

Análisis multisensor para el estudio de los patrones de turbidez en el estuario del Guadalquivir

Caballero, I.*; Navarro, G.

Departamento de Ecología y Gestión Costera, Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, Avenida República Saharaui, Puerto Real, Cádiz, (España).

Resumen: En este trabajo se ha realizado un estudio detallado de los mecanismos que se desarrollan a través de la generación de la pluma de turbidez en la desembocadura del estuario del Guadalquivir, determinando su variabilidad mediante el uso conjunto de técnicas de teledetección y datos in situ. La investigación que se aborda ha requerido el uso de numerosos sensores con diferentes características (resolución espacial, temporal y espectral), proporcionando de esta manera información para realizar un análisis multisensor. El principal objetivo ha sido describir los parámetros de calidad de las aguas (sólidos en suspensión y clorofila) e implementar la metodología para generar los algoritmos empíricos y semianalíticos a partir de datos satelitales de distinta índole (MODIS, MERIS, Deimos-1). Se han examinado los procesos que acontecen en el estuario y región adyacente caracterizando los patrones espacio-temporales e identificando los agentes implicados en las diversas escalas de variabilidad. El forzamiento océano-meteorológico asociado a las precipitaciones, las descargas de la presa de Alcalá del Río y el índice climático NAO controlan las fluctuaciones estacionales e inter-anales, mientras que el efecto de la marea (ciclo semi-diario y quincenal) en la desembocadura modula la pluma de turbidez a lo largo de todo el año, exhibiendo una variabilidad significativa. Se hace un especial énfasis en diagnosticar el papel que tienen dichos procesos de turbidez sobre los ecosistemas en el entorno de la plataforma continental y golfo de Cádiz, constituyendo, de tal manera, una potente herramienta para los programas de gestión integral de calidad del agua y de los recursos litorales.

Palabras clave: sólidos en suspensión, color oceánico, variabilidad espacio-temporal, Deimos-1, MODIS, MERIS.

Multi-sensor analysis to study turbidity patterns in the Guadalquivir estuary

Abstract: A detailed study of the mechanisms generated through the turbidity plume and its variability at the Guadalquivir estuary has been carried out with remote sensing and in situ data. Several sensors with different characteristics have been required (spatial, temporal and spectral resolution), thereby providing information for a multi-sensor analysis. The main objective was to determine the water quality parameters (suspended solids and chlorophyll) and implement the methodology to define the empirical and semi-analytical algorithms from satellite data (MODIS, METIS, Deimos-1). The processes occurred in the estuary and adjacent region have been examined identifying those involved in the different variability scales. The forcings associated with rainfall and discharge from Alcalá del Río dam in addition to the climatic NAO index control seasonal and inter-annual fluctuations, while tide effects (semi-daily and fortnightly cycles) modulate the plume at the mouth throughout the year with significant variability. Special emphasis is focused on diagnosing the role of these mechanisms on the continental shelf ecosystems, constituting a powerful tool for the water quality management and coastal resources.

Key words: suspended solids, ocean colour, spatio-temporal variability, Deimos-1, MODIS, MERIS.

* Autor para la correspondencia: Isabel.caballero@icman.csic.es

1. Introducción

El estuario del Guadalquivir es un claro ejemplo de ecosistema costero significativo desde diversos puntos de vista, ocupando un lugar importante en la historia como uno de los estuarios más extensos de Europa occidental (Figura 1). El estuario actual y las marismas son el resultado evolutivo de una gran bahía marina (Golfo Tartésico) situada en la desembocadura antigua del Guadalquivir. Este territorio costero ha persistido desde la antigüedad como enclave vital y soporte para actividades muy variadas tales como el comercio, navegación fluvial, acuicultura, agricultura, pesquerías, marisqueo, y recientemente, es un área turística muy demandada, generando considerables beneficios socio-económicos para las regiones adyacentes. Colindante con la desembocadura del Guadalquivir se encuentra el Parque Nacional y Natural de Doñana, el humedal más importante de toda Europa y uno de los hábitats de hibernación más utilizados por las aves del continente. En 1980 la UNESCO clasificó el parque como Reserva de la Biosfera y en 1994 fue declarado Patrimonio de la Humanidad. Cabe destacar que estas zonas de transición únicas, donde los ambientes marino y fluvial interactúan, corresponden a uno de los espacios más relevantes del mundo debido a su complejidad, vulnerabilidad y su elevada producción biológica (Dyer, 1973). Todas estas singularidades han convertido al estuario del Guadalquivir en un emplazamiento valioso y atractivo, por lo que es fundamental un profundo conocimiento de los procesos y mecanismos que

acontecen sobre él con el fin de compatibilizar sus posibles usos e impulsar la óptima gestión integrada de sus recursos.

Con una longitud aproximada de 110 km, el estuario se encuentra situado en la costa suroeste de la Península Ibérica, desembocando en el golfo de Cádiz, y extendiéndose desde la presa de cabecera en Alcalá del Río hasta su desembocadura en la Broa de Sanlúcar (Figura 1). El estuario es el único navegable en España, cuyo canal es mantenido mediante dragados periódicos desde su desembocadura hasta el acceso al Puerto de Sevilla con el fin de garantizar un calado mínimo. Una de las características más significativas es que actúa como fuente de material en suspensión en la plataforma adyacente, generando elevados niveles de turbidez (Navarro *et al.*, 2012b; Caballero *et al.*, 2014a,b; Díez-Minguito *et al.*, 2014). Adicionalmente, cabe destacar su papel fertilizador, aumentando la concentración de nutrientes y los valores de producción primaria en el golfo de Cádiz (Prieto *et al.*, 2009), y por tanto, correspondiendo al motor principal de los recursos pesqueros de la Andalucía occidental (Ruiz *et al.*, 2009). De esta manera, el estuario posee un papel primordial en los procesos que se desarrollan en la amplia plataforma continental. Además de las sucesivas transformaciones antrópicas y la considerable influencia de las intervenciones a la que se encuentra actualmente sometido, el equilibrio del estuario se ve afectado intensamente por la aparición de las plumas de turbidez a distintas escalas temporales y espaciales. Estos eventos de turbidez extrema de larga duración son uno de los problemas que recientemente han generado mayor alarma social y agudos debates, alterando de manera drástica la morfodinámica, biodiversidad y las numerosas actividades que confluyen en su entorno. Los niveles elevados de sólidos en suspensión ponen en peligro la frágil armonía de un ecosistema castigado por la presión de la intervención humana en la zona, imposibilitando el riego de numerosas zonas cultivadas en el estuario, entre otras, los arrozales, y el funcionamiento de las instalaciones dedicadas a la acuicultura (Contreras y Polo, 2012). Dentro de este contexto se pone de manifiesto la necesidad de identificar las fuentes críticas de estas perturbaciones y las condiciones que potencian su persistencia mediante un estudio integrado, cuyo



Figura 1. Localización del estuario del Guadalquivir.

objetivo principal se base en preservar y recuperar el buen estado de las masas de agua actualmente deterioradas, tal y como establece la Directiva Marco del Agua.

Los estudios de estos episodios se han realizado convencionalmente a partir de campañas de campo oceanográficas, métodos de muestreo o implementación de boyas y redes de medida (Navarro *et al.*, 2012b), los cuales presentan deficiencias debido tanto a la incapacidad de caracterizar la alta variabilidad espacio-temporal de los procesos que se desarrollan en los sistemas marinos como por su elevado coste humano y económico. Una de las grandes ventajas de las novedosas técnicas satelitales reside en la perspectiva panorámica y el carácter sinóptico que ofrecen, que unido al hecho de obtener información de zonas remotas o de difícil acceso, les confiere mayor potencial que las tradicionales medidas de campo (Hu *et al.*, 2004; Otero y Siegel, 2004). En este trabajo, el empleo combinado de información proporcionada por diversos satélites ofrece la posibilidad de realizar un análisis multisensor, el cual se revela imprescindible, ya que no existe en la actualidad un instrumento cuyas propiedades abarquen todo el espectro de fluctuaciones del estuario. Estas medidas, en conjunto con el componente esencial de los datos *in situ*, nos han permitido realizar un estudio integrado del estuario del Guadalquivir y establecer de manera detallada el patrón de variación de la pluma de turbidez y su relación con los procesos océano-meteorológicos. Se hace un especial énfasis en el papel que tienen dichos procesos sobre el entorno de la plataforma continental sur-atlántica andaluza y en los posibles impactos sobre los valores ecológicos, presentándose como una de las piezas clave para el avance de la gestión óptima de esta región litoral.

2. Material y Métodos

2.1. Imágenes de satélite

En el presente trabajo se han utilizado datos provenientes de diferentes sensores de color oceánico estándar como son MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) y MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*), así como del satélite Deimos-1. El estudio se ha orientado hacia el máximo aprovechamiento de las capacidades y

particularidades (resolución espacial y espectral) que ofrece cada sensor en específico para el estudio de los procesos de turbidez en el estuario exterior y región adyacente. En particular, estas series de datos se han conformado como un puzzle que abarca distintas piezas, desde la zona más externa del estuario y plataforma continental (baja resolución espacial de las imágenes MODIS), hasta la zona de la bocana y del estuario exterior (imágenes de alta resolución espacial Deimos-1).

