

HERRAMIENTAS DE TELEDETECCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS SOBRE LA COSTA

Mar ROCA MORA¹, Gabriel NAVARRO ALMENDROS¹, Isabel CABALLERO
DE FRUTOS¹

¹*Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, ICMAN-CSIC. Avda. República
Saharaui, 2, Puerto Real, 11510, Cádiz, España.*

mar.roca@csic.es, gabriel.navarro@icman.csic.es,
isabel.caballero@icman.csic.es

RESUMEN

El programa Copérnico y su segmento espacial de satélites Sentinel está revolucionando la forma de monitorizar nuestras costas. En este trabajo, presentamos cinco ejemplos de cómo usar el segmento espacial de *Copernicus*, y en concreto el satélite óptico Sentinel-2 para el estudio de procesos que ocurren en la costa provocados por fenómenos meteorológicos extremos. Este satélite nos permite analizar procesos costeros a una resolución espacial y temporal de 10-20-60 metros y 5 días, respectivamente. Para ello, hemos implementado una metodología para la corrección atmosférica con el fin de generar reflectancias de agua precisas utilizando el procesador ACOLITE, que se aplica en zonas de aguas complejas costeras e interiores. Además, se han usado diferentes algoritmos para analizar las consecuencias de procesos meteorológicos extremos en zonas costeras, tanto en ACOLITE como la plataforma de Google Earth Engine (GEE). En concreto, se presentan estudios relacionados con el impacto de la DANA de septiembre de 2019 en la zona del Mar Menor, la generación de mapas de inundación en el Delta del Ebro tras el paso de la tormenta Gloria en enero de 2020, la evolución espacio-temporal de la línea de costa asociada al clima marítimo y a las lluvias torrenciales, la aparición de floraciones algales nocivas en Filipinas y el impacto de los huracanes en la batimetría somera en la costa oriental de EE. UU. Este trabajo demuestra que los satélites Sentinel-2 son los nuevos ojos en las regiones costeras, lo que permitirá nuevos esfuerzos en la monitorización, detección de cambios y seguimiento de zonas costeras frente al impacto de fenómenos meteorológicos extremos.

Palabras clave: impactos costeros, tifones, clima marítimo, Sentinel-2, Google Earth Engine, teledetección.

ABSTRACT

The Copernicus programme and its Sentinel satellite space segment is revolutionizing the way we monitor our coasts. In this work, we present five examples of how to use the Copernicus space segment, and specifically the Sentinel-2 optical satellite for the study of processes that occur on the coast caused by extreme weather events. This satellite allows us to analyze coastal processes at a spatial and temporal resolution of

10-20-60-meter and 5-day at Equator, respectively. For this, we have implemented a methodology for atmospheric and sunglint correction in order to generate accurate water reflectances using the ACOLITE processor, which is applied in complex coastal and inland water areas. In addition, we have used different algorithms to analyze the consequences of extreme processes in coastal areas, both in ACOLITE and Google Earth Engine platform. Specifically, applied studies are presented related to the impact of the DANA in September 2019 in the Mar Menor area, the generation of flood maps in the Ebro delta after the Gloria storm in January 2020, the spatio-temporal evolution of the coastline associated with the maritime climate and torrential rains, the appearance of harmful algal blooms in the Philippines, and the impact of hurricanes on shallow bathymetry off the US East Coast. This work demonstrates that the Sentinel-2 satellites are the new eyes in coastal regions, which will enable new efforts in monitoring, change detection and mapping of coastal areas in the face of the impact of extreme weather events.

Key words: coastal impacts, typhoons, maritime climate, Sentinel-2, Google Earth Engine, remote sensing.

1. INTRODUCCIÓN

La Comisión Europea ha iniciado una nueva era en la Observación de la Tierra con el ambicioso programa *Copernicus* y su segmento espacial de satélites Sentinel. *Copernicus* ofrece un conjunto de servicios clave (atmósfera, mar, tierra, cambio climático, emergencias y seguridad) para una multitud de aplicaciones medioambientales que se enfrentan a los desafíos del cambio global y la necesidad de gestionar el medio ambiente de manera más eficaz.

