

Xanxo Prilló, R.; Román Vázquez, A.; Tovar Sánchez, A.; Navarro Almendros, G. Modelos de IA para la detección y cuantificación de lodos post-DANA en Valencia mediante imágenes de dron y satélite

# Modelos de IA para la detección y cuantificación de lodos post-DANA en Valencia mediante imágenes de dron y satélite

Xanxo Prilló, Rox <sup>1</sup> Román Vázquez, Alejandro <sup>1</sup> Tovar Sánchez, Antonio <sup>1</sup> Navarro Almendros, Gabriel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España

ORCID: Xanxo Prilló [0009-0004-2154-1233](https://orcid.org/0009-0004-2154-1233) Román Vázquez [0000-0002-8868-9302](https://orcid.org/0000-0002-8868-9302) Tovar Sánchez [0000-0003-4375-1982](https://orcid.org/0000-0003-4375-1982)  
Navarro Almendros [0000-0002-8919-0060](https://orcid.org/0000-0002-8919-0060)

Correspondencia: [roc.xanxo.prillo@csic.es](mailto:roc.xanxo.prillo@csic.es) [a.roman@csic.es](mailto:a.roman@csic.es) [a.tovar@csic.es](mailto:a.tovar@csic.es) [gabriel.navarro@csic.es](mailto:gabriel.navarro@csic.es)

## RESUMEN

El 29 de octubre de 2024, un episodio de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) provocó las inundaciones más catastróficas registradas en la historia reciente de España en la provincia de Valencia, causando más de 220 víctimas mortales y daños que superan los 13.000 millones de euros. Las aguas cargadas de sedimentos depositaron gruesas capas de lodo sobre extensas áreas urbanas y agrícolas, generando una urgente necesidad de cartografía rápida y precisa de las zonas afectadas. En este trabajo presentamos una metodología basada en modelos de inteligencia artificial (IA) para la detección y cuantificación de lodos, integrando datos multiespectrales de drones (sensor MicaSense RedEdge-MX de 10 canales) con imágenes del satélite Sentinel-2 MSI. Se implementa un flujo de trabajo basado en el algoritmo XGBoost en dos etapas: primero, una clasificación supervisada de alta resolución sobre ortomosaicos de dron para discriminar las clases lodo-tierra, urbano, vegetación y agua; y segundo, un modelo de escalado (upscaling) que transfiere estas clasificaciones centimétricas a la resolución de Sentinel-2 (10 m/px), utilizando bandas espectrales e índices normalizados como variables predictoras y coberturas fraccionarias como variable objetivo. Se incorpora además el índice FMI (Flood Mud Index), diseñado específicamente para la detección de lodos con alta carga de sedimentos, junto con una corrección del modelo mediante la base de datos de Microsoft Building Footprint. Los resultados preliminares muestran estadísticos robustos de clasificación tanto a escala local (dron) como regional (satélite), demostrando el potencial de esta aproximación para la gestión de emergencias ambientales.

**Palabras clave:** DANA; Drones; Sentinel-2; XGBoost; Detección de lodos

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

# Modelos de IA para la detección y cuantificación de lodos post-DANA en Valencia mediante imágenes de dron y satélite

Xanxo Prilló, Roc <sup>(1)</sup>, Román Vázquez, Alejandro <sup>(1)</sup>, Tovar Sánchez, Antonio <sup>(1)</sup>, Navarro Almendros, Gabriel <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC), España.

 0009-0004-2154-1233, [roc.xanxo.prillo@csic.es](mailto:roc.xanxo.prillo@csic.es);  0000-0002-8868-9302, [a.roman@csic.es](mailto:a.roman@csic.es)  
 0000-0003-4375-1982, [a.tovar@csic.es](mailto:a.tovar@csic.es);  0000-0002-8919-0060, [gabriel.navarro@csic.es](mailto:gabriel.navarro@csic.es).