2.1.1. MODIS

MODIS es un instrumento científico lanzado en órbita terrestre por la Agencia Espacial Americana (NASA) en 1999 a bordo del satélite Terra y en 2002 a bordo del satélite Aqua. Las imágenes de este trabajo provienen del satélite Aqua y corresponden a los datos de color oceánico del nivel L2 y de 1 km de resolución espacial, cuya cobertura temporal abarca desde el año 2003 hasta el año 2013. Estas imágenes se han obtenido de la web Oceancolor (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Para la estimación de Sólidos en Suspensión Totales (Total Suspended Solids, TSS) se ha utilizado como trazador la Reflectancia del agua en el canal de la longitud de onda 555 nm (R_{rs555} , 1/sr), y su posterior conversión a Radiancia normalizada (nLw_{555} , $mW/cm^2 \mu m sr$) mediante la ecuación $nLw_{555} = F_0 \times R_{rs555}$, donde F_0 es la constante solar. Para la banda de Aqua 545-565 nm, F_0 corresponde al valor de 186,09 $mW/cm^2 \mu m$ (Neckel y Labs, 1984). En este punto cabe destacar que la selección de esta banda se llevó a cabo por las diversas referencias bibliográficas que han utilizado frecuentemente el canal 555 nm para caracterizar la turbidez con resultados satisfactorios en las zonas costeras (Lahet *et al.*, 2001; Loisel *et al.*, 2001; Toole y Siegel, 2001; Otero y Siegel, 2004; Nezhlin y Di Giacomo, 2005; Thomas y Weatherbee, 2006). Asimismo, la concentración de clorofila (Chl) obtenida mediante el algoritmo correspondiente OC3M (O'Reilly *et al.*, 2000) se descargó para su posterior análisis. Se hizo uso del software SeaDAS (versión 6.4, <http://seadas.gsfc.nasa.gov>) para leer y asignar a los datos una proyección de Mercator a 1 km de resolución. Se utilizaron las máscaras estándar de la NASA (L2_flags) para realizar un control de calidad de los productos en la zona costera, eliminando los datos incorrectos o atípicos (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/atbd/ocl2flags>). A continuación, esta serie de

datos fue editada y analizada mediante el software MATLAB 7.10.0-R2010a (c). Para cada escena, la extensión de la pluma fue delimitada por el umbral de $nLw555=1,3 \text{ mW/cm}^2 \mu\text{m sr}$ (Otero y Siegel, 2004; Nezlin y DiGiacomo, 2005; Valente y da Silva, 2009). Se llevaron a cabo exámenes visuales en un subconjunto de imágenes comprobando si el valor definido como estándar se ajustaba adecuadamente al penacho de la pluma. En este trabajo nos hemos centrado en el estudio de $nLw555$ como trazador de TSS, más que en la cuantificación de la concentración, cuyo objetivo principal era el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la pluma de turbidez. Las imágenes diarias se combinaron para calcular las medias semanales (8 días) y mensuales, así como las climatologías mensuales y una climatología total para el período de 10 años. Sólo las imágenes con cobertura nubosa menor del 15% fueron seleccionadas en este paso. Con las imágenes semanales de TSS y Chl se llevó a cabo un análisis de Funciones Empíricas ortogonales EOF (Lorenz, 1956). Esta metodología simplifica las dimensiones de grandes conjuntos de datos, incluidas las imágenes del color oceánico, a unos pocos modos significativos de variabilidad. El software utilizado fue MATLAB 7.10.0 con el código “pcaool” (Björnsson y Venegas, 1997).

2.1.2. MERIS

Junto con las imágenes MODIS se hizo uso de toda la serie de datos existente de alta resolución espacial del sensor MERIS FRS (*Full Resolution Swath*, 300 m) a bordo del satélite Envisat de la Agencia Espacial Europea (ESA), descargadas de la web de OceanColor (2002-2012). Esta mejora en la cobertura espacial con respecto a los datos estándar de baja resolución RR de 1,2 km favoreció el análisis de la pluma de turbidez y de los procesos a pequeña escala en una región más próxima al estuario. Todas las imágenes disponibles de Chl (mg/m^3) y Reflectancia a 560, 620, 665 y 681 nm (1/sr) al nivel L2 fueron descargadas, y se procedió a los controles de calidad y de procesamiento de igual manera que con los productos de MODIS (L2_flags, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/atbd/ocl2flags>).

El canal rojo (~650 nm) se utiliza frecuentemente para evaluar TSS en zonas extremadamente turbias, como es el caso del estuario del Guadalquivir (Navarro *et al.*, 2012b), debido a que la señal

de esta banda es más sensible a la cantidad de partículas en suspensión y se encuentra menos influenciada por la materia orgánica y clorofila en relación con otras bandas visibles (Stumpf *et al.*, 1993; Miller y McKee, 2004; Chen *et al.*, 2010). Se llevó a cabo un análisis mediante un modelo de regresión exponencial para conocer la capacidad de las imágenes de MERIS en la estimación de TSS. El mejor ajuste se observó con Rrs665 (Tabla 1), de igual manera que en los trabajos bibliográficos existentes, por lo que esta banda fue seleccionada para los análisis posteriores como trazador de TSS. Para cada escena, la forma y extensión de la pluma fue delimitada por el umbral de $Rrs665=0,007/\text{sr}$, equivalente al valor estándar de nLw del sensor MODIS.

Tabla 1. Coeficiente de correlación (r) y desviación estándar (se) de la regresión exponencial para estimar TSS con Rrs de las bandas MERIS (560, 620, 665 y 681 nm).

Banda (nm)	r	p	se (mg/L)
560	0,51	<0,01	56,8
620	0,71	<0,001	42,9
665	0,89	<0,001	38,3
681	0,66	<0,001	51,3

Con estas imágenes se llevó a cabo un análisis climatológico de toda la serie de datos similar al efectuado con los datos MODIS y además, otro en el que se dividió cada escena según dos factores. El primero de ellos corresponde al régimen hidrodinámico del estuario, el cual depende del volumen de la descarga desde la presa de Alcalá del Río, y que fue determinado en el trabajo de Díez-Minguito *et al.* (2012): 1) régimen fluvial o de avenidas ($>400 \text{ m}^3/\text{s}$), 2) régimen intermedio o mixto ($40\text{--}400 \text{ m}^3/\text{s}$) y 3) régimen mareal o de caudales bajo ($<40 \text{ m}^3/\text{s}$). Adicionalmente, se subdividieron las imágenes teniendo en cuenta el forzamiento mareal relacionado con: 1) la componente quincenal (mareas vivas y muertas) y 2) la componente semi-diurna (mareas bajas y altas). Exclusivamente las imágenes con más del 30% libre de cobertura nubosa se utilizaron en la serie temporal.

2.1.3. Deimos-1

El Deimos-1, también conocido como Spain-DMC 1, es un satélite español operado por Elecnor Deimos Imaging con sede en Boecillo (Valladolid), cuyo sucesor es el Deimos-2, ambos en órbita actualmente. El satélite forma parte de

la contribución española a “*Disaster Monitoring Constellation*” (constelación de satélites para el seguimiento de catástrofes) que es coordinada por DMC International Imaging. Deimos-1 lleva un sensor óptico multicanal, con una resolución espectral de 3 bandas (Verde: 510-618 nm, Rojo: 614-698 nm e Infrarrojo Cercano-NIR: 755-906 nm) y una resolución espacial de 22 m. Las imágenes están disponibles comercialmente en el archivo (<http://www.deimosimaging.com>). Aunque está diseñado principalmente para la respuesta rápida a desastres, tiene un sólido potencial como plataforma para los estudios sobre las aguas costeras y de transición (Caballero *et al.*, 2012). Este satélite nos ofreció la posibilidad de caracterizar los patrones de turbidez y cuantificar TSS en la desembocadura y en el estuario gracias a su alta resolución espacial, a diferencia de los 300 m de MERIS y los 1.000 m de MODIS.

Las imágenes utilizadas consisten en ocho escenas sin nubes seleccionadas entre 2010 y 2011. Se procedió a la implementación de la corrección radiométrica y atmosférica como paso previo a la cuantificación de sólidos en suspensión (TSS), puesto que los datos originales se encontraban en nivel L1B (GeoTIFF de imágenes ortorectificadas con proyección Universal Transversal de Mercator-UTM29N y Sistema Geodésico Mundial 84-WGS84 de referencia). El procesamiento se realizó utilizando el software de código abierto R 2.14.2 (2011) y Quantum GIS 1.7.4 (2012). Para la corrección atmosférica se utilizó el código escrito en R de los paquetes Landsat (Goslee, 2011) y Raster (Hijmans y Etten, 2011), y en Matlab 7.10.0 (R2010a).