En concreto, para el estudio de procesos costeros y marinos, los satélites Sentinel-1 (S1) con el sensor radar, Sentinel-2 (S2) y Sentinel-3 (S3) son de gran utilidad. Existe un gran potencial en los sensores *Ocean and Land Color Instrument* (OLCI) y *Multispectral Instrument* (MSI) a bordo de los satélites Sentinel-3 A/B y Sentinel-2 A/B, respectivamente, para la monitorización de regiones costeras ante eventos meteorológicos extremos, como Depresiones Aisladas de Niveles Altos (DANAs), tifones, huracanes o el clima marítimo.

La misión S2 actualmente beneficia a los servicios y aplicaciones de cartografía, como la cartografía de riesgos (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>). La constelación S2 puede conducir a una nueva era en la cartografía costera con una recopilación de datos mejorada debido a su frecuencia de adquisición de 5 días en el ecuador (más frecuente en latitudes más altas donde las franjas se superponen parcialmente), la alta resolución espacial de 10-20-60 m, y su política de acceso libre y gratuito (Bergsma y Almar, 2020). Hasta la misión Sentinel-2, la cobertura satelital global de alta resolución era poco frecuente, representando hoy en día una solución atractiva para la evaluación de los impactos costeros derivados de eventos meteorológicos extremos a escala local.

Los métodos de evaluación y seguimiento in-situ son tareas costosas económica y logísticamente, ofreciendo una visión parcial ante eventos meteorológicos extremos que ocurren a gran escala y que cada vez son más frecuentes y destructivos debido al

cambio climático. Para el estudio de estos fenómenos, la teledetección es una herramienta muy poderosa que permite obtener una visión sinóptica completa, a gran resolución, de forma continuada y gratuita. Existe un abanico de eventos meteorológicos extremos como los tifones o los huracanes, que pueden cambiar, por ejemplo, la morfología del fondo marino somero. Los mapas batimétricos de alta resolución representan un conjunto de datos fundamental para comprender los impactos y peligros producidos por el cambio climático, las tendencias de erosión y el aumento del nivel del mar (Spalding et al., 2014).

En este estudio se muestran cinco casos de estudio de cómo los efectos meteorológicos extremos afectan a diferentes procesos costeros y cómo pueden ser monitorizados a través de técnicas de teledetección utilizando imágenes de S2: 1) efectos de la DANA de 2019 en el Mar Menor; 2) cuantificación de inundaciones tras el temporal Gloria en el Delta del Ebro; 3) estudio de la desembocadura del río Guadiaro afectada por el clima marítimo; 4) detección de Floraciones Algales Nocivas (FANs) en Filipinas tras el paso de dos tifones en 2020; y 5) extracción de batimetría derivada de satélite (SDB, del inglés) en EE. UU. tras el paso del huracán Florence en 2018. Estos casos de estudio son ejemplos de cómo afecta este fenómeno global, y cómo la teledetección y la misión S2 permite abordar estos procesos en alta resolución gracias a su cobertura mundial, permitiendo desarrollar herramientas de apoyo operacional y la monitorización costera ante eventos meteorológicos extremos.

