@uco.es

RESUMEN

La teledetección puede ser una herramienta de apoyo eficaz para evaluar el estado ecológico de las masas de agua, especialmente en sistemas regulados donde los umbrales hidrológicos fijos no siempre reflejan la respuesta ecológica real. Este estudio examina el régimen hidrológico en la cuenca del río Giribaile (Andalucía) y cómo se ajusta a los umbrales definidos por el Plan Hidrológico vigente, analizando su grado de cumplimiento, y explora cómo la dinámica de la vegetación de ribera, evaluada mediante series de imágenes del satélite Landsat, puede integrarse para ajustar los umbrales de caudal ecológico según las condiciones locales. El régimen de caudal incumple con frecuencia los umbrales establecidos en el plan, lo que evidencia la necesidad de estrategias de gestión específicas para incorporar las dinámicas de distintas masas de agua. El NDVI captura la fenología ribereña, pero su relación con el caudal no es directa ni lineal y depende de múltiples factores ambientales. Sin embargo, su monitoreo ayuda a detectar situaciones de desequilibrio ecológico y puede servir para adaptar y actualizar los umbrales de caudal.

Palabras clave: NDVI, vegetación de ribera, caudales ecológicos, embalses, Landsat

Fecha de recepción: 4 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 4 febrero 2026

Evaluación del estado de la vegetación de ribera mediante teledetección como referencia para el análisis de caudales ecológicos adaptativos.

Herrera, Francisco ⁽¹⁾, Contreras, Eva ⁽¹⁾, Pimentel, Rafael ⁽¹⁾, Andreu, Ana ⁽¹⁾

⁽¹⁾ DAUCO, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Córdoba, España.

 0000-0002-1469-992X, o92hegaf@uco.es;  0000-0002-6777-820X, econtreras@uco.es.

 0000-0001-6990-4874, rpimentel@uco.es;  0000-0001-8346-5417, ana.andreu@uco.es.

Resumen: La teledetección puede ser una herramienta de apoyo eficaz para evaluar el estado ecológico de las masas de agua, especialmente en sistemas regulados donde los umbrales hidrológicos fijos no siempre reflejan la respuesta ecológica real. Este estudio examina el régimen hidrológico en la cuenca del río Giribaile (Andalucía) y cómo se ajusta a los umbrales definidos por el Plan Hidrológico vigente, analizando su grado de cumplimiento, y explora cómo la dinámica de la vegetación de ribera, evaluada mediante series de imágenes del satélite Landsat, puede integrarse para ajustar los umbrales de caudal ecológico según las condiciones locales. El régimen de caudal incumple con frecuencia los umbrales establecidos en el plan, lo que evidencia la necesidad de estrategias de gestión específicas para incorporar las dinámicas de distintas masas de agua. El NDVI captura la fenología ribereña, pero su relación con el caudal no es directa ni lineal y depende de múltiples factores ambientales. Sin embargo, su monitoreo ayuda a detectar situaciones de desequilibrio ecológico y puede servir para adaptar y actualizar los umbrales de caudal.

Palabras clave: NDVI, embalses, Directiva Marco del Agua, Landsat

Assessment of riparian vegetation status using remote sensing as a reference for adaptive environmental flows

Abstract: Remote sensing can be an effective supporting tool for assessing the ecological status of water bodies, particularly in regulated systems where fixed hydrological thresholds do not always reflect the actual ecological response. This study examines the local flow regime in the Giribaile basin (Andalusia) and its alignment with the thresholds defined in the current Hydrological Plan, and analyses the degree of compliance. In parallel, the study explores how riparian vegetation dynamics, assessed using time-series Landsat imagery, can be integrated to adjust ecological flow thresholds to local conditions. Flows frequently fail to meet the thresholds established in the plan, highlighting the need for management strategies tailored to the different dynamics of water bodies. NDVI captures riparian phenology, but its relationship with flow is neither direct nor linear and depends on multiple environmental factors. Nevertheless, NDVI monitoring helps detect ecological imbalances and supports the adaptation and updating of ecological flow thresholds.