2.2. Datos *in situ*

Adicionalmente, se han incorporado al estudio diferentes datos de campañas de campo y series de variables oceanográficas y meteorológicas. Con

respecto a las primeras, una sección importante para la aplicación de las técnicas de teledetección en las zonas costeras comprende la validación de las medidas provenientes de los diversos sensores con las fuentes de datos *in situ* recolectadas a lo largo de diversas campañas oceanográficas. Estas observaciones de campo proporcionan la posibilidad de realizar comparaciones y calibraciones de los productos satelitales y generar algoritmos regionales, tomando el valor *in situ* como medida “real” o más próxima a la realidad. Los ejercicios de validación se llevaron a cabo mediante la comparación de los productos satelitales y los datos *in situ* del mismo día de observación, y con la ventana temporal máxima de 1,5 horas de diferencia para minimizar el error entre ambas medidas debido a la alta dinámica de la región de estudio.

La mayoría de los datos *in situ* fueron obtenidos en el Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC), y corresponden a las campañas realizadas en el golfo de Cádiz (Sesame, Fluctuaciones y Reserva), como asimismo las campañas específicas de validación de Deimos-1 en el estuario del Guadalquivir. En la Tabla 2 se ofrece un resumen de las diversas campañas efectuadas en el ICMAN y sus características, como también las de la Junta de Andalucía que se han incluido en este trabajo (Red de Medidas del Plan de Vigilancia Medioambiental de conductividad y turbidez en el estuario del Guadalquivir, <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/>).

Las muestras de agua se recogieron cerca de la superficie en todos los casos (profundidad < 5 m). El análisis de clorofila fue realizado mediante el filtrado a través de filtros de fibra de vidrio Whatman GF/F (0,7 mm de tamaño de poro), extrayendo en 90% de acetona, y realizando la medición por métodos fluorométricos estándares utilizando una Turner Designs Modelo 10 (Parsons *et al.*, 1984). El fluorímetro se

Tabla 2. Campañas oceanográficas en la región del Golfo de Cádiz y estuario del Guadalquivir desarrolladas por el ICMAN-CSIC y Junta de Andalucía (nodo GQ200).

Campaña	Parámetro	Periodo	Región	Embarcación
Fluctuaciones	TSS - Chl	2005-2007	Plataforma	RV Regina Maris
Reserva	TSS - Chl	2002-2004	Plataforma	RV Regina Maris
Sesame	Chl	2008	Oceánica	RV Regina Raris/ Bio García del Cid
Deimos-1	TSS	2010-2011	Estuario	Embarcación ligera
Junta de And.	TSS	2008-2011	Estuario	Embarcación ligera

calibró usando la clorofila pura de la cianobacteria *Anacystis nidulans* (Sigma Chemical Co.) con la concentración determinada espectrofotométricamente. Las muestras se filtraron a bordo e inmediatamente se congelaron, determinándose las concentraciones de pigmentos posteriormente en el laboratorio del ICMAN-CSIC a los pocos días de la campaña. Asimismo, se midieron las concentraciones de TSS gravimétricamente mediante el filtrado de las muestras en filtros de fibra de vidrio Whatman GF/F de acuerdo con los protocolos JGOFS (UNESCO, 1994).

Cabe mencionar que en este trabajo se han utilizado los valores de TSS como trazadores de turbidez. La turbidez corresponde a una característica relacionada con la pérdida de transparencia por la presencia de partículas que impiden el adecuado paso de la luz, como es el caso de los sólidos en suspensión. Sin embargo, esto no permite conocer el efecto que ejercen estos sólidos sobre la luz que intenta atravesar la superficie del mar, puesto que depende de varios factores como el tamaño de grano, el tipo de sedimento, etc... En el caso específico del estuario del Guadalquivir, existen dos trabajos recientes que han caracterizado la estrecha relación lineal entre estas dos variables (Navarro *et al.*, 2011, 2012) para un rango de concentraciones de 50-800 mg/L para TSS y 100-550 FNU para turbidez.

Con respecto a las variables océano-meteorológicas, se han descargado estos datos de agencias externas al ICMAN-CSIC correspondientes a la precipitación de la estación meteorológica de Sanlúcar la Mayor, descarga de la presa de Alcalá del Río, índice climático *North Atlantic Oscillation* (NAO) y el nivel del mar del mareógrafo de Bonanza (Tabla 3). Se incluyen en este apartado las medidas de turbidez en dos nodos del estuario implementados por el ICMAN-CSIC (Navarro *et al.*, 2012b).

3. Resultados y discusión

3.1. Validación de los productos satelitales

En la zona más externa del estuario y plataforma continental, los resultados obtenidos mediante el algoritmo empírico muestran gran precisión para la determinación de TSS haciendo uso de nLw555 mediante la regresión exponencial (Tabla 4). En esta región los datos *in situ* mostraban un rango de concentraciones de TSS que variaba entre 28,1 y 130,4 mg/L. Ambas variables están correlacionadas positivamente ($r^2=0,92$; $p<0,001$), con un valor de error estándar $se=5,0$ mg/L. La comparación entre Chl del satélite (0,055-4,18 mg/m³) e *in situ* (0,095-4,99 mg/m³) mostró una correlación lineal mediante regresión ($r^2=0,63$; $p<0,001$). Los datos evidenciaron una sobreestimación del satélite con un valor de error sistemático (bias)=0,63 mg/m³ en las zonas costeras, mientras que en las zonas oceánicas (>30 km distancia a costa), el valor de error sistemático era prácticamente nulo.

A medida que nos acercamos a la desembocadura, es necesario aumentar la resolución espacial para analizar los procesos a pequeña escala, y es por ello por lo que se hizo uso por primera vez de la reciente serie de datos MERIS FRS (300 m), con mayor resolución que los datos estándar RR (*Reduced Resolution*, 1200 m) del mismo sensor. Esta mejora en la cobertura espacial favoreció el examen de la pluma de turbidez y *blooms* de fitoplancton en una región más próxima al estuario. Los resultados certifican el éxito de la estimación de TSS mediante la relación exponencial de TSS y la Reflectancia en la banda del rojo (Rrs665 nm). La ecuación no lineal (Tabla 4) describe el 80% de la varianza del conjunto de datos con un error estándar de $se=38,3$ mg/L ($r^2=0,79$; $p<0,001$; Tabla 4). El rango de concentraciones de TSS *in situ* en este caso correspondía a 8,0-327,5 mg/L, con valores mucho más altos que los obtenidos

Tabla 3. Series de datos oceanográficos y meteorológicos.

Parámetro	Lugar	Agencia	Periodo
Descarga	Presa Alcalá del Río	Agencia Andaluza del Medio Ambiente y Agua	2002-2013
Precipitación	Sanlúcar la Mayor	Junta de Andalucía	2002-2013
NAO	Golfo de Cádiz	CLIMATE ANALYSIS SECTION (NCAR)	2003-2013
Marea	Bonanza	Puertos del Estado	2002-2013
Turbidez	Estuario	ICMAN-CSIC	2008-2010

Tabla 4. Resultados de la validación de los productos satelitales y algoritmos de TSS.

Sensor	MODIS	MERIS	Deimos-1
Datos validación	Fluctuaciones Reserva Sesame	Fluctuaciones Reserva Junta de Andalucía	Deimos-1
Rango de TSS (mg/L)	28,1-130,4	8,0-327,5	100-1400
Banda (nm)	nLw555	Rrs665	Rrs(755-906)
Algoritmo	$26,68 \times e^{0,3283 \times nLw555}$	$20,29 \times e^{100,1 \times Rrs665}$	$\frac{21428,77 \times RrsNIR}{\left(\frac{1 - RrsNIR}{0,21}\right) - 346,17}$
Modelo	Empírico	Empírico	Semi-analítico
n	53	27	53
r ²	0,92	0,79	0,87
p	<0,001	<0,001	<0,001

TSS: Sólidos en Suspensión Totales.

nLw555: Radiancia normalizada en la banda 555 nm. Rrs665/NIR: Reflectancia en la banda 665 nm/ Infrarrojo cercano.

n: número de muestras.

mediante la validación de MODIS (máximo TSS=130,4 mg/L), ya que nos encontramos en una región donde la turbidez del estuario es más intensa que en aguas exteriores. La selección de este canal, con mayor longitud de onda que el utilizado con los datos de MODIS a 555 nm, se fundamenta en que en regiones extremadamente turbias, como es el caso de la desembocadura del Guadalquivir, la señal de esta banda es más sensible a la cantidad de partículas en suspensión y se encuentra menos influenciada por la materia orgánica y clorofila en relación con otras bandas visibles (Stumpf *et al.*, 1993; Miller y McKee, 2004; Chen *et al.*, 2010). Adicionalmente, y como se describe en el apartado metodológico, se realizó una comparación de la relación entre las bandas de MERIS 560, 620, 665 y 681 nm con TSS, obteniendo el mejor ajuste mediante Rrs665 (Tabla 1). De igual manera que con el sensor MODIS, la evaluación de Chl obtuvo valores precisos con un $r^2=0,66$ ($p<0,0001$) pero exhibiendo cierta sobreestimación (error sistemático=0,77 mg/m³). A pesar de este aspecto, cabe indicar que el rango de variabilidad de los datos en este trabajo (Chl~0-20 mg/m³) es superior a lo que se presenta en otros estudios, con un valor máximo que no supera los 5 mg/m³ (Toole y Siegel, 2001; Otero y Siegel, 2004; Sá *et al.*, 2008), y donde también se observa esa tendencia a la sobreestimación de Chl en las zonas costeras.