2. MÉTODOLÓGÍA

2.1. Zonas de estudio

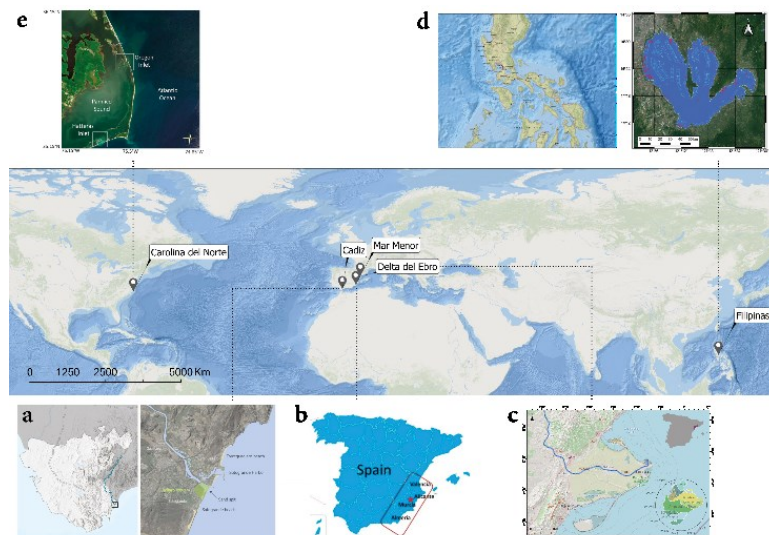


Fig. 1: Regiones de estudio de eventos meteorológicos extremos. (a) San Roque, Cádiz (España); (b) regiones de Murcia y sur de Alicante (España); (c) Delta del Ebro, Tarragona (España); (d) Laguna Lake (Filipinas); (e) ensenadas de Hatteras y Oregon, Carolina del Norte (EE. UU.).

Las cinco regiones de estudio comprendidas en este trabajo (Fig. 1) están ubicadas tres de ellas en la costa española (Cádiz, Murcia/Alicante y Tarragona), asociadas a

eventos de DANA y clima marítimo, la cuarta en Filipinas (*Laguna Lake*) para el estudio de dos tifones y la última en la costa de Carolina del Norte (EE. UU.), donde se estudió el efecto de un huracán.

2.2. Obtención y procesamiento de imágenes de satélite

Las imágenes procesadas en este estudio corresponden a imágenes S2 A/B Level-1 C (L1C) y Level-2A (L2A) (10 metros de resolución espacial y 5 días de resolución temporal) del programa europeo Copernicus, con las fechas que se indican en las figuras del apartado de resultados.

Las imágenes L1C fueron descargadas del Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) y fueron corregidas atmosféricamente y procesadas a nivel L2A ACOLITE (<https://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite>), utilizando el algoritmo del modelo *Dark Spectrum Fitting* (DSF) (Vanhellamont y Ruddick, 2018; Vanhellamont, 2019). Con este programa también se generaron los productos de material total en suspensión (TSM, g/m³) (Nechad et al., 2010), como se observa en la Fig. 2, así como la SDB con las bandas del azul (490 nm) y el rojo (665 nm), siendo las que mejor funcionan para batimetrías someras (<7 metros) (Caballero y Stumpf, 2019).

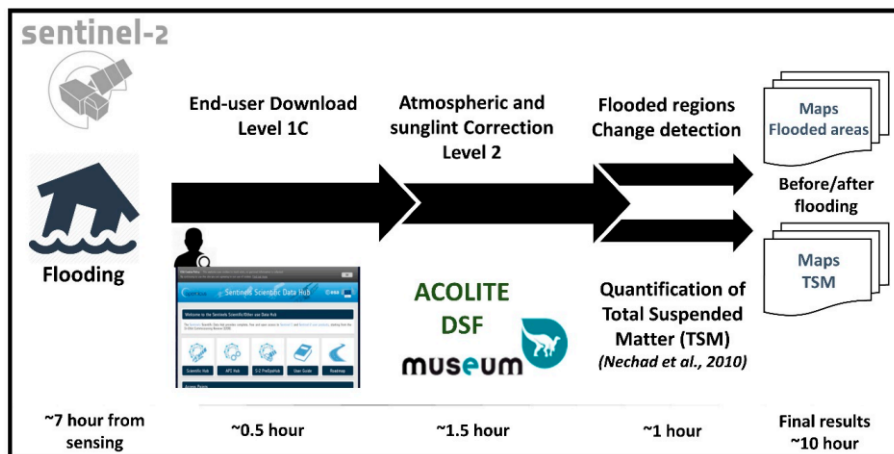


Fig. 2: Diagrama del flujo de trabajo con imágenes Sentinel-2 L1C y ACOLITE.
Fuente: Caballero y Navarro, 2019.