Keywords: NDVI, reservoirs, Water Framework Directive, Landsat

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de infraestructuras hidráulicas, como embalses, ha alterado significativamente los regímenes naturales de caudal de los ríos, afectando su estructura y su funcionamiento ecológico. En los ríos mediterráneos, caracterizados por una elevada variabilidad climática y una marcada estacionalidad, estas alteraciones se traducen con frecuencia en procesos de degradación del ecosistema fluvial (Meztger *et al.*, 2021). La Directiva Marco del Agua (DMA) busca garantizar y mantener el buen estado ecológico de las masas de agua, para lo cual introduce el concepto de caudal ecológico. Este se define como "aquel que

contribuye a alcanzar el buen estado o buen potencial ecológico en los ríos o en las aguas de transición y mantiene, como mínimo, la vida piscícola y su vegetación de ribera".

Este caudal debe ser representativo de la variabilidad natural del régimen de caudales del río y garantizar la correcta dinámica de los componentes del ecosistema fluvial. Sin embargo, la definición de estos caudales se basa habitualmente en umbrales hidrológicos estáticos que no siempre reflejan la respuesta ecológica real del sistema, especialmente en cuencas reguladas y altamente variables, como las mediterráneas, o en estudios de hábitat difícilmente extrapolables entre ríos. En este contexto, la teledetección puede servir como

herramienta de apoyo para el seguimiento del estado ecológico del sistema. Las series temporales de índices de vegetación, como el NDVI, permiten caracterizar patrones fenológicos, identificar anomalías y evaluar el estado de la vegetación de ribera de forma continua y distribuida (Ivits *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2022). El uso de estos indicadores permite integrar la respuesta ecológica observada como elemento de referencia para una gestión más adaptativa y sensible a las condiciones locales de los caudales ecológicos.

El objetivo de este trabajo es evaluar el estado de la vegetación de ribera mediante series temporales de NDVI en la cuenca del embalse del Giribaile y explorar su potencial como referencia eco-hidrológica para apoyar la definición de caudales ecológicos adaptativos en ríos mediterráneos regulados. Como paso previo, se analiza el grado de cumplimiento de los umbrales de caudal ecológico establecidos en el Plan Hidrológico del Guadalquivir (PHG) vigente, con el fin de contextualizar la respuesta observada de la vegetación de ribera y evaluar las limitaciones de los enfoques basados en umbrales hidrológicos fijos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El área de estudio se localiza en la cuenca vertiente al embalse de Giribaile, en la cuenca del río Guadalquivir (sur de España). Se trata de una cuenca mediterránea con marcada estacionalidad climática, caracterizada por veranos secos e inviernos húmedos y por una intensa regulación asociada a los embalses de Giribaile, Guadalmena y Siles. La vegetación de ribera está compuesta por comunidades herbáceas, arbustivas y arbóreas típicas de ríos mediterráneos, mientras que los usos del suelo dominantes en el entorno son el olivar tradicional de secano y el monte mediterráneo (Fig. 1).

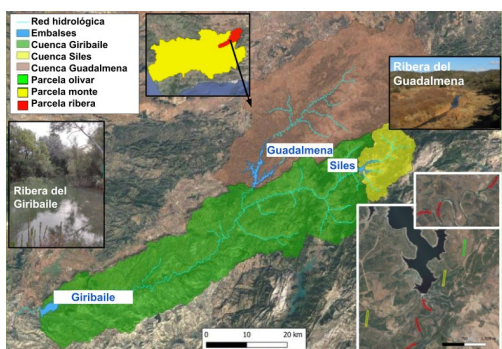


Figura 1. Área de estudio.

2.2. Evaluación de la respuesta de la vegetación al régimen de caudal mediante información remota

Se utilizaron las composiciones de NDVI de 8 días, derivadas de imágenes de Landsat (Colección 2, Nivel 2), para el período 2000–2023. Se delimitaron parcelas de aproximadamente 3 ha de vegetación de ribera, aguas arriba y aguas abajo de los embalses, así como parcelas de olivar tradicional de secano y de monte mediterráneo, para comparar patrones fenológicos y

diferenciar la respuesta de la vegetación de ribera respecto de otros usos. Las series temporales de NDVI se suavizaron mediante medias móviles mensuales para reducir el ruido. Se calculó una curva media multianual representativa del comportamiento fenológico típico de la vegetación de ribera y se analizó la desviación del NDVI respecto de dicha curva como indicador de anomalía ecológica y de posibles alteraciones en el funcionamiento ecohidrológico del sistema.

2.3. Análisis del cumplimiento del régimen de caudal ecológico mediante información hidrometeorológica

Se utilizaron datos diarios de caudal de entrada (Q_e), caudal de salida (Q_s) y precipitación (P) en los embalses de Giribaile, Guadalmena y Siles, correspondientes al período 2000–2023, obtenidos del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para caracterizar el régimen hidrológico y su variabilidad interanual.