**Resumen:** El 29 de octubre de 2024, un episodio de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) provocó las inundaciones más catastróficas registradas en la historia reciente de España en la provincia de Valencia, causando más de 220 víctimas mortales y daños que superan los 13.000 millones de euros. Las aguas cargadas de sedimentos depositaron gruesas capas de lodo sobre extensas áreas urbanas y agrícolas, generando una urgente necesidad de cartografía rápida y precisa de las zonas afectadas. En este trabajo presentamos una metodología basada en modelos de inteligencia artificial (IA) para la detección y cuantificación de lodos, integrando datos multispectrales de drones (sensor MicaSense RedEdge-MX de 10 canales) con imágenes del satélite Sentinel-2 MSI. Se implementa un flujo de trabajo basado en el algoritmo XGBoost en dos etapas: primero, una clasificación supervisada de alta resolución sobre ortomosaicos de dron para discriminar las clases lodo-tierra, urbano, vegetación y agua; y segundo, un modelo de escalado (upscaling) que transfiere estas clasificaciones centimétricas a la resolución de Sentinel-2 (10 m/px), utilizando bandas espectrales e índices normalizados como variables predictoras y coberturas fraccionarias como variable objetivo. Se incorpora además el índice FMI (Flood Mud Index), diseñado específicamente para la detección de lodos con alta carga de sedimentos, junto con una corrección del modelo mediante la base de datos de Microsoft Building Footprint. Los resultados preliminares muestran estadísticos robustos de clasificación tanto a escala local (dron) como regional (satélite), demostrando el potencial de esta aproximación para la gestión de emergencias ambientales.

**Palabras clave:** DANA; Drones; Sentinel-2; XGBoost; Detección de lodos.

## ***Artificial Intelligence Applied to Drones: Upscaling vs Super-Resolution in the Study of Coastal Systems***

**Abstract:** On October 29, 2024, a cut-off low system (DANA) triggered the most catastrophic flooding in Spain's recent history in the province of Valencia, causing over 220 fatalities and more than €13 billion in damages. Sediment-laden floodwaters deposited thick layers of mud across extensive urban and agricultural areas, creating an urgent need for rapid and accurate mapping. This study presents an artificial intelligence (AI)-based methodology for mud detection and quantification, integrating multispectral drone data (10-channel MicaSense RedEdge-MX sensor) with Sentinel-2 MSI satellite imagery. We implement a two-stage XGBoost-based workflow: first, a high-resolution supervised classification on drone orthomosaics to discriminate mud, no-mud, and water classes; and second, an upscaling model that transfers centimeter-scale classifications to Sentinel-2 resolution (10 m/px), using spectral bands and normalized indices as predictors and fractional coverages as the target variable. The recently proposed Flood Mud Index (FMI), specifically designed for detecting sediment-laden flooded areas, is also incorporated as an input feature, alongside a model correction using the Microsoft Building Footprint database. Preliminary results show robust classification statistics at both local (drone) and regional (satellite) scales, demonstrating the potential of this approach for environmental emergency management.

**Keywords:** DANA; Drones; Sentinel-2; XGBoost; Mud detection.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más devastadores a escala global, causando daños generalizados en vidas humanas, medios de

subsistencia e infraestructuras (Jonkman y Vrijling, 2008). En las últimas décadas, la frecuencia e intensidad de estos eventos se ha incrementado, impulsada en parte por el cambio climático que está generando episodios de precipitación cada vez más extremos

(Tabari, 2020). En este contexto, el 29 de octubre de 2024, un sistema de DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) provocó las inundaciones más catastróficas registradas en la historia reciente de España en la provincia de Valencia, con precipitaciones que superaron los 500 mm en apenas 8 horas en localidades como Chiva (AEMET, 2024). El evento causó más de 220 víctimas mortales, el desplazamiento de 15.000 personas y daños estimados en más de 13.000 millones de euros (Castro-Melgar *et al.*, 2025).

Una característica particularmente relevante de este evento fue la enorme cantidad de sedimentos transportados por las aguas, que depositaron grandes cantidades de lodo sobre extensas áreas urbanas y agrícolas, así como en garajes de la población. La cartografía rápida y precisa de estas zonas afectadas resulta esencial para la coordinación de las labores de emergencia, la estimación de daños y la planificación de la recuperación. Las tecnologías de teledetección, tanto satelital como con drones, se han convertido en herramientas indispensables para la monitorización de inundaciones (Notti *et al.*, 2018; Román *et al.*, 2025). No obstante, la detección de áreas cubiertas de lodo presenta retos específicos, ya que los índices espectrales tradicionales como el NDWI (McFeeters, 1996) están diseñados para detectar masas de agua limpia y fallan al identificar zonas con alta turbidez y carga de sedimentos (Alcaras, 2025).

