

# Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HICO

Delegido, J.\*, Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Peña, R., Moreno, J.

*Laboratorio de Procesamiento de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia, España.*

---

**Resumen:** La concentración de clorofila-a es uno de los principales indicadores de la calidad de las aguas continentales. A partir de imágenes del sensor CHRIS/PROBA y de datos obtenidos en campañas de medida en lagos en Colombia y España, se han obtenido modelos empíricos para la estimación de la concentración de clorofila-a, directamente aplicables a los futuros sensores de la ESA, MSI de Sentinel-2 y OLCI de Sentinel-3. Los modelos, basados en índices de bandas espectrales, se han validado con datos del sensor hiperespectral HICO, a bordo de la Estación Espacial Internacional.

**Palabras clave:** aguas continentales, clorofila, CHRIS/PROBA, Sentinel-2, Sentinel-3, OLCI, MSI, HICO.

## Empirical model for chlorophyll-a determination in inland waters from the forthcoming Sentinel-2 and 3. Validation from HICO images

**Abstract:** Chlorophyll-a concentration is one of the main indicators of inland waters quality. Using CHRIS/PROBA images and *in situ* data obtained in four lakes in Colombia and Spain, we obtained empirical models for the estimation of chlorophyll-a concentration, which can be directly applied to future images of MSI Sentinel-2 and OLCI Sentinel-3 sensors. The models, based on spectral band indices, were validated with data from the hyperspectral sensor HICO, onboard of the International Space Station.

**Key words:** inland waters, chlorophyll, CHRIS/PROBA, Sentinel-2, Sentinel-3, OLCI, MSI, HICO.

---

### 1. Introducción

El estudio de calidad de aguas continentales a través de teledetección tiene un gran interés, por lo que en los últimos años, se han desarrollado varios modelos que permiten la estimación de algunos parámetros biofísicos de interés en aguas continentales mediante técnicas de teledetección (Gons *et al.*, 2002, 2005; Dall’Olmo y Gitelson, 2005, 2006; Matthews, 2011; Odermatt *et al.*, 2012).

En general, estos métodos se basan en la cuantificación de aquellas sustancias disueltas o partículas en suspensión que modifican las propiedades ópticas de la masa de agua. Uno de los parámetros más utilizados para determinar el nivel de eutrofización en el agua es la concentración de clorofila-a [Chl-a], que es el principal pigmento fotosintético presente en las algas (Gregor y Maršálek, 2004). La concentración de clorofila se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades

\* Autor para la correspondencia: [Jesus.Delegido@uv.es](mailto:Jesus.Delegido@uv.es)

fitoplanctónicas y también es un indicador del grado de contaminación de los ecosistemas acuáticos y un importante índice del estado fisiológico del fitoplancton.

Actualmente, existen varios sensores cuya resolución espacial y espectral está diseñada para el estudio de aguas continentales, como es el caso del sensor *Compact High Resolution Imaging Spectrometer* (CHRIS) a bordo de la plataforma *Project for On-Board Autonomy* (PROBA), de la Agencia Espacial Europea (ESA). Los productos CHRIS/PROBA Nivel 1A pueden obtenerse en 5 modos de adquisición con diferentes configuraciones de acuerdo al tipo de superficie que se requiera analizar. El modo 2 o modo agua, que corresponde a las imágenes utilizadas en este trabajo, consta de 18 bandas espectrales entre 411 y 1.019 nm y una resolución espacial de 17 m (Tabla 1), fue diseñado con el objetivo de hacer estudios de calidad del agua, situando sus bandas en las posiciones espectrales determinantes para conocer el espectro de reflectividad del agua continental. Además, CHRIS/PROBA adquiere 5 imágenes de cada sitio con 5 ángulos diferentes de observación.

Por otro lado, se debe tener en cuenta la importancia de la utilización de futuras misiones en el estudio de la calidad del agua, que mejorarán sensiblemente los recursos con los que actualmente se cuenta, muy mermados desde la pérdida de la señal del sensor MERIS a bordo de Envisat de la ESA. Dentro del componente espacial del programa europeo *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), se incluyen cinco misiones de satélites Sentinel de las cuales dos de ellas son: Sentinel-2, cuyo sensor se denomina MSI (*Multi Spectral Instrument*) con 13 bandas espectrales en el visible e infrarrojo entre 443 y 2.190 nm (Tabla 1) y resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m, que mejora Landsat y SPOT con periodos de revisita de 2-3 días en latitudes medias; y Sentinel-3, que incluye el *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI) especialmente diseñado para estudios sobre el agua, con una resolución espacial de 300 m y 21 bandas espectrales entre 400 y 1.020 nm (Tabla 1), mejorando la calidad de las imágenes MERIS.

## 2. Materiales

Se han utilizado tres bases de datos diferentes: la primera, que incluye datos de 4 lagos muy distintos, ha sido usada para la selección del mejor

**Tabla 1.** Configuración de bandas de los sensores CHRIS/PROBA modo 2, MSI de Sentinel-2 y OLCI de Sentinel-3. Las bandas coincidentes en los 3 sensores se resaltan en rojo (■), mientras que las coincidentes en CHRIS/PROBA y OLCI se resaltan en amarillo (■). CWL=Longitud de onda central, BW=Ancho de banda.