Los casos de estudio del Delta del Ebro, el río Guadiaro (Roca et al., 2022) y Filipinas (Caballero y Navarro, 2021) se desarrollaron utilizando imágenes S2 L2A, ya atmosféricamente corregidas, y se procesaron en la plataforma de Google Earth Engine (GEE). Para los dos primeros casos, se aplicó el *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (1) con el fin de diferenciar zonas de tierra y agua (Roca et al., 2022). En el caso de Filipinas (Caballero y Navarro, 2021), para detectar la evolución de las FANs antes y después de los tifones, se aplicó el índice normalizado de clorofila (*Normalized Difference Chlorophyll Index*, NDCI) (2) descrito por Mishra y Mishra (2012), un algoritmo validado utilizando productos satelitales en zonas costeras.

$$NDWI = \frac{Rrs559 - Rrs864}{Rrs559 + Rrs864} \quad (1)$$

$$NDCI = \frac{Rrs708 - Rrs665}{Rrs708 + Rrs665} \quad (2)$$

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los cinco casos de estudio asociados a cada evento meteorológico extremo con imágenes S2: Mar Menor, Delta del Ebro, Cádiz, Filipinas y Carolina del Norte.

3.1. Mar Menor: DANA

Las imágenes de S2 procesadas para la zona del Mar Menor antes (Fig. 3a) y después (Fig. 3b) de la DANA de mayor magnitud en los últimos 140 años, muestran las zonas afectadas de la región de interés indicada en la Fig. 3b, lo que resultó en un área inundada tras la DANA de 1307 ha (e). Este fenómeno dañó las tierras de cultivo, principalmente en la comarca de Los Alcázares (Fig. 3b), donde las precipitaciones excepcionales provocaron inundaciones generalizadas y daños en las tierras agrícolas, gran parte de ellas bajo convenios agroambientales.

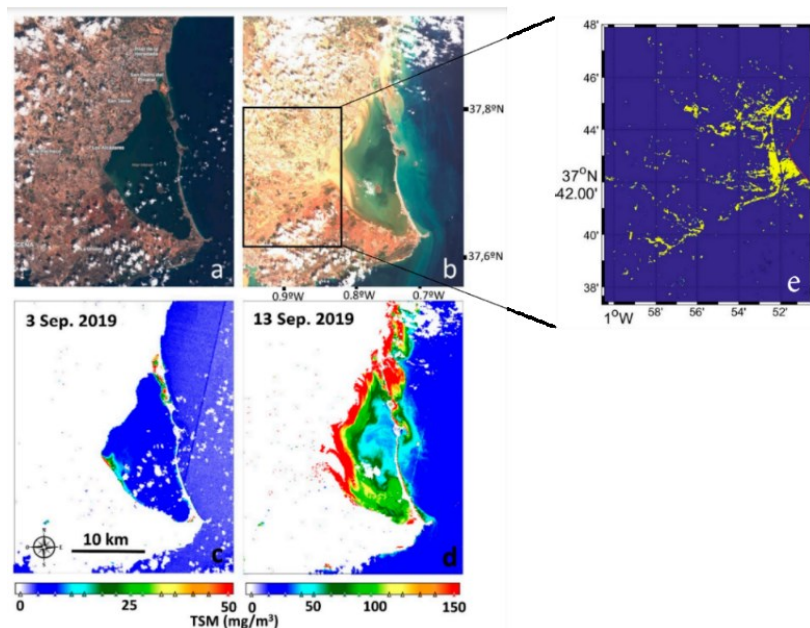


Fig. 3: Imágenes de S2 del Mar Menor antes y después de la inundación, Murcia (España). Composición RGB (a y b) y mapas de concentración de material en suspensión (TSM, mg/m^3) (c y d). Polígonos que cuantifican la zona inundada (e).

Fuente: Caballero y Navarro, 2019.