Recientemente, Alcaras (2025) propuso el Flood Mud Index (FMI), un nuevo índice espectral basado únicamente en las bandas roja y azul, específicamente diseñado para detectar áreas inundadas con alta carga de sedimentos, obteniendo una precisión global del 97,86% sobre imágenes Landsat 8 del evento de Valencia. Por otra parte, aproximaciones recientes basadas en aprendizaje automático, como las desarrolladas por Román *et al.* (2026) en el estudio de sistemas costeros, han demostrado el potencial de combinar datos de alta resolución espacial procedentes de drones con observaciones satelitales de Sentinel-2 mediante modelos de escalado (upscaling) basados en XGBoost (Chen y Guestrin, 2016).

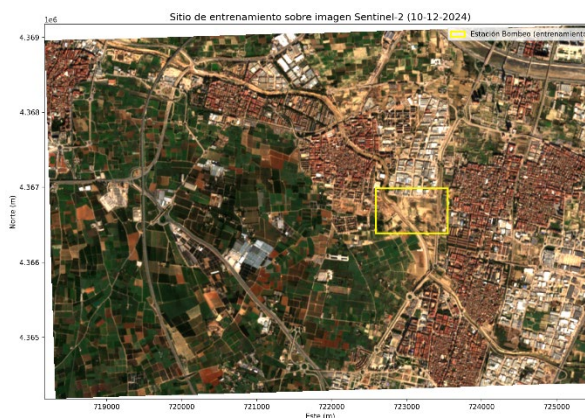
El presente estudio implementa una metodología de escalado dron-satélite al contexto específico de la detección de lodos post-DANA. El objetivo principal es desarrollar un flujo de trabajo basado en IA que integre datos multiespectrales de drones y Sentinel-2 para generar cartografía rápida y precisa de las zonas afectadas por depósitos de lodo, a múltiples escalas espaciales utilizando la información espectral recolectadas durante el evento de la DANA.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la comarca de l'Horta Sud, en la provincia de Valencia (España), una de las zonas más afectadas por las inundaciones de la DANA de octubre de 2024 (Figura 1). Esta región se sitúa en la confluencia de las cuencas de los ríos Turia y Júcar, e incluye la llanura costera que se extiende hasta la Albufera, una laguna litoral de gran importancia

ecológica. La zona seleccionada comprende municipios severamente dañados como Paiporta, Catarroja, Massanassa y Sedaví, donde las aguas cargadas de sedimentos procedentes de los barrancos del Poyo y del Magro depositaron capas de lodo de espesor variable sobre calles, edificios y parcelas agrícolas.



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio. El rectángulo amarillo representa el vuelo de dron multiespectral para la zona de entrenamiento (Estación de bombeo). El fondo es la imagen Sentinel-2 para el día 10/12/2024.

## 2.2. Datos de teledetección

### 2.2.1. Datos de dron

Se empleó un multirrotores DJI Matrice 300 RTK equipado con el sensor multiespectral de 10 canales MicaSense RedEdge-MX Dual, cuyas bandas cubren desde el azul (444 nm) hasta el infrarrojo cercano (842 nm). Los vuelos se realizaron sobre las zonas afectadas en las semanas posteriores al evento, a una altitud de 120 m, alcanzando un GSD medio de 8,2 cm/px. Los mapas de reflectancia (dimensional, 0-1) fueron generados con el software Pix4D Mapper, aplicando la calibración radiométrica mediante panel de referencia y DLS.

### 2.2.2. Datos del satélite Sentinel-2

Se descargaron imágenes Sentinel-2 MSI BOA (Bottom of Atmosphere) armonizadas y remuestreadas a 10 m/px, adquiridas en fechas próximas a los vuelos de dron, a través de Google Earth Engine. Las bandas seleccionadas fueron equivalentes en longitud de onda ( $\pm 10$  nm) a las del sensor MicaSense, siguiendo la metodología descrita en Román *et al.* (2026). Se emplearon escenas pre-evento (octubre 2024, antes del día 29) y post-evento (30–31 de octubre y semanas sucesivas) para el análisis bitemporal.