El PHG (ciclo 2022–2027) define un régimen de caudal mínimo (Q_{min}) caracterizado por una escasa variabilidad interanual, manteniéndose dentro de un rango estrecho y cuasi constante, de 0.3–0.74 m^3/s y 0.55–0.63 m^3/s , para Guadalmena y Giribaile, respectivamente. Sobre esta base, se evaluó el incumplimiento de tres supuestos habitualmente utilizados en la gestión hidrológica: (A) caudales de entrada inferiores al 50 % del Q_{min} ; (B) caudales de entrada inferiores al 20 % del Q_{min} durante más de 72 horas consecutivas en un mes; y (C) número anual de episodios de incumplimiento del Q_{min} como indicadores operativos del grado de presión hidrológica sobre el sistema. Como referencia teórica, también se comparó el régimen natural de entrada con los umbrales definidos para evaluar su consistencia con el funcionamiento hidrológico natural. Estos resultados se utilizaron como información complementaria para interpretar la respuesta de la vegetación de ribera. Para garantizar la homogeneidad del análisis a lo largo de la serie temporal, los umbrales son para condiciones ordinarias. La incorporación de escenarios de sequía constituye una línea de trabajo futura.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Funcionamiento hidrológico y cumplimiento del régimen de caudales mínimos

Los embalses analizados presentan dinámicas de Q_e claramente diferenciadas, lo que se traduce en patrones distintos de cumplimiento del caudal ecológico, definido como el régimen de caudal mínimo establecido en el PHG. El Q_e en Giribaile (Fig. 2, línea azul) se sitúa en torno a un valor medio durante la mayor parte del año y aumenta durante los episodios de lluvia. Durante el período estival, debido a la necesidad de atender la demanda de riego, el Q_e en Giribaile se ve claramente influido por los desembalses precedentes del Guadalmena (Fig. 2, línea verde) y, en menor medida, del embalse de Siles (Fig. 2, línea roja), lo que atenúa la señal climática natural. Por el contrario, el Q_e del embalse del Guadalmena presenta un régimen más

próximo al natural (Fig. 3) y su Qs también está regulado para cubrir las necesidades de riego.

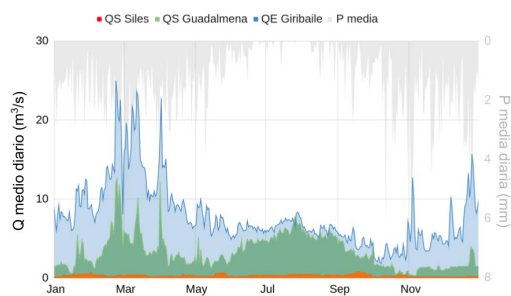


Figura 2. Evolución del Qe y de la P en Giribaile y del Qs en Guadalmena y Siles, en un año hidrológico medio (2019/20).

En el embalse de Giribaile, los caudales de entrada son relativamente estables y están fuertemente condicionados por los desembalses desde el Guadalmena, lo que se traduce en un bajo grado de incumplimiento de los umbrales mínimos. Por el contrario, el embalse del Guadalmena presenta un régimen de aportaciones natural, con incumplimiento del régimen ecológico recurrente, especialmente durante el periodo estival y en años secos, lo que evidencia la vulnerabilidad del sistema ante la demanda de riego.

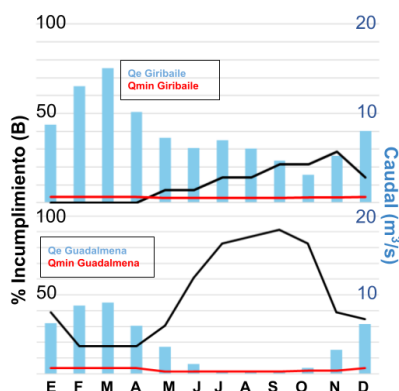


Figura 3. Valor medio de Qe, incumplimiento del supuesto B y Qmin, en los embalses del Giribaile y del Guadalmena para 2000-2023.

Estos resultados evidencian que un régimen de caudal mínimo más o menos constante, como el actualmente definido en el PHG, no captura adecuadamente la diversidad de respuestas hidrológicas y ecológicas en sistemas regulados (Fig. 3).