CHRIS/PROBA		MSI		OLCI	
Modo 2		Sentinel-2		Sentinel-3	
CWL	BW	CWL	BW	CWL	BW
(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
				400	15
411	10			413	10
442	9	443	20	443	10
490	9	490	65	490	10
510	10			510	10
530	9				
561	10	560	35	560	10
570	8				
590	12				
622	9			620	10
651	10				
		665	30	665	10
672	11			674	7,5
680	6			681	7,5
686	6				
706	12	705	15	709	10
		740	15		
755	7			754	7,5
				761	2,5
				764	3,75
				768	2,5
781	15	783	20	779	15
		842	115		
		865	20	865	20
872	18				
				885	10
				900	10
		945	20	940	20
1.019	33			1.020	40
		1.375	30		
		1.610	90		
		2.190	180		

modelo. La segunda, obtenida en La Albufera de Valencia, ha servido para la calibración del modelo; y la tercera, también de la Albufera, basada en imágenes del sensor hiperespectral HICO (*Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean*) a bordo de la Estación Espacial Internacional (Lucke et al., 2011) ha sido usada como validación.

## 2.1. Campañas de campo para selección del modelo

Los datos usados para elegir las bandas y el modelo matemático óptimo para los futuros Sentinel-2 y 3 corresponden a medidas de [Chl-a] de cuatro lagos con características muy diferentes y distintas concentraciones de clorofila, localizados en Colombia y España. En Colombia fueron estudiados dos lagos cercanos a la ciudad de Barrancabermeja, en la región del Magdalena Medio (Figura 1). En el lago Juan Esteban ( $7^{\circ}05'58''\text{N}$ ,  $73^{\circ}49'45''\text{W}$ ), poco profundo y con una alta carga de sedimentos debido a su cercanía con el Río Magdalena, se tomaron 3 muestras de agua en las que se determinó la [Chl-a] por espectrofotometría de acuerdo al protocolo descrito en la norma ISO 10260, variando los

valores obtenidos entre 43 y 60  $\mu\text{g/L}$ . En la misma campaña, realizada en enero de 2011, en el lago San Silvestre ( $7^{\circ}01'35''\text{N}$ ,  $73^{\circ}50'41''\text{W}$ ), con agua de mayor transparencia y fuente de agua potable para las poblaciones cercanas, se obtuvieron 5 muestras con [Chl-a] entre 9 y 25  $\mu\text{g/L}$ . En estos dos lagos se realizaron medidas *in situ* de radiancias con el instrumento Ocean Optics USB4000.

En España, los datos de campo han sido obtenidos en dos masas de agua: la Albufera de Valencia y el embalse de Rosarito. La laguna de la Albufera se encuentra ubicada en la zona costera de la provincia de Valencia (España), ( $39^{\circ}20'10''\text{N}$ ,  $0^{\circ}21'10''\text{W}$ ) (Figura 2). La Albufera es un antiguo golfo, que quedó aislado del mar por una barra litoral de arena, alimentado en la actualidad por las aguas dulces de barrancos, acequias y surgencias. Su dinámica