Con la información suministrada por ambos sensores de color oceánico MODIS y MERIS, es

imposible estudiar los procesos que se desarrollan en el interior del estuario debido a su baja resolución espacial. Para ello, se utilizaron las imágenes del satélite Deimos-1, con una resolución espacial de 22 metros y así afrontar el análisis de los patrones a pequeña escala. En primer lugar, cabe indicar que debido a su baja resolución espectral, no se pudo cuantificar Chl, aunque si fue posible estimar TSS. Una vez aplicada la corrección radiométrica y atmosférica, se recuperaron los valores de TSS con una precisión excelente $r^2=0,87$ ($p<0,001$) mediante el algoritmo no lineal desarrollado por Nechad *et al.* (2010) con la banda del Infrarrojo Cercano (Tabla 4). La ventaja de este tipo de algoritmos semi-empíricos es su sólida base teórica, unida a su sencillez para aplicarlo en cualquier sensor de color a pesar del amplio rango de concentraciones de TSS a analizar, como en este caso, con valores entre los 100 mg/L y 1400 mg/L.

Es importante en este punto resaltar el trabajo de Nechad *et al.* (2015), donde se realizó un estudio de validación y evaluación de los algoritmos para determinar los productos de calidad del agua de los sensores ópticos en zonas costeras de todo el mundo que se llevó a cabo en el marco del Proyecto “CoastColour” (<http://www.coastcolour.org>), liderado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y del cual el CSIC formó parte. En el caso específico de la región del golfo de Cádiz, se reseñan los máximos valores de TSS de todas las áreas de estudio, con un valor de

mediana superior a 35 mg/L (n=667), asociado principalmente a material inorgánico. La recopilación de los valores totales de la mediana ha hecho constar de las elevadas concentraciones de TSS en las aguas del golfo en comparación con otras aguas costeras, como por ejemplo el Mar Mediterráneo (0,2 mg/L), el Mar del Este de China (0,6 mg/L), Tasmania (0,7 mg/L), el Mar del Norte (0,9 mg/L), la Gran Barrera de coral (3,8 mg/L) o las aguas de Indonesia (26 mg/L). Teniendo en cuenta estos resultados y los diversos algoritmos utilizados para la caracterización de TSS en este trabajo, cabe mencionar que en teoría, la relación entre la Reflectancia (o Radiancia) y TSS no es lineal (Ondrusek *et al.*, 2012; Ritchie *et al.*, 1990), sino que depende de las bandas a utilizar y de los niveles de TSS de la región de estudio. Esto es debido principalmente a que la señal de saturación y la disminución de la sensibilidad de las bandas verde, roja y NIR ocurre progresivamente con mayor cantidad de partículas en suspensión (Shen *et al.*, 2010). Por tanto, a bajas concentraciones de TSS la banda del verde será más sensitiva mientras que con niveles elevados, el uso de la banda roja o NIR es más adecuado, reduciendo la señal

de ruido pero con el inconveniente de una sensibilidad restringida para niveles bajos, como hemos observado en este trabajo. Este fenómeno es una de las causas por las que existe una gran variedad de algoritmos que usan distintas bandas del espectro electromagnético para cuantificar TSS (Baban, 1995; Chen *et al.*, 2007; Hu *et al.*, 2004; Miller y McKee, 2004; Ritchie y Cooper, 1988).

Uno de los objetivos fundamentales de este trabajo ha consistido en estudiar los procesos que acontecen en la desembocadura del Guadalquivir y golfo de Cádiz empleando varios sensores para el máximo aprovechamiento de las capacidades de cada instrumento. Las técnicas de teledetección empleadas han resultado favorables en la recuperación de la información sobre la calidad del agua de la zona de estudio, en particular, en la caracterización de la pluma de turbidez y los *blooms* de fitoplancton (Chl). Cabe mencionar que existen trabajos previos que han analizado los patrones de turbidez en la zona de marismas del Parque Nacional de Doñana mediante el uso de las imágenes Landsat TM y ETM+ (Bustamante *et al.*, 2009), pero hasta día de hoy, es la primera

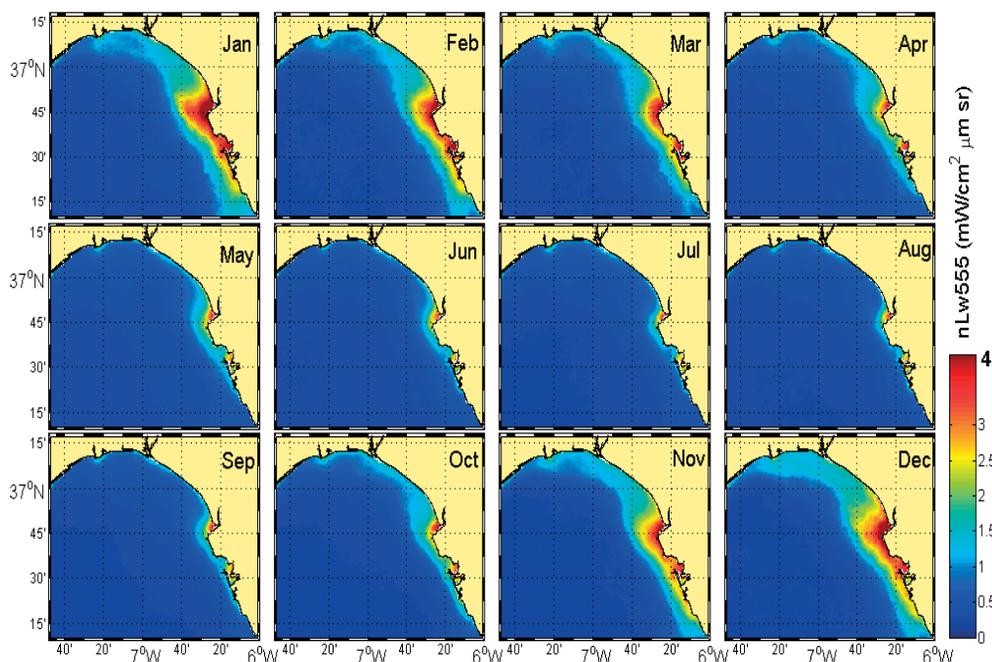


Figura 2. Climatología mensual de nLw555 de la serie de datos MODIS (2003-2013).

vez que se ofrece un estudio de carácter multisensor para detallar la variabilidad espacio-temporal de esta región costera tan compleja. Los resultados alcanzados mediante la validación de los diversos sensores con los datos de campo nos ofrecen un amplio abanico de posibilidades para estudiar TSS y Chl a distintas escalas espaciales y temporales.

3.2. Caracterización de los patrones espacio-temporales de la pluma de turbidez

El conjunto de resultados obtenidos en el marco de este trabajo ha permitido abordar la descripción de los procesos de turbidez en la zona de la desembocadura del estuario del Guadalquivir y la plataforma continental del golfo de Cádiz, subrayando la importancia del intercambio de propiedades en el tramo final del mismo, entre el estuario y la zona adyacente. Las climatologías regionales de 10 años obtenidas mediante el trazador de TSS en los dos sensores MODIS (nLw555) y MERIS (Rrs665) muestran los patrones espacio-temporales de la pluma de turbidez (Figuras 2 y 3).