3.2. Caracterización de la variabilidad de la vegetación de ribera mediante el NDVI

Los resultados muestran patrones estacionales consistentes con su diferente vegetación de ribera: matorral y herbáceos para el Giribaile, con valores máximos en primavera y un descenso progresivo durante el periodo seco, y vegetación arbórea en el Guadalmena, con valores más estables a lo largo de todo el año y sus máximos dependientes de la radiación solar disponible (Fig. 4). Estos patrones difieren claramente de los observados en las parcelas de olivar tradicional y en

el monte mediterráneo, que presentan una mayor dependencia directa de la precipitación (Fig. 4). Esta comparación refuerza el papel diferenciador de la vegetación de ribera como indicador ecohidrológico, al integrar no solo la señal climática, sino también la disponibilidad hídrica asociada al régimen de caudales. Al estar el Qe del Giribaile influenciado por los aportes del Guadalmena, muestra valores de NDVI similares tanto en la entrada como en la salida del embalse durante todo el periodo (Fig. 4). En este caso, la vegetación de ribera se ve favorecida por los desembalses en época de riego, como lo indica el aumento del NDVI en la época estival. Sin embargo, este régimen alterado puede generar una mayor vulnerabilidad de la vegetación de ribera ante periodos de sequía. Por el contrario, en el Guadalmena, cuyo Qe presenta un régimen más natural, los valores de NDVI a la entrada son inferiores a los observados a la salida, lo que sugiere un efecto directo de la operación del embalse sobre el estado de la vegetación ribereña aguas abajo (Fig. 4).

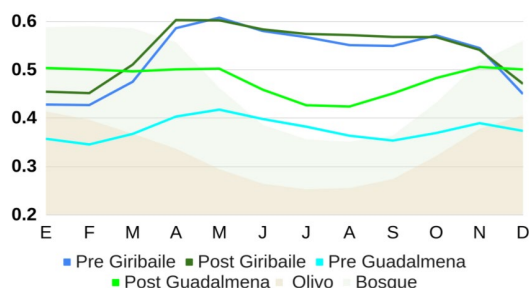


Figura 4. Análisis de la evolución media del NDVI de diferentes tipos de vegetación: ribereña aguas arriba (Pre) y aguas abajo (Post) de los embalses Giribaile y Guadalmena, de olivar y de monte mediterráneo.

3.3. Adaptación del régimen caudal ecológico al estado de la vegetación de ribera

En el embalse de Giribaile se identifica un rango de valores de NDVI similar tanto a la entrada como a la salida del embalse (Fig. 5), lo que permite definir una horquilla de referencia asociada a un estado relativamente estable de la vegetación de ribera (Fig. 6). Este rango puede utilizarse como elemento de control para evaluar desviaciones anómalas del sistema, especialmente durante periodos secos. En el caso del Guadalmena, se observan dos rangos diferenciados de NDVI: uno a la entrada del embalse y otro a la salida (Fig. 4 y 5). Estas diferencias reflejan el efecto de la regulación sobre la disponibilidad hídrica para la vegetación de ribera. Además, los menores valores de NDVI a la entrada evidencian que las aportaciones naturales al embalse incumplen con frecuencia el régimen de caudal ecológico establecido (Fig. 3), por lo que el régimen de caudal mínimo definido en el PHG no se ajusta al régimen natural del río. La identificación de rangos de referencia del NDVI asociados a un estado ecológico estable (Fig. 6) permite vincular el estado observado de la vegetación con los valores medidos de caudal circulante. Sin embargo, las interacciones entre el caudal y el NDVI son complejas y no lineales. Así lo demuestran las relaciones

observadas entre P y NDVI, y entre Qe/Qs y NDVI, existiendo otros factores que modulan dichas relaciones (fenología, nivel freático y superficie de ribera cubierta de agua). En el caso del Qe del Guadalmena, en régimen natural, se observa que a menores valores de precipitación disminuyen los valores de NDVI. Asimismo, la vegetación alcanza un punto de saturación a partir del cual un incremento adicional en la disponibilidad hídrica no se traduce en un aumento del NDVI.