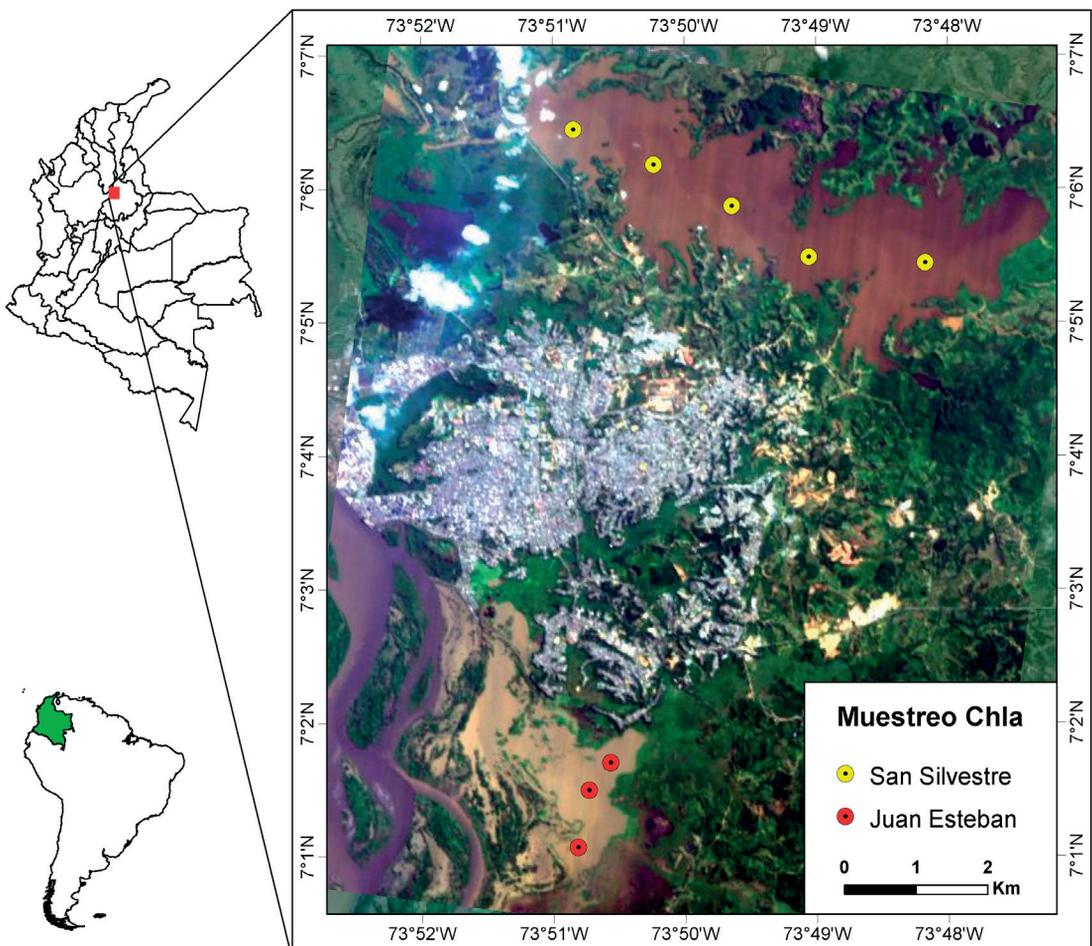


Figura 1. Localización de los puntos de muestreo en los lagos de Colombia superpuestos a una imagen CHRIS/PROBA del 21 de mayo de 2011.

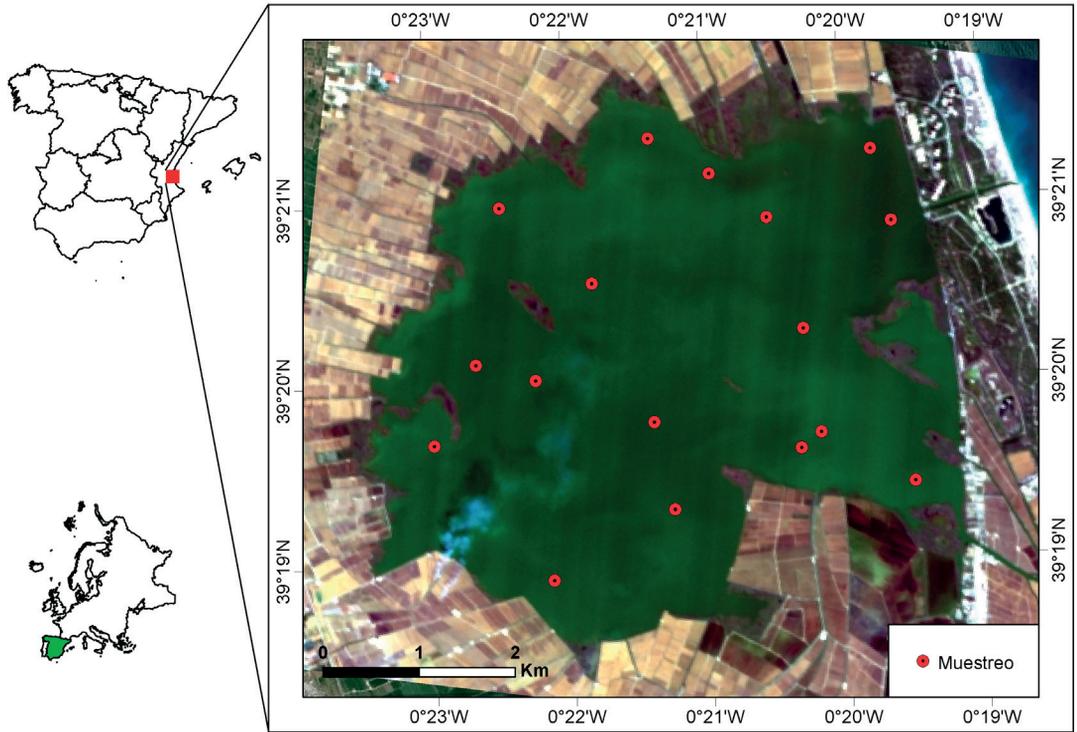


Figura 2. Localización de los puntos de muestreo en la Albufera en una imagen RGB CHRIS/PROBA.

natural está muy modificada por las necesidades de los cultivos de arroz que la circundan, que regulan su inundación mediante compuertas que comunican a la Albufera con el mar (Soria y Vicente, 2002). En esta campaña, realizada por el CEDEX, se tomaron

17 medidas de clorofila-a, en dos fechas diferentes (11 de agosto y 26 de septiembre de 2006), con un rango que varió entre 44 y 158  $\mu\text{g/L}$ . El muestreo se realizó de modo que la fecha de toma coincidiera con la fecha de adquisición de las imágenes