Además, S2 no solo identifica los impactos en tierra, sino también en el ecosistema acuático. Debido a la gran cantidad de sedimentos acumulados por la inundación, las regiones afectadas muestran un aumento extremo de TSM y niveles severos de turbidez (Fig. 3d), ya visibles en la imagen RGB (Fig. 3b), lo que lleva a la contaminación y deterioro de los ríos y la costa de las regiones adyacentes.

3.2. Delta del Ebro: Gloria

Los efectos del temporal Gloria en enero de 2020 se vieron notablemente reflejados en la inundación del Delta del Ebro. A través de aplicar el índice NDWI a imágenes S2 L2A en GEE se pudo cuantificar de forma muy precisa la cantidad de hectáreas afectadas por dicha inundación. El antes y después del Gloria puede observarse en la Fig. 4, donde el área inundada habitual se sitúa en 971,28 Has, mientras que tras el temporal el área inundada asciende a 7311,27 Has para la región de estudio, muy similar a los cálculos proporcionados a través del servicio Copernicus Emergency utilizando imágenes de satélites comerciales.

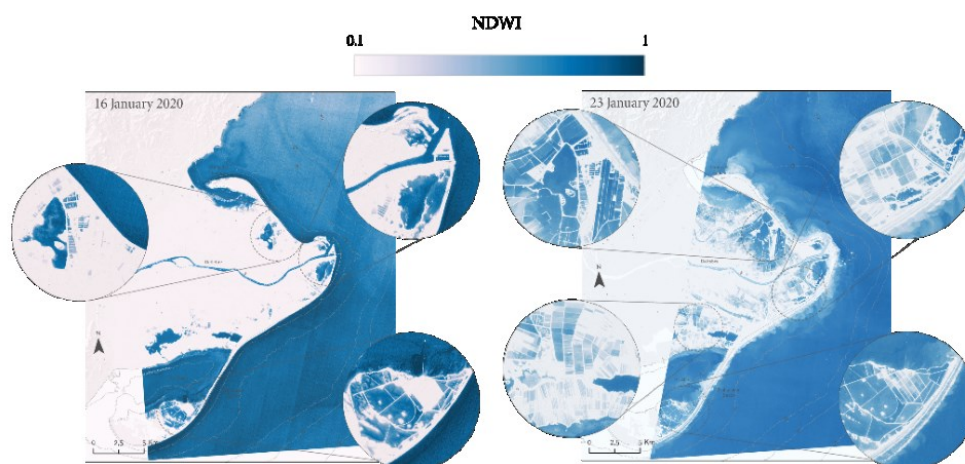


Fig. 4: Mapas de inundación del Delta del Ebro (Tarragona) de imágenes Sentinel-2 con NDWI aplicado en Google Earth Engine antes (16 enero 2020) y después (23 de enero 2020) de la tormenta Gloria.

Este caso de estudio muestra el potencial de S2 y GEE para la evaluación de daños ante eventos de DANA en zonas extremadamente vulnerables de la costa como es el Delta del Ebro. La revisita cada 5 días y la alta resolución espacial de 10 metros hace de S2 una fuente prometedora de información para monitorizar y desarrollar herramientas operacionales, así como para gestionar compensaciones parcelarias a posteriori. Sin embargo, en esta misma imagen se puede observar como limitación, dependiendo de cada zona de estudio, el corte de la imagen S2 de acuerdo con su trayectoria.

3.3. Estuario del río Guadiaro

En este caso de estudio se trabaja con más de 450 imágenes de S2 procesadas en la plataforma GEE, a través de la cual se generaron climatologías (medias de valores) anuales y estacionales. Mediante el uso del índice NDWI con un umbral de 0.1 se pudo determinar con precisión la cartografía tierra-agua, lo que permitió estudiar la variabilidad espacio-temporal de la barra de arena. La apertura y cierre de esta barra determina en muchas ocasiones eventos de eutrofización extrema en la zona del estuario, lo que desemboca ocasionalmente en mortandades masivas de flora y fauna. Este estudio permite observar la variabilidad de la barra de arena, sirviendo no solo

para monitorizar la desembocadura, sino también como herramienta operacional ante la necesidad de una apertura artificial inminente. En la Fig. 5 se muestran las climatologías anuales (2017-2020) para el área de estudio, observando de forma ampliada la zona de la desembocadura y la barra arenosa.