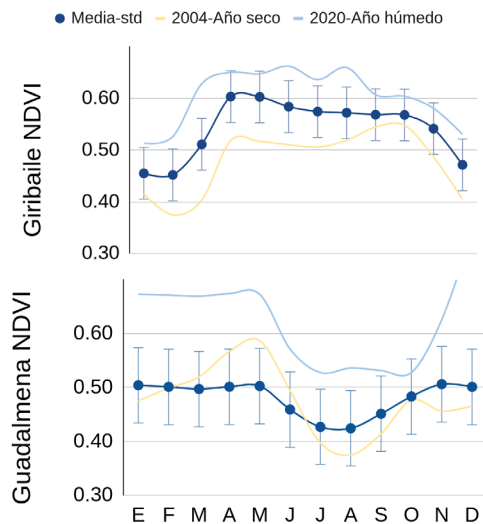


Figura 5. Comparación de la evolución estacional del valor medio (\pm desviación estándar) de NDVI a la salida de Giribaile y Guadalmena (Pre) con la del año seco de 2004 y la del año húmedo de 2020.

Los factores que afectan al estado de la vegetación de ribera muestran, además, retrasos temporales en su respuesta. El crecimiento y desarrollo de la vegetación dependen de los periodos de inundación y del nivel freático, y no únicamente del caudal instantáneo (Merritt *et al.*, 2010). Las especies leñosas, además, suelen presentar una respuesta más lenta y sostenida a los cambios en el régimen de caudal. Esto refuerza la necesidad de considerar el efecto acumulado de periodos prolongados de caudal reducido, más allá de los eventos puntuales. Sin embargo, no es fácil determinar qué factor influye de forma dominante en los cambios observados en los ciclos fenológicos ni cuál es su contribución individual. Es necesario analizar el efecto continuo de niveles de caudal reducidos para identificar posibles puntos de inflexión en la respuesta del NDVI, así como los periodos más adecuados para su monitorización. En este sentido, un análisis estadístico más detallado, que profundice en las interacciones entre el caudal y el NDVI y otras variables relevantes, como el momento fenológico de la vegetación, el nivel freático o los periodos de inundación, y que permita cuantificar la contribución relativa de cada uno de estos factores al mantenimiento del buen estado de la vegetación de ribera, constituye una línea de investigación futura necesaria.

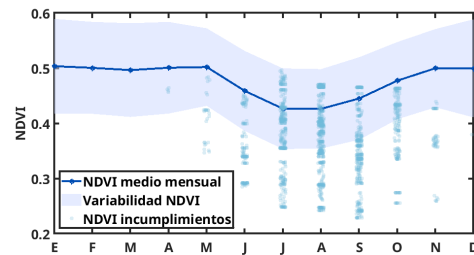


Figura 6. Densidad de valores de NDVI asociados al incumplimiento del supuesto B para todo el periodo estudiado respecto de la media de NDVI en la entrada del embalse del Guadalmena.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que la evaluación de los caudales ecológicos basada exclusivamente en umbrales hidrológicos fijos presenta limitaciones en ríos mediterráneos regulados. La integración de indicadores derivados de información remota complementa la evaluación tradicional, aportando información directa y actualizada sobre la respuesta ecológica. Así, la monitorización del NDVI podría ser un indicador para activar mecanismos de alarma en aquellos casos en los que se aleje de la horquilla local, complementando de forma efectiva los sistemas de monitoreo de la DMA. No obstante, la relación entre el caudal y el NDVI es compleja, no lineal y modulada por otros factores. Aunque la resolución espacial de Landsat captura patrones generales, futuros trabajos explorarán información con mayor detalle para mejorar la representación y analizar los efectos de escala.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la subvención RYC2022-035320-I, y es parte del proyecto TED2021-130937A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “Next GenerationEU” /PRTR .

6. REFERENCIAS

- Ivits, E., Cherlet, M., Mehl, W., & Sommer, S. (2009). Estimating the ecological status and change of riparian zones in Andalusia assessed by multi-temporal AVHRR datasets. *Ecological Indicators*, 9(3), 422–431.
- Merritt, D. M., Scott, M. L., Poff, N. L., Auble, G. T., & Lytle, D. A. (2010). Theory and tools for determining environmental flows for riparian vegetation. *Freshwater Biology*, 55(1), 206–225.
- Meztger, G., González del Tánago, M., De Stefano, L. Environmental flows and the mitigation of hydrological alteration downstream from dams: The Spanish case. *Journal of Hydrology*, 598 (2021).
- Wu, C., Webb, J. A., & Stewardson, M. J. (2022). Modelling Impacts of Environmental Water on Vegetation of a Semi-Arid Floodplain–Lakes System Using 30-Year Landsat Data. *Remote Sensing*, 14(3), 708.