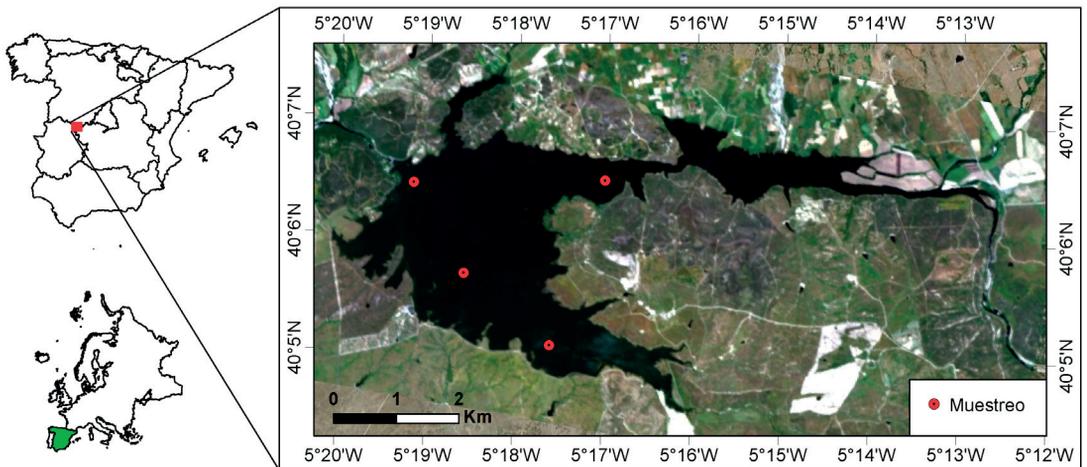


Figura 3. Localización de los puntos de muestreo en el Embalse de Rosarito en una imagen RGB CHRIS/PROBA.

CHRIS/PROBA. La reflectividad de cada punto se extrajo de las imágenes, ya que ésta no fue medida en campo. Para este caso, la medida *in situ* de la [Chl-a] fue obtenida por medio de un fluorómetro Chelsea MiniTrackA.

El embalse de Rosarito se encuentra localizado en la zona donde convergen las regiones de Castilla y León, Extremadura y Castilla-La Mancha (España), (40°6'0"N, 5°18'25"W) (Figura 3). Es un embalse eutrófico, dominado gran parte del año por cianobacterias. En esta campaña realizada por el CEDEX, se obtuvieron 18 medidas de [Chl-a] por espectrofotometría de acuerdo al protocolo descrito en la norma ISO 10260, y se hicieron medidas de radiometría usando el espectrorradiómetro ASD-FR (*Analytical Spectral Devices, Inc.*, con rango entre 350 y 2.500 nm y resolución entre 2 y 3 nm) en las siguientes fechas: 22 de abril, 20 de mayo, 1, 8 y 22 de julio de 2004. Las muestras de diferentes fechas se tomaron en las mismas coordenadas (Figura 3). El rango de [Chl-a] obtenido varió entre 15 y 137 µg/L.

En resumen, en esta base de datos disponemos de 43 medidas de [Chl-a] junto a radiometría, en algunos sitios obtenida *in situ* (Rosarito y lagos de Colombia) y en la Albufera con reflectividad del sensor CHRIS. Con el fin de uniformizar los datos, la radiometría medida *in situ* fue procesada para obtener espectros simulados con la configuración de 18 bandas del sensor CHRIS/PROBA (Modo 2). Para ello se realizó una convolución teniendo en cuenta la respuesta espectral del instrumento CHRIS en Modo 2.

## 2.2. Campañas de campo para calibración y validación en la Albufera

Para la calibración de los modelos obtenidos para aguas hipertróficas, se utilizaron 20 muestras que incluyen medidas radiométricas *in situ* usando el espectrorradiómetro ASD-FR y [Chl-a] obtenidas por espectrofotometría (norma ISO 10260), tomadas en la Albufera de Valencia en 2002, 2005 y 2007 en varias campañas realizadas por el CEDEX (Ministerio de Fomento). El rango de [Chl-a] obtenido varió entre 30 y 500 µg/L.

Para validar los modelos obtenidos tras la calibración de los índices, se utilizaron 15 muestras de [Chl-a] medidas por fluorometría el 23 y 26 de febrero y el 23 de marzo de 2013, por el grupo de

Ecología de la Universidad de Valencia, junto con valores de reflectividad obtenidos de 3 imágenes del sensor HICO, que corresponden a las fechas de los muestreos. En total se disponía de 15 medidas con un rango de [Chl-a] entre 30 y 150 µg/L. Se decidió realizar la validación en esta base de datos para probar si el modelo mantiene su predictibilidad al aplicarlo en imágenes de satélite de un sensor distinto al que se había usado en la calibración.

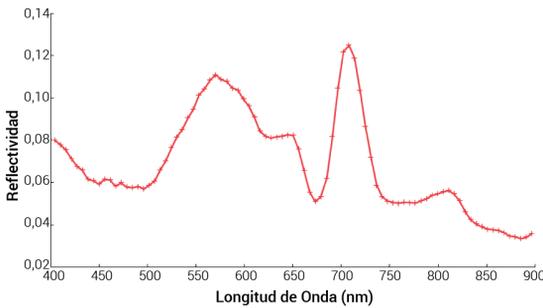
## 2.3. Imágenes de satélite

En la base de datos usada para la determinación de la mejor relación entre bandas, se han usado espectros del sensor CHRIS/PROBA con la configuración de 18 bandas del Modo 2 (aguas). La corrección atmosférica se realizó mediante la inversión de los parámetros atmosféricos en tablas de búsqueda previamente construidas con el código de transferencia radiativa MODTRAN4. Asimismo, para la modelización de la radiancia en la atmósfera se supuso un comportamiento lambertiano de la reflectividad, siguiendo el proceso descrito por Alonso *et al.* (2009).