## 2.3. Modelo de escalado

### 2.3.1. Clasificación a escala de dron

Se realiza una clasificación supervisada sobre los ortomosaicos multiespectrales de dron empleando el algoritmo XGBoost (Chen y Guestrin, 2016). Las clases objetivo definidas son: lodo-tierra, no-lodo (superficies no afectadas, incluyendo vegetación, suelo expuesto y superficies urbanas) y agua. Como variables predictoras se emplean las 10 bandas espectrales del sensor MicaSense junto con índices espectrales derivados,

incluyendo el NDVI, el NDWI (McFeeters, 1996) y el FMI (Alcaras, 2025), calculado según la Ecuación 1:

$$FMI = (RED - BLUE) / (RED + BLUE) \quad (1)$$

### 2.3.2. Modelo de escalado dron-satélite

Para la generación de predicciones escaladas de cada clase de cobertura de lodo-tierra, se emplea un segundo flujo XGBoost que toma como entradas las bandas espectrales e índices normalizados de Sentinel-2, y como salida los porcentajes de cobertura fraccionaria obtenidos al agregar las clasificaciones de dron dentro de cada píxel de Sentinel-2. XGBoost minimiza la función objetivo regularizada (Eq. 2):

$$L(\varnothing) = \sum l(y_i, \hat{y}_i) + \sum \Omega(f_k) \quad (2)$$

El modelo de salida múltiple predice simultáneamente las tres clases de cobertura, normalizando las predicciones para que sumen 100%. Se entrena un ensamble de 20 particiones 70/30 para cuantificar la incertidumbre asociada a las predicciones.

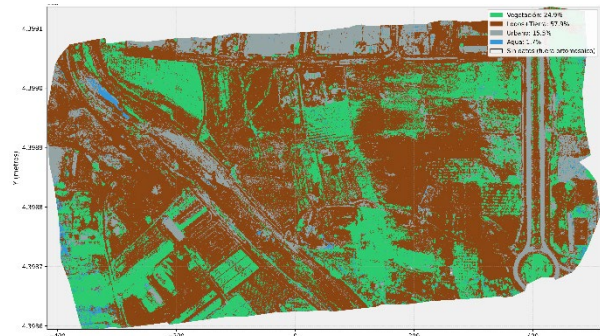
### 2.3.4 Corrección del modelo de escalado con la integración de datos Microsoft Building Footprint

La comparación entre imágenes satelitales y el modelo de escalado evidenció una sobreestimación de la cobertura de lodos-tierra y una infraestimación de áreas urbanas, especialmente edificaciones. Este sesgo se debió a que la zona de entrenamiento (estación de bombeo) carecía de edificios, predominando polígonos industriales, lo que provocó una clasificación errónea al aplicar el modelo en la zona de estudio. Para corregirlo, se incorporó la base de datos Microsoft Building Footprint, generando una máscara aplicada al resultado previo. Esta se utilizó para reentrenar el modelo, ampliando la representación espectral de la clase urbana y optimizando el desempeño del modelo XGBoost.

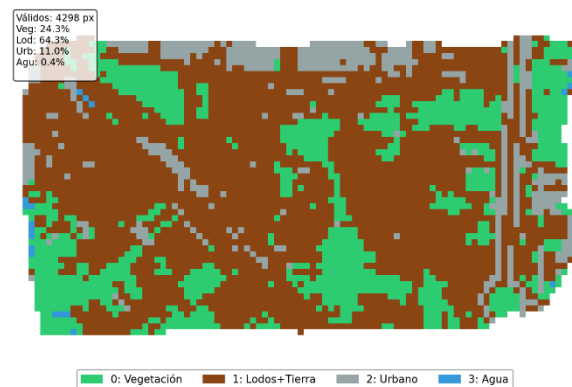
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación supervisada XGBoost sobre los ortomosaicos de dron (Figura 2) arrojó estadísticos robustos, con una precisión global OA = 91% y un índice kappa = 0,85. El modelo permitió discriminar eficazmente las tres clases objetivo en la zona de estudio. Los depósitos de lodo-tierra presentaron una firma espectral característica, con alta reflectancia en la banda roja y valores notablemente inferiores en el azul, lo que confirma la utilidad del FMI como variable predictora clave. La banda roja-650 resultó ser la variable con mayor importancia relativa en el modelo, seguidas del índice NDVI y la banda roja-705.