Ambas presentan valores máximos, tanto en magnitud como extensión, localizados en la zona del estuario del Guadalquivir, y en menor medida, en la Bahía de Cádiz. Estos resultados se ven avalados por los primeros modos espaciales de las EOF, donde se distinguen los máximos valores del coeficiente espacial de nLw555 en la zona del estuario y la costa sur del mismo (Figura 5). Las regiones oceánicas están caracterizadas por aguas transparentes donde no se aprecia el efecto de la turbidez del estuario. Respecto a la evolución temporal a lo largo del año, en las diversas climatológicas mensuales se observa el patrón estacional de fortalecimiento y debilitamiento de la pluma, con valores extremos durante invierno principalmente y mínimos en verano. Mediante el análisis de los datos océano-meteorológicos se ha determinado que la estrecha relación entre la precipitación y las descargas desde la presa de Alcalá del Río genera un patrón estacional de máximos de TSS, particularmente durante los periodos de otoño e invierno, y mínimos durante las épocas estivales. Estos resultados se pueden observar en la Figura 4, donde la serie temporal del área

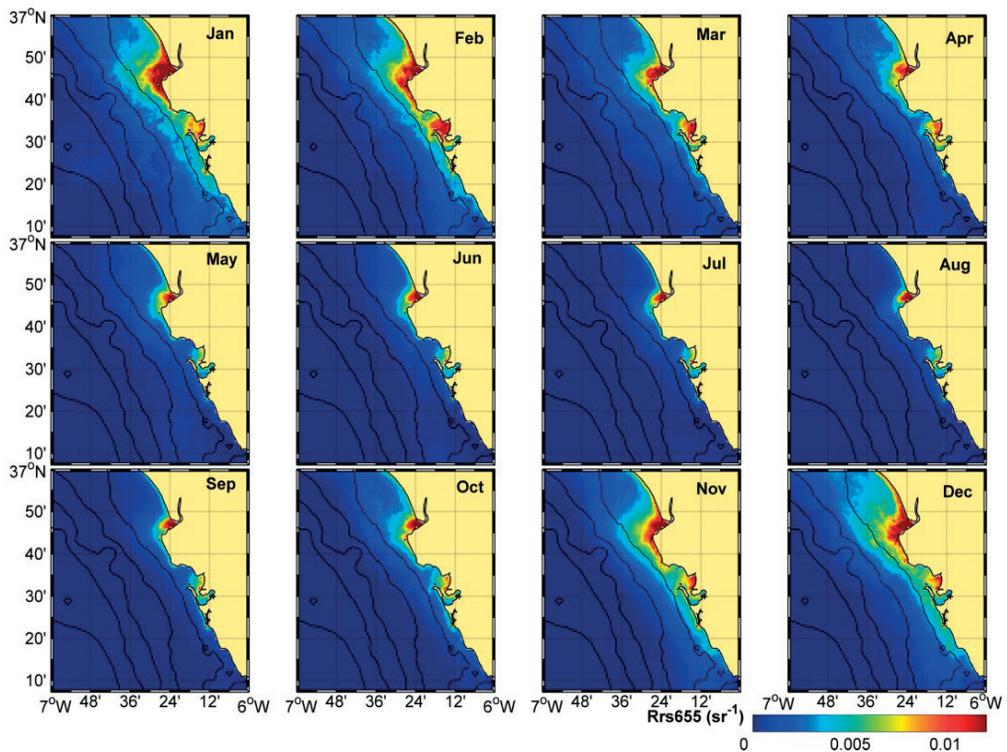


Figura 3. Climatología mensual de Rrs665 de la serie de datos MERIS (2002-2012).

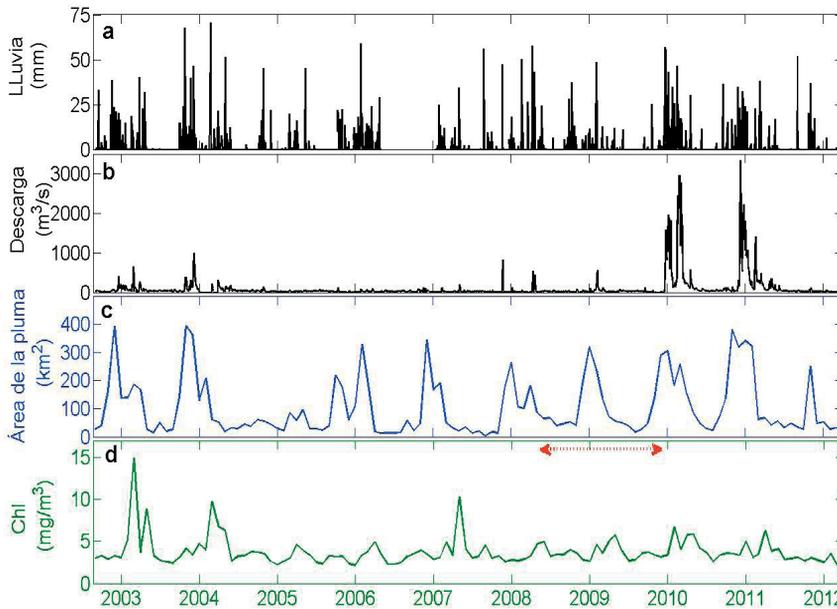


Figura 4. Serie temporal de precipitación (a), descarga de la presa de Alcalá del Río (b), área de la pluma de turbidez (c) y clorofila (d) con las imágenes MERIS.

de la pluma de turbidez en las imágenes MERIS está controlada por ambas variables. Asimismo, los resultados del primer modo de variación de las EOF con las imágenes MODIS presentan un comportamiento similar (Figura 6), con valores de la amplitud temporal positivos y mayores que la media durante las épocas de lluvias y descargas intensas, exhibiendo una variación interanual significativa. Específicamente, se muestra como durante los eventos extremos de descarga de la presa asociados a fuertes lluvias (inviernos del 2010 y 2011) es cuando aparecen los picos en la amplitud temporal con la máxima extensión en el estuario y aguas circundantes (variación interanual es significativa). Contrariamente, en los meses de primavera y fundamentalmente verano, los valores de la amplitud temporal son negativos, mostrando niveles de turbidez menores que la media. Esta información complementada con el análisis EOF ha revelado la estructura espacio-temporal de la pluma. Se ha encontrado que el primer y principal modo de variación que explica el 61% de la varianza se asocia a los factores lluvia y descarga de la presa, con valores de coeficiente de correlación de $r=0,47$ y $r=0,50$ ($p<0,001$), respectivamente (Figura 5 y 6), lo cual sugiere la estrecha conexión con los procesos meteorológicos. Adicionalmente,

ambos factores se encuentran estrechamente correlacionados con la NAO, donde los mínimos valores negativos de este índice ocurren paralelos a los periodos de máxima turbidez ($r=-0,52$; $p<0,001$), asociando parte de la variabilidad interanual a este índice climático.

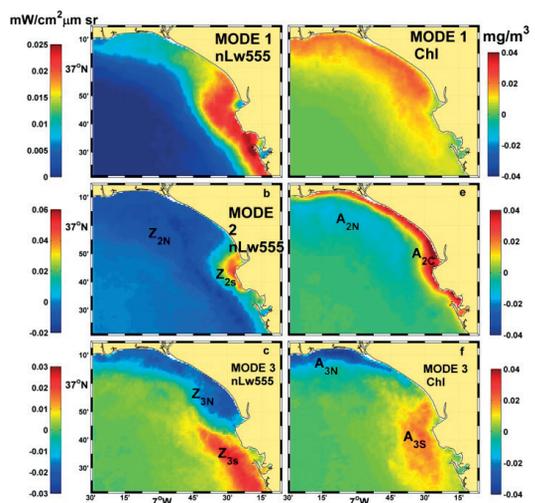


Figura 5. Coeficientes espaciales del primer modo de nLw555 y Chl tras el análisis de las EOF con las imágenes MODIS.

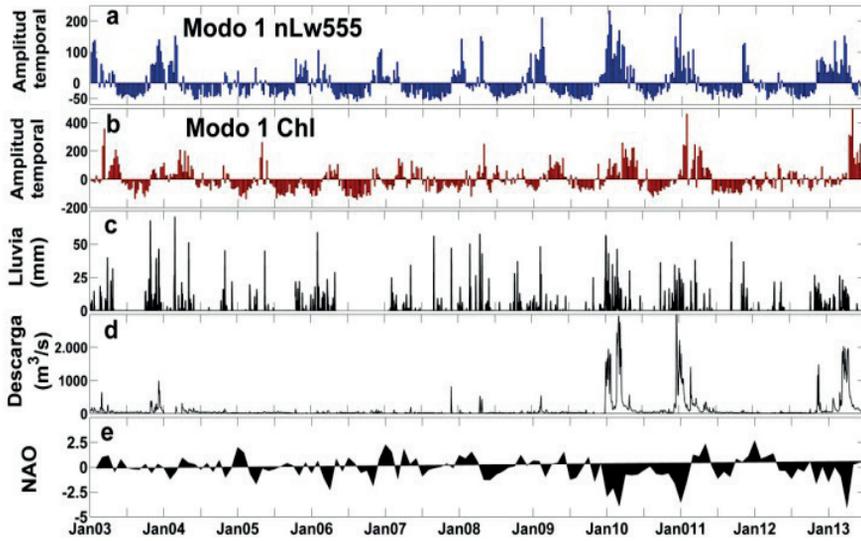


Figura 6. Series temporales de la amplitud del modo 1 de nLw555 (a) y Chl (b), precipitación diaria en la estación meteorológica de Sanlúcar La Mayor (c), descarga diaria de la presa de Alcalá del Río (d) y serie mensual del índice NAO (e).