Para la validación del calibrado propuesto para la Albufera se utilizaron datos de reflectividad obtenidos a partir de imágenes HICO, que es un sensor hiperespectral diseñado por el Laboratorio de Investigación Naval (NRL) de los EE.UU, para el monitoreo de la costa y el océano (OSU, 2009). Se encuentra instalado a bordo de la Estación Espacial Internacional, desde donde obtiene imágenes de 42×192 km con una resolución espacial de 100 m/píxel. Registra 128 bandas espectrales en el rango espectral de 350 a 1.070 nm con un ancho de banda de 5,7 nm, de las cuales sólo un subconjunto de estas (87 bandas de 400 a 900 nm) está incluido en los archivos de datos. Una vez el sensor comienza a obtener las medidas hiperespectrales, éstas son procesadas por el NRL a través de una secuencia de módulos de software para transformar los paquetes de datos en bruto en imágenes de nivel 1B. Este procesamiento incluye el filtro de píxeles oscuros, calibrado del sensor, corrección de segundo orden, calibración espectral y calibración de la radiancia (OSU, 2009; Lewis *et al.*, 2009; Lucke *et al.*, 2011).

Para llevar a cabo la corrección atmosférica de la imagen HICO se empleó el método de corrección atmosférica QUAC (*QUick Atmospheric*

Correction) (Bernstein et al., 2005) especialmente diseñado para imágenes multi e hiperespectrales que trabajan en el rango VNIR-SWIR (*Visible Near Infra Red & Short Wave Infra Red*). Dicho método está basado en el comportamiento estadístico de la imagen, y suponiendo que la desviación estándar de una colección de espectros representativos de la imagen, denominados “end-members”, tiene un comportamiento espectralmente plano. QUAC supone linealidad entre la reflectividad espectral y la radiancia medida como una aproximación válida para la mayoría de las escenas. Además, la naturaleza estadística de esta metodología hace que la obtención de los espectros de reflectividad sea de buena calidad incluso en aquellos sensores donde la calibración radiométrica no sea del todo precisa o cuando la irradiancia solar sea desconocida (Bernstein et al., 2005). En la Figura 4 se observa un espectro de reflectividad de agua obtenido por el método de QUAC de un promedio de 9 píxeles de una imagen HICO de la Albufera, donde se muestra en detalle la respuesta espectral típica de un lago hipertrófico.



**Figura 4.** Bandas (+) del sensor HICO en un espectro de reflectividad de agua obtenido como promedio de 9 píxeles de la Albufera.

### 3. Métodos

La metodología empleada consistió en utilizar varias relaciones matemáticas entre las reflectividades de diferentes bandas con diferentes índices usados en teledetección de calidad de aguas (Matthews, 2011) y añadiendo otros, teniendo en cuenta las combinaciones de bandas aplicables a MSI de Sentinel-2 y a OLCI de Sentinel-3, para encontrar su mejor correlación con la [Chl-a]. En la Tabla 2 se muestran las 14 diferentes relaciones matemáticas utilizadas. El análisis se realizó en la base de datos de las cuatro masas de agua de España y Colombia,

diferenciando por masa de agua y en conjunto y probando todas las combinaciones de bandas posibles, en relaciones empíricas de 2, 3 y 4 bandas. Las relaciones matemáticas utilizadas son índices sencillos, aunque algunas son similares a las de los modelos de Gons et al. (2005) y de Dall’Olmo y Gitelson (2006).

Para cada relación, se calculó la matriz de correlación entre todas las combinaciones de bandas y se seleccionaron aquellas combinaciones que presentaban mayor correlación lineal, de acuerdo a los

**Tabla 2.** Relaciones matemáticas empleadas para hallar la mejor correlación de la reflectividad con la concentración de clorofila-a.  $R_{\lambda i}$  es la reflectividad en la longitud de onda  $\lambda i$ .