La clasificación a escala de dron reveló que la cobertura de lodo-tierra en la zona estudiada alcanzaba aproximadamente el 65% (2764 px) de la superficie total, concentrándose principalmente en las áreas urbanas y periurbanas próximas a los cauces de los barrancos, mientras que las zonas agrícolas presentaban una distribución más heterogénea con mezcla de lodo-tierra, suelo húmedo y agua residual.



**Figura 2.** Resultado de la clasificación supervisada del modelo XGBoost para la zona de entrenamiento (Estación Bombeo).

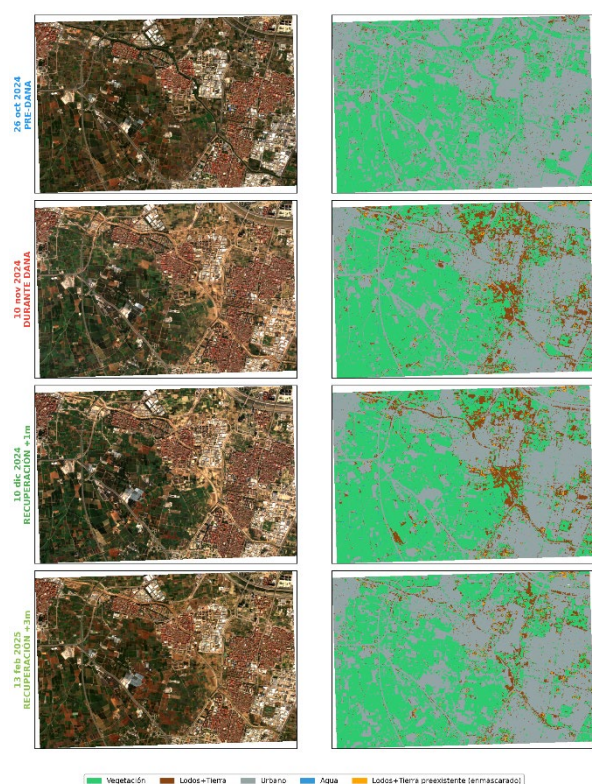


**Figura 3.** Reescalado a 10m de la clasificación supervisada para la zona de entrenamiento (Estación Bombeo).

Tras la aplicación del modelo de escalado a Sentinel-2 (Figura 3), se obtuvieron mapas de cobertura de lodo-tierra a 10 m/px que cubren toda el área metropolitana de Valencia (Figura 4). Como era esperable, el análisis estadístico muestra valores algo inferiores a los obtenidos con el dron (OA = 0,79 y kappa = 0,66), lo cual es consistente con los resultados reportados por Román *et al.* (2026) para la clasificación de coberturas costeras. Adicionalmente, con la corrección mediante los datos Microsoft Building Footprint se permitió reducir la confusión sistemática entre lodos y edificaciones, incrementando la coherencia espacial de la clase urbana y mejorando la exactitud global del modelo enriquecido (OA = 0,90 y kappa = 0,83). Este método demuestra ser rápido y eficiente, ya que no depende de la selección manual de regiones de entrenamiento sobre cada escena satelital, sino que transfiere el conocimiento adquirido a escala centimétrica con el dron.

La comparación con los resultados del FMI aplicado directamente sobre Sentinel-2 y Landsat 8 (Alcaras, 2025) muestra una elevada concordancia espacial entre ambos métodos, si bien el enfoque de escalado con XGBoost proporciona información cuantitativa adicional al generar porcentajes de cobertura fraccionaria de lodo-tierra dentro de cada píxel, lo que resulta especialmente útil para estimar volúmenes de sedimentos acumulados. Además, la incorporación de las bandas del infrarrojo cercano del sensor MicaSense permite detectar variaciones en el contenido de humedad de los lodos, una información crítica para la planificación de las labores de limpieza y retirada de escombros.