Según se describe en los trabajos realizados mediante datos *in situ* y modelado numérico por Díez-Minguito *et al.* (2012, 2014), el aporte de agua dulce río arriba tras la descarga de la presa de Alcalá del Río modifica la hidrodinámica inducida por la marea, incrementando la velocidad de sedimentación, la capacidad de transporte de la componente fluvial y los procesos de resuspensión y erosión del lecho y márgenes a lo largo de todo el estuario. Los resultados obtenidos en este estudio han respaldado estos patrones con el análisis de ambas series históricas de datos MODIS y MERIS en el estuario exterior, como también en la plataforma continental del golfo. Los procesos fluviales gobiernan en el estuario particularmente en periodos de intensas lluvias y descargas, mientras que el resto del año, son los mecanismos mareales los que regulan el comportamiento de la turbidez. Tras el análisis y segmentación de las imágenes climatológicas de MERIS, donde se ha tenido en cuenta el régimen hidráulico del estuario y el ciclo mareal, se ha identificado que la variabilidad de TSS en la plataforma continental también es debida en gran medida al forzamiento mareal, tanto de la componente quincenal (marea viva y muerta) como de la componente semi-diurna (marea alta y baja). La Figura 7 muestra el ejemplo de la diferencia en la señal de turbidez entre mareas vivas y muertas de toda la serie de datos. Durante mareas

vivas se aprecia un notable aumento de TSS con respecto a las mareas muertas, cuyo debilitamiento de la señal de turbidez puede apreciarse entre un factor de Rrs555 (2-3) en ambos estados del estuario, aunque más notable en el régimen mareal que en el intermedio, puesto que el impacto fluvial

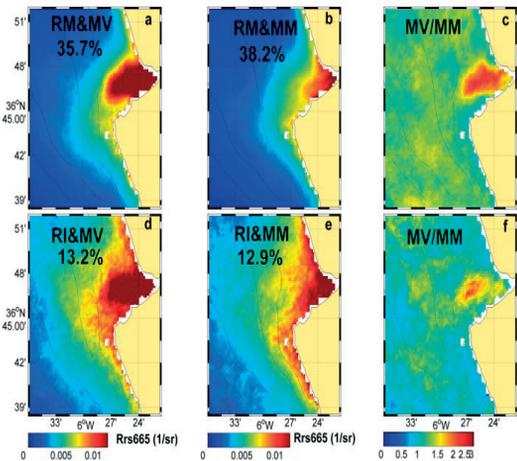


Figura 7. Mapas climatológicos de Rrs665 MERIS (2002-2012) para distintos estados hidrodinámicos y mareales: a) Régimen mareal (RM) + mareas vivas (MV), b) Régimen mareal + mareas muertas (MM), d) Régimen intermedio (RI) + mareas vivas, e) Régimen intermedio + mareas muertas, c) División entre ciclos de marea viva y muerta en escenarios mareales (a/b), f) División entre ciclos de marea viva y muerta en escenarios intermedios (d/e).

en este último es más intenso y puede enmascarar el efecto de la marea. Este resultado viene respaldado por el estudio desarrollado por Díez-Minguito *et al.* (2014) mediante datos modelados en el estuario interior. Adicionalmente, mientras que en el estuario interior la fase de inundación domina sobre el refluo marea (Díez-Minguito *et al.*, 2014), con este trabajo se ha determinado que en el estuario exterior y la plataforma se observan alteraciones de un patrón asimétrico con máximos de TSS tras finalizar el ciclo de vaciante con un factor de $Rrs665$ (~ 2). La inspección de esta serie temporal larga, y del tránsito entre los regímenes hidrodinámicos y del ciclo marea, pone de manifiesto la estrecha interacción de los procesos mareales y fluviales que concurren en el estuario, y como ambos fenómenos gobiernan los patrones de turbidez, afectando a la plataforma continental como zona de transición entre las aguas del Guadalquivir y el mar abierto.

Gracias al procesamiento de las imágenes Deimos-1, se ha podido cuantificar el gradiente de concentración de TSS en la zona de la desembocadura y en el estuario exterior de manera precisa, como se observa en la escena del 3 de marzo del año 2011 (Figura 8). Este análisis sería inviable mediante ninguno de los otros dos sensores ópticos, puesto que su resolución espacial es baja (300 m y 1200 m) a diferencia de los 22 m de tamaño correspondientes a Deimos-1. Este instrumento nos ha ofrecido la oportunidad de definir la posición de las zonas de máximo de turbidez típicas de estos enclaves (ETM) a la distancia de ~ 30 km desde la desembocadura, el cual, dependiendo de la descarga de la presa de Alcalá del Río o del estado marea, mostraba

significativas fluctuaciones en la intensidad y localización. La precisa caracterización de los gradientes de TSS genera considerables avances para la monitorización de los parámetros de calidad de las aguas del estuario, ofreciendo nuevas posibilidades complementarias a las costosas redes de medidas tradicionales utilizadas hasta la fecha (Navarro *et al.*, 2012b). Con este trabajo se pone de manifiesto que, debido a la complejidad y dinámica de la zona de estudio, las medidas *in situ* no podrán resolver por completo las diversas escalas de variabilidad espacio-temporal de TSS. A este respecto, con la presente contribución y la implementación de las técnicas de teledetección, se ofrece una innovadora y valiosa herramienta que podrá complementar una amplia variedad de programas regionales de vigilancia. Estos instrumentos de observación se convertirán, con la mayor brevedad, en uno de los pilares esenciales de la intervención de las administraciones competentes y de la comunidad científica sobre la gestión integral y el desarrollo sostenible de los recursos de las zonas estuarinas y las aguas de transición.

3.3. Implicaciones ecológicas

Otro de los valores significativos de este trabajo ha correspondido a la revisión de las implicaciones ecológicas de los patrones de la pluma de turbidez descritos hasta ahora, examinándose con detalle la variabilidad de la concentración de Chl en la zona de plataforma adyacente al estuario del Guadalquivir y golfo de Cádiz. Los resultados obtenidos mediante las climatologías MERIS (Figura 9) han puesto de manifiesto la evidente variabilidad estacional de Chl, con concentraciones

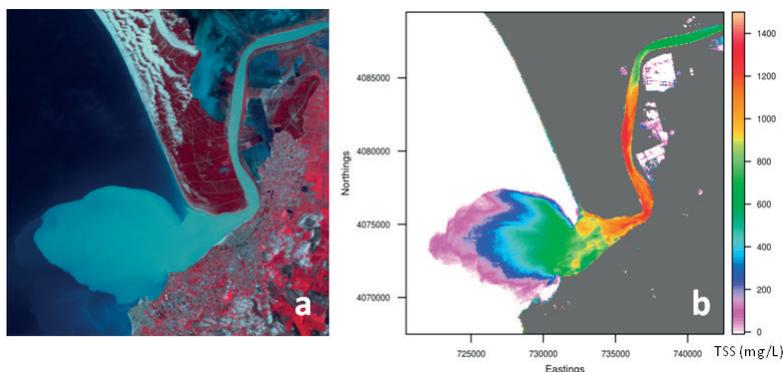


Figura 8. a) Imagen RGB de Deimos-1 y b) Mapa de TSS (mg/L) para la escena del 3 de marzo 2011 (10:59 GMT).

elevadas a finales de invierno y primavera y bajas en verano. Asimismo, la relación entre el índice de pluviosidad y los picos de Chl se puede observar en la serie temporal de datos MERIS (Figura 4), donde la concentración media presenta una estacionalidad asociada a la tasa de lluvia y a la descarga de la presa. Durante los años de precipitaciones intensas se favorece la entrada de agua dulce, sugiriendo que la fertilización de las aguas circundantes, y el consecuente aumento de la producción primaria, es notablemente sensible a los aportes de nutrientes a través del estuario, como se caracterizó en el trabajo de Prieto *et al.* (2009). Este incremento estimulado por el intercambio con el río produce, por ejemplo, que los máximos del Chl a lo largo de toda la plataforma se observen en la cercanía de la desembocadura, destacando sobre los otros ríos como el Guadiana, Tinto-Odiel o Guadalete. Estos patrones se han encontrado de manera similar en el primer modo de variación de las EOF con las imágenes MODIS, con un porcentaje de explicación de la varianza de 31%. En la Figura 5 y 6 se pone de manifiesto la

evidente conexión entre la variabilidad estacional de Chl (concentraciones elevadas en invierno-primavera y bajas en verano) y la pluviosidad ($r=0,38$; $p<0,001$) y descarga ($r=0,47$; $p<0,001$), con aumento de la amplitud temporal en los años de precipitaciones intensas, que favorecen de este modo la entrada de agua dulce. A diferencia del primer modo de turbidez, no se encontró una relación significativa entre el primer modo de variabilidad de Chl y el índice climático NAO ($r=-0,017$; $p<0,01$).