No	Relación Matemática	Nombre
Modelos con 2 bandas		
A	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}}$	Cociente simple
B	$\frac{1}{R_{\lambda 1}} - \frac{1}{R_{\lambda 2}}$	Diferencia de inversas
C	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}}$	Cociente de diferencia y suma tipo NDVI
Modelos con 3 bandas		
D	$\frac{R_{\lambda 1} R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3}}$	Cociente de producto por banda
E	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2} R_{\lambda 3}}$	Cociente de banda por producto
F	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3}}$	Cociente de diferencia por una banda
G	$\frac{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3}}$	Cociente de suma por una banda
H	$\left(\frac{1}{R_{\lambda 1}} - \frac{1}{R_{\lambda 2}}\right) \times R_{\lambda 3}$	Modelo tipo Dall’Olmo & Gitelson
Modelos con 4 bandas		
I	$\frac{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3} + R_{\lambda 4}}$	Cociente de sumas
J	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3} + R_{\lambda 4}}$	Cociente de diferencia y suma
K	$\frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 3} - R_{\lambda 4}}$	Cociente de diferencias
L	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}} + \frac{R_{\lambda 3}}{R_{\lambda 4}}$	Suma de 2 cocientes
M	$\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}} - \frac{R_{\lambda 3}}{R_{\lambda 4}}$	Diferencia de 2 cocientes
N	$\frac{R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_{\lambda 3}}{R_{\lambda 4}}$	Cociente de suma de 3 bandas por una

valores del coeficiente de determinación  $R^2$ . Con ello se determinó qué modelo presentaba mayor correlación lineal con [Chl-a] para cada caso, tanto en conjunto como por masa de agua, teniendo en cuenta además su simplicidad y su aplicabilidad a MSI de Sentinel-2 y a OLCI de Sentinel-3. Se seleccionaron los mejores índices, tanto para Sentinel-2 como para Sentinel-3, teniendo en cuenta que presentan los mayores valores de  $R^2$  y cuando son muy similares se seleccionan los más sencillos y que usan menos bandas.

Una vez obtenidos ambos índices, se calibró el método con la segunda base de datos de la Albufera y se validó con la tercera base de datos que incluye imágenes del sensor HICO para, al final, obtener mapas de [Chl-a] usando los índices propuestos a partir de una imagen HICO.

#### 4. Resultados y análisis

En la Tabla 3 se presentan los valores de  $R^2$  obtenidos para las mejores combinaciones para cada masa de agua por separado y para todos los lagos conjuntamente de los modelos matemáticos utilizados, con las bandas correspondientes que proporcionan mejor correlación.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 3, y teniendo en cuenta sólo el valor de  $R^2$  para todos los datos, observamos que el máximo (0,82) se obtiene en tres casos: modelos B, J y M, y que en todos ellos aparecen las bandas 590 y 706 nm, lo cual tiene sentido pues pone en relación el pico del verde (ver Figura 4) que es una región poco afectada por la absorción de los pigmentos, con el pico de 706 nm (Figura 4) que responde principalmente al backscattering del fitoplancton y que por tanto se incrementa cuando aumenta su biomasa. La combinación de las bandas CHRIS/PROBA centradas en 590 y 706 nm, también aparece en todos los modelos salvo el D y el E. Sin embargo, para este trabajo no se tuvo en cuenta esta combinación de bandas, porque la banda 590 nm no está ni en MSI de Sentinel-2 ni en OLCI de Sentinel-3 aunque disponen de una banda muy cercana situada en 560 nm (Tabla 1).

Por tanto, para buscar las mejores combinaciones que más se ajustan a la configuración del sensor MSI de Sentinel-2, observando todas las filas en amarillo de la Tabla 3, vemos que la combinación de las bandas centradas en 706 y 490 nm se repite

en todos los modelos. Los tres modelos de mayor  $R^2$  calculado con todos los datos (0,67) corresponden a los modelos E, I y J, que usan 3 y 4 bandas. Se observa también que la diferencia entre estos tres, y el modelo A, que utiliza sólo dos bandas, no son muy significativas pues aunque disminuye algo  $R^2$  (0,61) para todos, aumenta en muchos casos al analizar los lagos individualmente. Teniendo en cuenta el principio de parsimonia aplicado a la estadística, que dice que de un conjunto de variables explicativas que forman parte del modelo a estudiar, debe seleccionarse la combinación más reducida y simple posible, el modelo elegido en principio como más recomendable para usar en Sentinel 2 sería un modelo basado en las bandas más semejantes a las del modelo A. Por ello definimos un Índice Sentinel-2 (IS2) como:

$$IS2 = \frac{R_{706}}{R_{490}} \quad (1)$$

Para el caso de Sentinel-3, analizando las filas en rojo de la Tabla 3, observamos que los modelos de mayor  $R^2$  calculado con todos los datos (0,81) son el I, J, M y N seguidos de cerca por el C y el K ( $R^2 = 0,80$ ). En todos ellos aparece la combinación entre las bandas centradas en 706 y 622 nm, que también aparece en todos los modelos menos el E. Se observa también que la diferencia entre todos estos modelos, y el modelo A, que utiliza sólo dos bandas, no son muy significativas pues aunque disminuye algo  $R^2$  (0,79) para todos, aumenta en muchos casos al analizar los lagos individualmente, de forma similar a lo que ocurría con el Sentinel-2. Por tanto, siguiendo los criterios aplicados anteriormente (principio de parsimonia), se escogió el modelo A como índice para Sentinel-3, por mayor simplicidad. De manera que definimos el Índice Sentinel-3 (IS3) como:

$$IS3 = \frac{R_{706}}{R_{622}} \quad (2)$$

Con el objetivo de poder aplicar ambos índices a un lago hipertrófico como es el caso de la Albufera, ambos índices han sido calibrados utilizando medidas de [Chl-a] y radiometría *in situ*, de la base de datos descrita en el apartado 2.2. Con ellos se han obtenido las siguientes ecuaciones para cada índice:

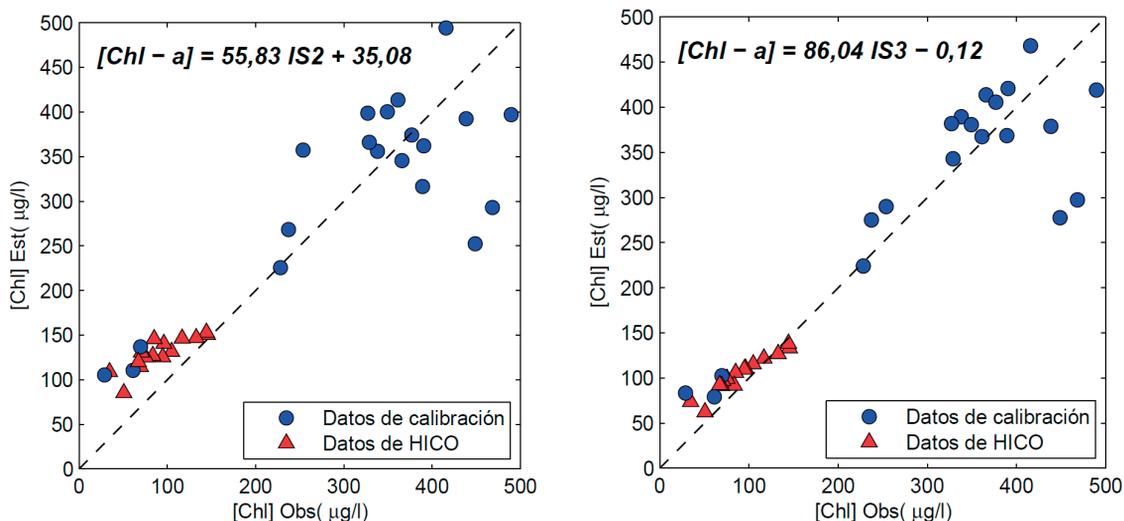
$$[Chl-a] = 55,83 IS2 + 35,08 \quad R^2 = 0,62 \quad (3)$$

$$[Chl-a] = 86,04 IS3 - 0,12 \quad R^2 = 0,74 \quad (4)$$

Donde [Chl-a] se da en  $\mu\text{g/L}$ .

**Tabla 3.** Resultados de R<sup>2</sup> para cada modelo matemático y para cada lago (JE=Juan Esteban, SS=San Silvestre, A=Albufera, R=Rosarito, T=Todos). Las mejores combinaciones resultantes se presentan sombreadas en azul (■), las mejores combinaciones para Sentinel-3 en rojo (■) y las mejores para Sentinel-2 en amarillo (■). R<sub>λ</sub> representa la reflectividad en la longitud de onda λ (en nm). Se han escrito en rojo los números correspondientes a los índices seleccionados (\*).