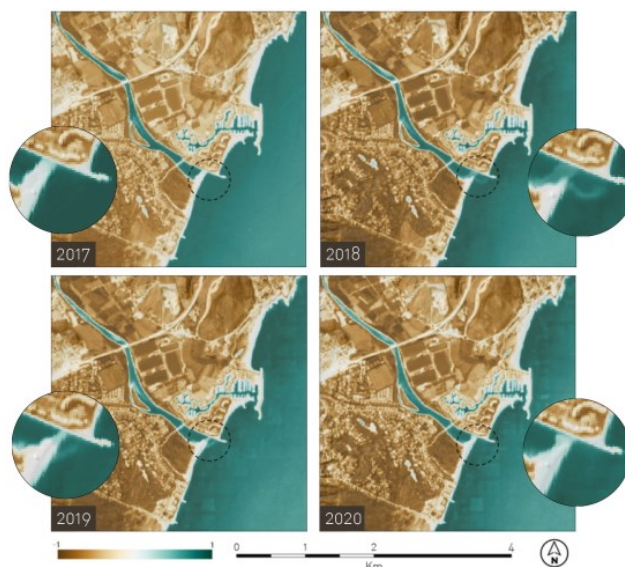


Fig. 5: Climatologías anuales (2017-2020) de imágenes Sentinel-2 con NDWI aplicada mediante Google Earth Engine en el estuario del río Guadiaro. Estudio de variabilidad espacio-temporal de la barra arenosa que abre y cierra la desembocadura. Fuente: Roca et al., 2022.

La variabilidad de esta barra arenosa, influenciada en gran parte por el clima marítimo, el oleaje y las descargas del río Guadiaro, determinan el nivel de salud del estuario. Esta herramienta proporciona información útil, rápida y continua para la toma de decisiones por parte de los gestores costeros tanto en la parte operacional como en la estratégica de evaluación de medidas adoptadas.

3.4. Filipinas: tifones

En Filipinas se estudiaron las FANs de cianobacterias ocurrida entre septiembre y noviembre de 2020, antes y después de dos tifones: tifón Goni y tifón Vamco. Tras aplicar el índice NDCI en imágenes S2, se observa cómo las zonas con elevadas densidades de cianobacterias en la laguna son perfectamente monitorizadas, como muestra la Fig. 6.

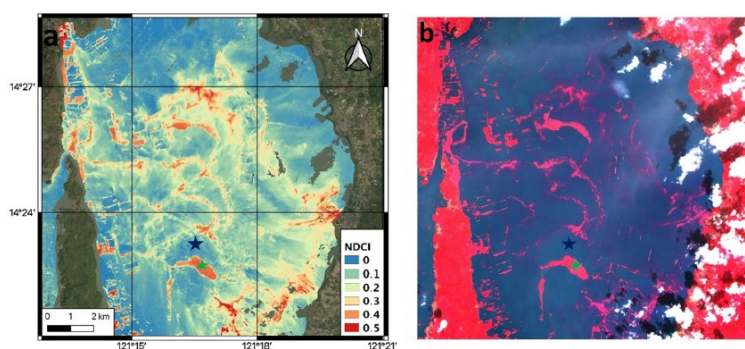


Fig. 6: Imagen procesadas de Sentinel-2 después (3 noviembre 2020) del tifón Goni en Laguna Lake con picos de cianobacterias (Filipinas). (a) NDCI; (b) falsa composición (NIR-Red-Green). Fuente: Caballero y Navarro, 2021.

Estos resultados nos ofrecen información sobre el potencial de S2 y la aplicación del índice NDCI para monitorizar floraciones de cianobacterias en lagunas de aguas confinadas en la plataforma de GEE.