Cabe destacar que mediante las series temporales semanales MERIS (Figura 4) se ha encontrado un desfase temporal de 1 mes entre el máximo de turbidez y el *bloom* de fitoplancton ($r=0,49$; $p<0,0001$). Estos resultados han sido confirmados con el análisis EOF de TSS y Chl mediante las imágenes MODIS, es específico en el modo segundo, donde se establece la relación existente entre los máximos de TSS (extensión de la pluma de turbidez) y la disminución de Chl en la región del estuario y aguas adyacentes (Figura 10). Se

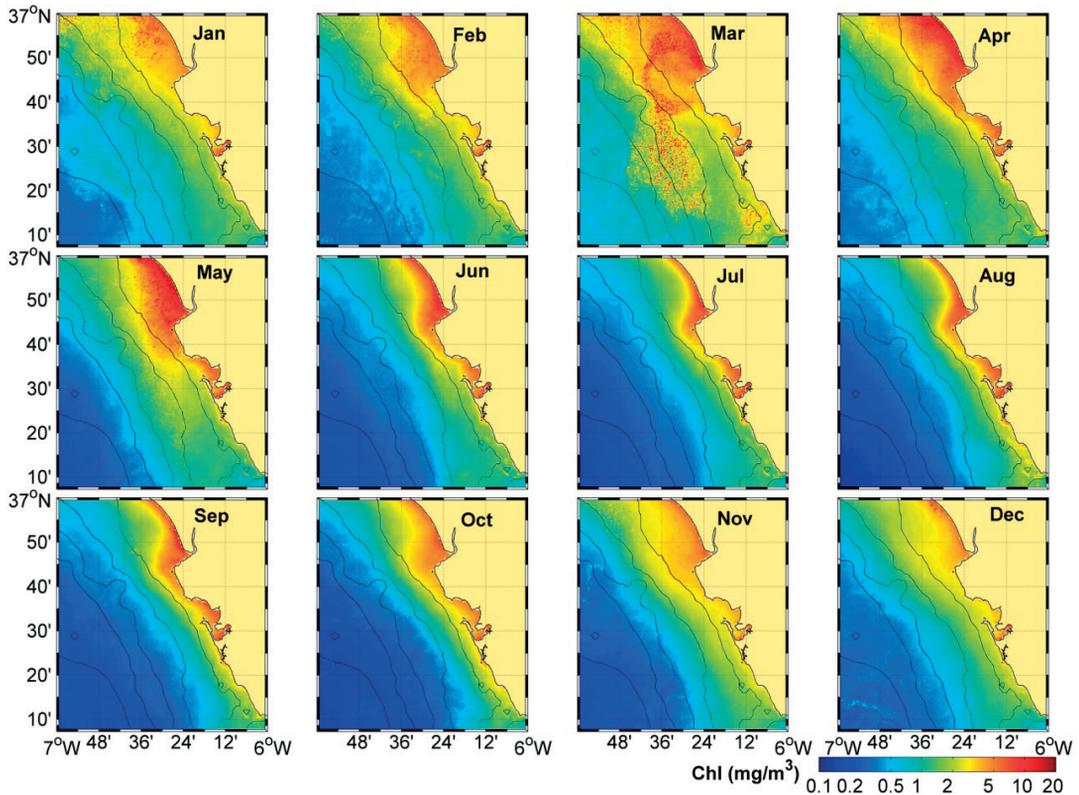


Figura 9. Climatología mensual de Chl de la serie de datos MERIS (2002-2012).

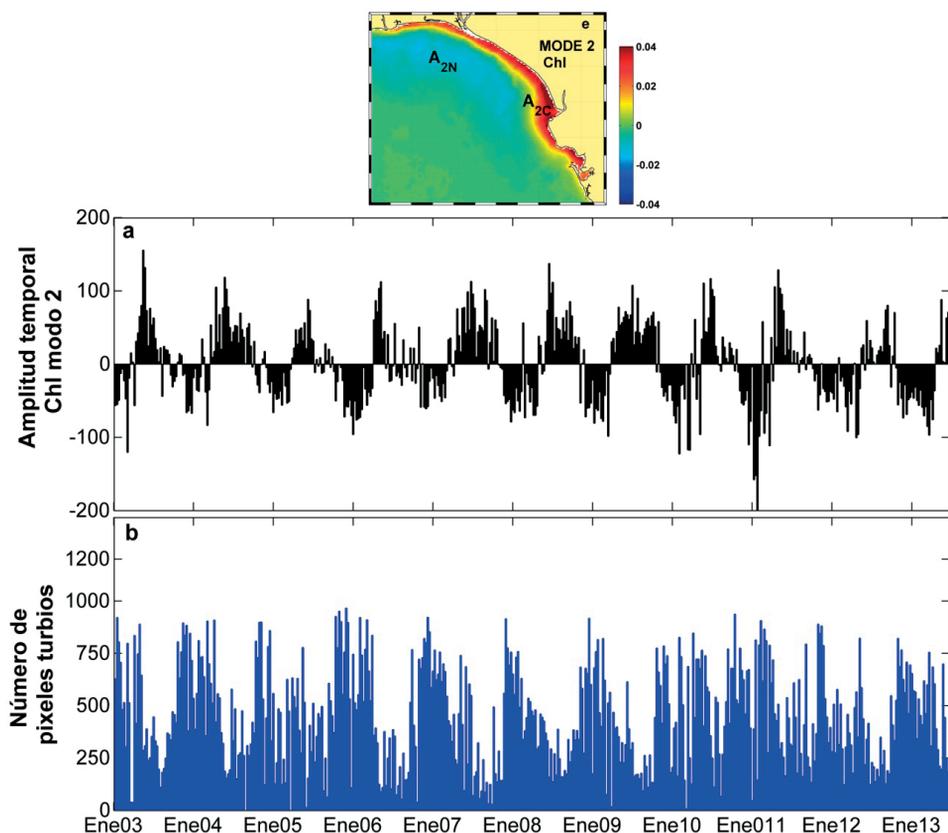


Figura 10. Coeficiente espacial del segundo modo de Chl tras el análisis de las EOF con las imágenes MODIS asociado a su amplitud temporal (a) y el número total de píxeles turbios en esa zona (b).

puede observar como los periodos de máxima extensión o área de la pluma, asociados a mayor número de píxeles turbios en la región de interés, son simultáneos al descenso de Chl con valores mínimos, exhibiendo una relación negativa entre estas dos variables ($r=-0,55$; $p<0,001$). El vínculo existente entre los altos niveles de material particulado y la extensión de la pluma con la disminución de Chl indica que la restricción de disponibilidad y penetración de la luz ocasiona una severa limitación de la producción primaria y e inhibición de la dinámica de fitoplancton en la zona de la desembocadura y plataforma continental, retrasando el *bloom* invernal. Lejos del estuario y en la zona oceánica, donde los niveles de turbidez son escasos o no llegan a afectar, Navarro *et al.* (2012a) mostraron que los patrones estacionales e interanuales del *bloom* invernal se encuentran influenciados por la estructura vertical de la columna de agua y los procesos de mezcla.

Por consiguiente, los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto que la variabilidad de la naturaleza del ecosistema pelágico se encuentra controlada por el forzamiento de los diversos mecanismos de turbidez asociados al estuario del Guadalquivir descritos con anterioridad, y con especial énfasis en la zona de plataforma adyacente a la desembocadura, en un amplio rango de frecuencias que modulan el patrón general.

4. Conclusiones

Las técnicas de teledetección empleadas durante el presente trabajo han resultado adecuadas, permitiendo abordar de manera sinóptica y económica la descripción de los patrones espacio-temporales de los procesos de turbidez y *blooms* de fitoplancton en la zona de la desembocadura del estuario del Guadalquivir y la plataforma continental del golfo de Cádiz. A través del análisis de imágenes

con los diversos sensores utilizados (MODIS, MERIS y Deimos-1) se ha establecido el estuario como principal fuente de material particulado en esta franja costera, subrayando la importancia del intercambio en el tramo final del mismo y sus implicaciones ecológicas. Los resultados alcanzados mejoran el conocimiento actual sobre las herramientas de teledetección y su aplicación en esta compleja región costera, confirmando la importancia del estuario desde el punto de vista oceanográfico y de la gestión óptima de los recursos costeros y de las aguas de transición.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la concesión de una Beca de Formación de Personal Investigador del Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía titulado “Estudio de los eventos de turbidez en la desembocadura del Guadalquivir mediante teledetección y su conexión con procesos meteorológicos y oceanográficos” (P09-RNM-4853) y PIE201530I012. Nos gustaría agradecer a la ESA, NASA y Deimos-Imaging por la distribución de los datos de satélite utilizados en este estudio.