Una limitación del presente estudio es que los vuelos de dron se realizaron en las semanas posteriores al evento, cuando parte del lodo ya había sido retirado de determinadas zonas urbanas. Para tratar de solucionarlo, se aplicó una máscara de lodos-tierra a partir de la clasificación de los 3 días previos a la DANA (Figura 4, primera fila), separando los depósitos preexistentes (89,7 ha, entre un 7–15% del total detectado) de los atribuibles al evento. La atribución es más fiable entre noviembre 2024 y marzo 2025, ya que a partir de abril la actividad agrícola introduce suelo desnudo espectralmente similar al lodo a 10 m de resolución. Trabajos futuros contemplarán la aplicación de técnicas de super-resolución (SR) mediante redes generativas antagonistas (GAN), como las evaluadas por Román *et al.* (2026), que podrían mejorar la resolución espacial de las observaciones de Sentinel-2 hasta 1 m/px, así como la integración de datos SAR de Sentinel-1 para cubrir períodos con cobertura nubosa persistente.



**Figura 4.** Imágenes RGB (izd) y clasificación final (dcha) para diferentes días de estudio.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto el potencial de integrar herramientas de IA, en particular el algoritmo XGBoost, con datos de teledetección multiescala procedentes de drones y satélites para la detección y cuantificación de lodos en el contexto de emergencias por inundaciones. La metodología de escalado dron-satélite permite transferir clasificaciones de alta resolución a la escala regional de Sentinel-2, generando cartografía operativa útil para la gestión de la emergencia. La incorporación del FMI como variable predictora mejora significativamente la capacidad del modelo para discriminar zonas con alta carga de

sedimentos frente a otros tipos de cobertura. Esta aproximación, desarrollada en el marco del proyecto DANADRON, sienta las bases para un sistema de monitorización rápido y escalable que podría aplicarse a futuros eventos similares en el Mediterráneo y otras regiones susceptibles de inundaciones con alto transporte de sedimentos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible gracias a los proyectos DANADRON (PIE 202430E238) y DIGIDRON (MMT24-ICMAN-01). R. Xanxo-Prilló está contratado bajo la modalidad EMPJOV25\_ICMAN\_M2\_C\_137. A. Román, personal contratado bajo la iniciativa Generación D, promovida por Red.es, organismo adscrito al MTDFP, destinada a la atracción y retención de talento mediante becas y contratos de formación, financiada por el PRTR a través de los fondos Next Generation de la UE.

#### 6. REFERENCIAS

- AEMET (2024). Informe sobre el episodio meteorológico de precipitaciones torrenciales y persistentes ocasionadas por una DANA el día 29 de octubre de 2024. Agencia Estatal de Meteorología, Gobierno de España.
- Alcaras, E. (2025). Flood Mud Index (FMI): A Rapid and Effective Tool for Mapping Muddy Areas After Floods—The Valencia Case. *Remote Sensing*, 17(5), 770. <https://doi.org/10.3390/rs17050770>
- Castro-Melgar, I., Falaras, T., Basiou, E., y Parcharidis, I. (2025). Assessment of the October 2024 Cut-Off Low Event Floods Impact in Valencia (Spain) with Satellite and Geospatial Data. *Remote Sensing*, 17(13), 2145. <https://doi.org/10.3390/rs17132145>
- Chen, T., y Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. En *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Jonkman, S. N., y Vrijling, J. K. (2008). Loss of life due to floods. *Journal of Flood Risk Management*, 1, 43–56. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00006.x>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Notti, D., Giordan, D., Caló, F., Pepe, A., Zucca, F., y Galve, J. P. (2018). Potential and limitations of open satellite data for flood mapping. *Remote Sensing*, 10, 1673. <https://doi.org/10.3390/rs10111673>
- Román, A., Tovar-Sánchez, A., Xanxo, R., Vázquez, A., y Navarro, G. (2026). Inteligencia Artificial Aplicada a los Drones: Escalado vs Super-Resolución en el Estudio de Sistemas Costeros. En *Actas del XXI Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, Cáceres, España.
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10, 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>