3.5. Carolina del Norte: huracanes

Una de las dos zonas de estudio de cambios en la batimetría antes (2017) y después (2019) del huracán Florence es la ensenada de Hatteras (Carolina del Norte, EE. UU.). En la Fig. 7, se muestra la batimetría LiDAR (a y b) y SDB (c y d) antes y después del evento meteorológico extremo. El SDB proporcionó una buena precisión frente a los levantamientos LiDAR antes y después del huracán, con bias de 0,3 m y 0,27 m y un error medio de 0,59 m y 0,41 m, respectivamente, en los rangos de profundidad estudiados de 0 a 7 metros.

SDB cubrió un área más extensa y la composición de imágenes de S2 redujo los efectos de turbidez, lo que permitió una cobertura más completa dentro de la zona de estudio. Estos hallazgos confirman que SDB puede proporcionar información batimétrica válida sobre patrones de erosión/acreción, incluidos canales y estrechos relevantes para la navegación, cuyo procesamiento rutinario beneficia al LiDAR en una implementación más estratégica. La detección de cambios a partir de mapas batimétricos recursivos es esencial para documentar el estado y la variabilidad de las costas como resultado de tormentas y otros factores de forzamiento, así como el efecto de dichos cambios en los ecosistemas. Nuestros resultados destacan el aumento en la precisión, la cobertura espacial y la resolución de la valiosa información batimétrica generada con los satélites S2, que es crucial para comprender, abordar, predecir y, en última instancia, mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático presentes y futuros.

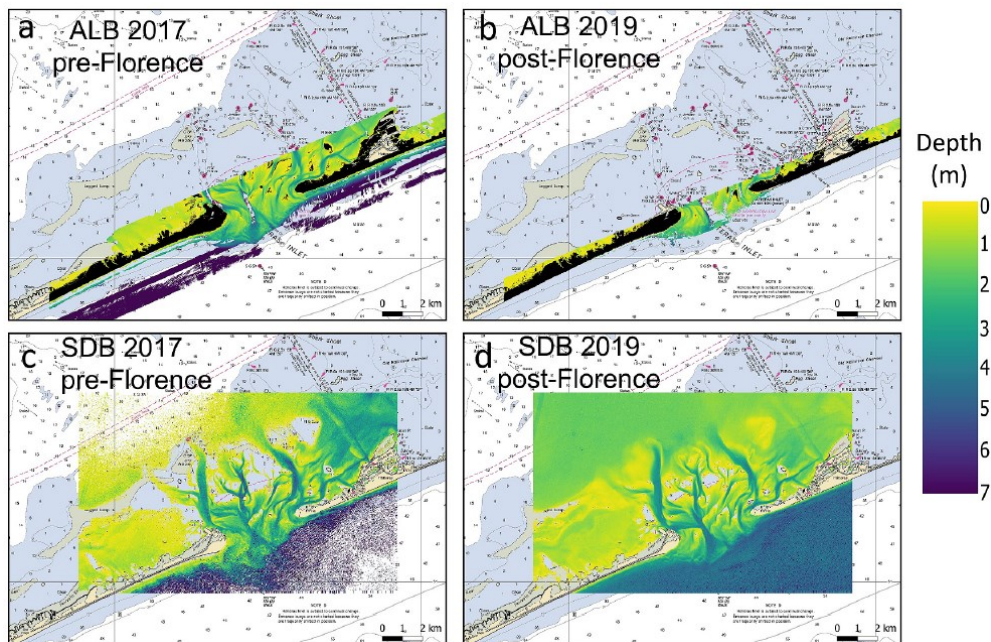


Fig. 7: Cartografía LiDAR (a y b) y cartografía SDB (c y d) sobre carta náutica de la NOAA (11555) antes y después del huracán Florence en la ensenada de Hatteras (EE. UU.). Fuente: Caballero y Stumpf, 2021.