Referencias

- Baban, S. M. J. 1995. The use of Landsat imagery to map fluvial sediment discharge into coastal waters. *Marine Geology*, 123(3-4), 263-270. [http://dx.doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00003-H](http://dx.doi.org/10.1016/0025-3227(95)00003-H)
- Björnsson, H., Venegas, S. A. 1997. A Manual for EOF and SVD Analyses of Climate
- Data. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change, McGill University, Technical report, 97(1).
- Bustamante, J., Pacios, F., Díaz-Delgado R., Aragonés, D. 2009. Predictive models of turbidity and water depth in the Doñana marshes using Landsat TM and ETM+ images. *Journal of Environmental Management*, 90(7), 2219-2225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.021>
- Caballero, I., Morris, E. P., Navarro, G. 2012. DEIMOS-1 Satellite Provides Imagery for Coastal Management. *Sea Technology*, 53(2),10-13.
- Caballero, I., Morris, E. P., Ruiz, J., Navarro, G. 2014a. Assessment of suspended solids in the Guadalquivir estuary using new DEIMOS-1 medium spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 146, 148-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.047>
- Caballero, I., Morris, E., Prieto, L., Navarro, G. 2014b. The influence of the Guadalquivir River on spatio-temporal variability of suspended solids and chlorophyll in the Eastern Gulf of Cádiz. *Mediterranean Marine Science*, 15(4), 721-738.
- Chen, Z., Hu, C., Muller-Karger, F. 2007. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109(2), 207-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.019>
- Chen, Z., Hu, C., Muller-Karger, F. E., Luther, M. E., 2010. Short-term variability of suspended sediment and phytoplankton in Tampa Bay, Florida: observations from a coastal oceanographic tower and ocean color satellites. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89(1), 62-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.05.014>
- Contreras, E., Polo, M. J. 2012. Measurement frequency and sampling spatial domains required to characterize turbidity and salinity events in the Guadalquivir estuary (Spain). *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(8), 2581-2589. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-2581-2012>
- Díez-Minguito, M., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., Navarro, G., Losada, M. 2012. Tide transformation in the Guadalquivir estuary (SW Spain) and process-based zonation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C3), 1978-2012. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JC007344>
- Díez-Minguito, M., Baquerizo, A., de Swart, H.E., Losada, M. A. 2014. Structure of the turbidity field in the Guadalquivir estuary: Analysis of observations and a box mode approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(10), 7190-7204. <http://dx.doi.org/10.1002/2014jc010210>
- Dyer, K. R. 1973. *Estuaries: A physical introduction*. John Wiley & Sons, New York, p. 140.
- Goslee, S.C. 2011. Analyzing remote sensing data in R: The landsat package. *Journal of Statistical Software*, 43(4), 1-25. <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v043.i04>
- Hijmans, R. J., Etten, J. 2011. Raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2.0-12 (<http://CRAN.R-project.org/package=raster>).
- Hu, C., Chen, Z., Clayton, T., Swarzenski, P., Brock, J., Muller-Karger, F. 2004. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 423-441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.007>
- Lahet, F., Forget, P., Ouillon, S. 2001. Application of a colour classification method to quantify the constituents of coastal waters from *in situ* reflectances sampled at satellite sensor wavebands. *International Journal of Remote Sensing*, 22(5), 909-914. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160051060444>

- Loisel, H., Bosc, E., Stramski, D., Oubelkheir, K., Deschamps, P. Y. 2001. Seasonal variability of the backscattering coefficient in the Mediterranean Sea based on satellite SeaWiFS imagery. *Geophysical Research Letters*, 28(22), 4203-4206. <http://dx.doi.org/10.1029/2001GL013863>
- Lorenz, E.N. 1956. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. Sci. Rep. Statistical Forecasting Project, Department of Meteorology, MIT, 1, 49 pp.
- Miller, R. L., McKee, B. A. 2004. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 93(1-2), 259-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.012>
- Navarro, G., Gutiérrez, F. J., Díez-Minguito, M., Losada, M., Ruiz, J. 2011. Temporal and spatial variability in the Guadalquivir estuary: a challenge for real-time telemetry. *Ocean Dynamics*, 61(6), 753-765. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-011-0379-6>
- Navarro, G., Caballero, I., Prieto, L., Vázquez, A., Flecha, S., Huertas, I. E., Ruiz, J. 2012a. Seasonal-to-interannual variability of chlorophyll-*a* bloom timing associated with physical forcing in the Gulf of Cádiz. *Advances in Space Research*, 50(8), 1164-1172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.034>
- Navarro, G., Huertas, I. E., Costas, E., Flecha, S., Díez-Minguito, M., Caballero, I., López-Rodas, V., Prieto, L., Ruiz, J., 2012b. Use of a real-time remote monitoring network (RTRM) to characterize the Guadalquivir estuary (Spain). *Sensors*, 12(2), 1398-1421. <http://dx.doi.org/10.3390/s120201398>
- Nechad, B., Ruddick, K., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>
- Nechad, B., Ruddick, K., Schroeder, T., Oubelkheir, K., Blondeau-Patissier, D., Cherukuru, N., Brando, V., Dekker, A., Clementson, L., Banks, A. C., Maritorena, S., Werdell, P. J., Sá, C., Brotas, V., Caballero de Frutos, I., Ahn, Y.-H., Salama, S., Tilstone, G., Martínez-Vicente, V., Foley, D., McKibben, M., Nahorniak, J., Peterson, T., Silió-Calzada, A., Röttgers, R., Lee, Z., Peters, M., Brockmann, C. 2015. CoastColour Round Robin datasets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters. *Earth System Science Data*, 8, 173-258. <http://dx.doi.org/10.5194/essdd-8-173-2015>
- Neckel, H., Labs, D. 1984. The solar radiation between 3300 and 12500 Å. *Solar Physics*, 90(2), 205-258. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00173953>
- Nezlin, N. P., DiGiacomo, P. M., 2005. Satellite ocean color observations of stormwater runoff plumes along the San Pedro Shelf (southern California) during 1997–2003. *Continental Shelf Research*, 25(14), 1692-1711. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2005.05.001>
- Ondrusek, M., Stengel, E., Kinkade, C. S., Vogel, R. L., Keegstra, P., Hunter, C., Kim, C. 2012. The development of a new optical total suspended matter algorithm for the Chesapeake Bay. *Remote Sensing of Environment*, 119, 243-254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.018>
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Siegel, D. A., O'Brien, M. C., Toole, D., Mitchell, B. G., et al., 2000. Ocean color chlorophyll *a* algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. *SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses*, 3, 9-23.
- Otero, M. P., Siegel, D. 2004. Spatial and temporal characteristics of sediment plumes and phytoplankton blooms in the Santa Barbara Channel. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(10), 1129-1149.
- Parsons, T.R., Maita, Y., Lalli, C.M. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Prieto, L., Navarro, G., Rodríguez-Gálvez, S., Huertas, I. E., Naranjo J. M., Ruiz, J. 2009. Oceanographic and meteorological forcing of the pelagic ecosystem on the Gulf of Cádiz shelf (SW Iberian Peninsula). *Continental Shelf Research*, 29(17), 2122-2137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.08.007>
- Ritchie, J. C., Cooper, C. M. 1988. Comparison of measured suspended sediment concentrations with suspended sediment concentrations estimated from Landsat MSS data. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 379-387. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168808954861>
- Ritchie, J. C., Cooper, C. M., Schiebe, F. R. 1990. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environment*, 33(2), 137-148. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90039-O](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(90)90039-O)
- Ruiz, J., González-Quirós, R., Prieto, L., Navarro, G. 2009. A Bayesian model for anchovy (*Engraulis encrasicolus*): The combined forcing of man and environment. *Fisheries Oceanography*, 18(1), 62-76. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2419.2008.00497.x>
- Sá, C., Da Silva, J., Oliveira, P. B., Brotas, V. 2008. Comparison of MERIS (Algal_1 and Algal_2) and MODIS (OC3M) chlorophyll products and validation with HPLC *in situ* data collected off the Western Iberian Peninsula. *Proceedings of the 2nd MERIS/(A) ATSR User Workshop*, Frascati, Italy, 22-26 September.

- Shen, F., Salama, M., Zhou, Y., Li, J., Su, Z., Kuang, D. 2010. Remote-sensing reflectance characteristics of highly turbid estuarine waters – a comparative experiment of the Yangtze River and the Yellow River. *International Journal of Remote Sensing*, 31(10), 2639-2654. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160903085610>
- Stumpf, R. P., Gelfenbaum, G., Pennock, J. R. 1993. Wind and tidal forcing of a buoyant plume, Mobile Bay, Alabama. *Continental Shelf Research*, 13(11), 1281-1301. [http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343\(93\)90053-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0278-4343(93)90053-Z)
- Thomas, A. C., Weatherbee, R. A. 2006. Satellite-measured temporal variability of the Columbia River plume. *Remote Sensing of Environment*, 100(2), 167-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.018>
- Toole, D. A., Siegel, D. A., 2001. Modes and mechanisms of ocean color variability in the Santa Barbara Channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 106(C11), 26985-27000. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JC000371>
- UNESCO, 1994. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements. IOC Manuals and Guides. Paris, UNESCO, 170 pp.
- Valente, A.S., da Silva, J.C. 2009. On the observability of the fortnightly cycle of the Tagus estuary turbid plume using MODIS ocean colour images. *Journal of Marine Systems*, 75(1), 131-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.08.008>