4. DISCUSIÓN

Los satélites S2-A/B son una valiosa fuente de información espacio-temporal sinóptica que puede ser utilizada para generar una respuesta rápida ante catástrofes meteorológicas. Además, esta información es abierta y puede ser utilizada para monitorizar eventos meteorológicos extremos, tanto para conocer la calidad del agua, cuantificar hectáreas y parcelas afectadas por inundaciones, monitorizar desembocaduras de ríos, evaluar impactos de tifones y huracanes, así como seguir FANs y obtener batimetrías de alta resolución. En cuanto a este último caso, la SDB obtenida tuvo errores de menos de 1 m (y típicamente $<0,5$ m) para profundidades de 0 a 7 m, siendo muy adecuada para la monitorización recurrente de batimetría poco profunda tras un episodio de alta energía, debido a su gran área de cobertura y su alta resolución temporal.

Esta tecnología ofrece un recurso esencial y rentable que permite cuantificar los impactos de eventos meteorológicos extremos, así como contabilizar de forma objetiva las pérdidas y compensaciones. Esto puede aplicarse tanto en espacios antropizados como sobre los ecosistemas casi en tiempo real sin necesidad de realizar campañas de campo en condiciones de tormenta, aportando información para diseñar planes de mitigación ante eventos futuros.

Las herramientas abiertas que pueden desarrollarse a través de plataformas como GEE ayudan a generar estrategias de monitorización, sistemas de alerta temprana ante catástrofes meteorológicas, además de a generar una base sólida de información para determinar si estos eventos tienen o no una componente climática. Toda esta información puede ser utilizada para la toma de decisiones en la gestión de

emergencias y la gestión costera, tanto en la vía operacional como en la estratégica, pudiendo reevaluar acciones desarrolladas a medio y largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al programa Copérnico y a la plataforma GEE por proporcionar un acceso libre a imágenes Sentinel-2 y a la potente plataforma de procesamiento de imágenes satélite. Este estudio ha sido financiado por los proyectos PY20-00244 y RTI2018-098784-J-I00, y por los contratos FPU20/01294 y IJC2019-039382-I. Este trabajo representa una contribución a la Plataforma Temática Interdisciplinar (PTI) del CSIC PTI TELEDETECT.

REFERENCIAS

- Bergsma, E.W. y Almar, R. (2020). Coastal coverage of ESA' Sentinel-2 Mission. *Advances in Space Research.* (65) 11, 2636-2644. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.001>
- Caballero, I., Ruiz, J. y Navarro, G. (2019). Sentinel-2 Satellites Provide Near-Real Time Evaluation of Catastrophic Floods in the West Mediterranean. *Water.* (11) 12, 2499. doi: <https://doi.org/10.3390/w111224999>
- Caballero, I. y Navarro, G. (2021). Monitoring cyanoHABs and water quality in Laguna Lake (Philippines) with Sentinel-2 satellites during the 2020 Pacific typhoon season. *Science of The Total Environment.* (788). doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147700>
- Caballero, I. y Stumpf, R. P. (2019). Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* (226), 106277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277>
- Caballero, I. y Stumpf, R. P. (2021). On the use of Sentinel-2 satellites and lidar surveys for the change detection of shallow bathymetry: The case study of North Carolina inlets. *Coastal Engineering.* 103936. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103936>
- Mishra, S. y Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394-406. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
- Nechad, B., Ruddick, K. G. y Park, Y. (2010). Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment.* (114) 4, 854-866. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>
- Roca, M., Navarro, G., García-Sanabria, J. y Caballero, I. (2022). Monitoring sand spit variability using Sentinel-2 and Google Earth Engine in a Mediterranean estuary. *Remote Sensing (submitted)*.
- Spalding, M.D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L.Z., Shepard, C.C. y Beck, M. W. 2014. The role of ecosystems in coastal protection: adapting to climate

change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*. 90, 50–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.09.007>

Vanhellemont, Q. y Ruddick, K. (2018). Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote sensing of environment*, (216), 586-597. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015>

Vanhellemont, Q. (2019). Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*, 225, 175-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010>