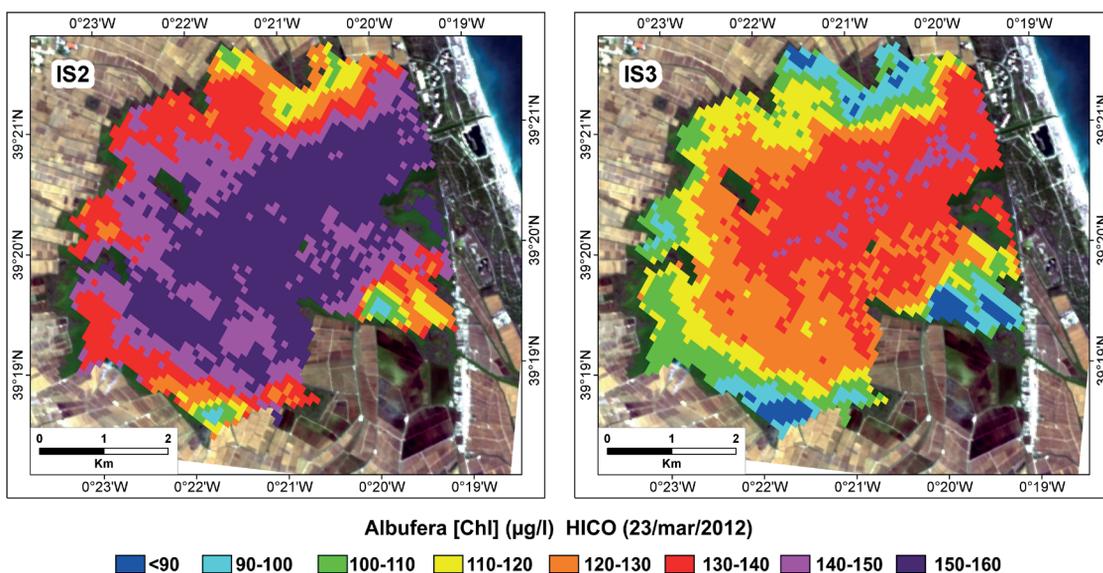
Modelo	Bandas				R <sup>2</sup>				
	λ1	λ2	λ3	λ4	JE	SS	A	R	T
A	Rλ1 / Rλ2								
	* 706	490			0,03	0,81	0,78	0,45	0,61
	706	590			0,89	0,88	0,81	0,69	0,76
B	(1/Rλ1) - (1/Rλ2)								
	* 706	622			1,00	0,87	0,81	0,66	0,79
	490	706			0,17	0,67	0,74	0,31	0,64
C	(Rλ1 - Rλ2) / (Rλ1 + Rλ2)								
	490	706			0,06	0,80	0,70	0,44	0,54
	590	706			0,90	0,88	0,81	0,69	0,79
D	(Rλ1 × Rλ2) / Rλ3								
	706	706	490		0,12	0,68	0,63	0,47	0,37
	706	706	622		0,95	0,71	0,71	0,58	0,56
E	Rλ1 / (Rλ2 × Rλ3)								
	706	490	490		0,10	0,62	0,76	0,29	0,67
	781	490	622		1,00	0,77	0,81	0,51	0,66
F	(Rλ1 - Rλ2) / Rλ3								
	490	706	490		0,03	0,81	0,78	0,45	0,61
	590	706	686		0,93	0,88	0,82	0,70	0,79
G	(Rλ1 + Rλ2) / Rλ3								
	490	706	490		0,03	0,81	0,78	0,45	0,61
	622	706	622		1,00	0,87	0,81	0,66	0,79
H	(Rλ1-1 - Rλ2-1) × Rλ3								
	490	706	706		0,03	0,81	0,78	0,45	0,61
	590	706	570		0,85	0,88	0,80	0,69	0,81
I	(Rλ1 + Rλ2) / (Rλ3 + Rλ4)								
	561	706	561	622	1,00	0,87	0,81	0,66	0,81
	706	781	490	781	0,01	0,56	0,73	0,42	0,67
J	(Rλ1 - Rλ2) / (Rλ3 + Rλ4)								
	490	706	490	781	0,01	0,56	0,73	0,42	0,67
	590	706	672	781	1,00	0,88	0,84	0,70	0,82
K	(Rλ1 - Rλ2) / (Rλ3 - Rλ4)								
	490	561	561	781	0,21	0,92	0,51	0,40	0,28
	622	706	490	561	0,81	0,87	0,80	0,68	0,80
L	(Rλ1 / Rλ2) + (Rλ3 / Rλ4)								
	680	672	706	622	0,98	0,85	0,81	0,67	0,80
	686	590	706	622	0,76	0,90	0,80	0,70	0,79
M	(Rλ1 / Rλ2) - (Rλ3 / Rλ4)								
	561	590	570	706	0,63	0,89	0,78	0,68	0,82
	561	706	706	490	0,02	0,85	0,81	0,53	0,59
N	(Rλ1 + Rλ2 + Rλ3) / Rλ4								
	622	561	706	561	0,99	0,87	0,82	0,67	0,81
	490	561	781	706	0,00	0,75	0,84	0,56	0,58
	561	622	622	706	0,91	0,88	0,80	0,67	0,81
	622	686	706	622	0,84	0,90	0,80	0,69	0,80



**Figura 5.** [Chl-a] estimada en la Albufera con los índices IS2 (izquierda) e IS3 (derecha) en función de la [Chl-a] observada *in situ* en las bases de datos usadas para calibración (círculos azules) y para validación (triángulos rojos).

Para la validación de ambos índices y sus calibraciones, se han aplicado las ecuaciones 3 y 4 a los espectros obtenidos de las tres imágenes HICO y calculado el valor de [Chl-a]. Posteriormente se ha comparado el valor calculado de [Chl-a] con los valores experimentales obtenidos en la Albufera de la tercera base de datos, descrita en la sección 2.2. En la Figura 5 se muestran los resultados (puntos en rojo para validación y en azul para calibración).

Como se observa en la Figura 5, los datos usados para validación se aproximan bastante a la recta 1:1 (diagonal en trazo discontinuo). El estadístico que nos permite cuantificar la bondad de método en este caso sería la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE). Para el caso del índice IS2, el valor de RMSE es de 43 µg/L, mientras que para el IS3 es de 19 µg/L, ambos valores aceptables para datos obtenidos por teledetección, siendo claramente



**Figura 6.** Mapas de [Chl-a] (en µg/L) obtenidos aplicando la calibración de los índices IS2 (izquierda) e IS3 (derecha).

mejor para IS3 con menores errores de estimación. Esto se debe, posiblemente, a la baja relación señal/ruido de la banda 490, y a la dificultad de obtener la reflectividad real en esta franja del espectro fuertemente condicionada por la determinación de los aerosoles en la corrección atmosférica, por lo que utilizar una longitud de onda mayor (622 nm), proporciona resultados más fiables.

Como ejemplo, se han aplicado ambos índices a la imagen HICO de la Albufera del 23 de marzo de 2012 con lo que se han obtenido dos mapas de [Chl-a] muy similares entre sí. Aunque aparentemente los valores estimados por IS2 (Fig. 6 izquierda) son ligeramente superiores a los estimados por el índice IS3 (derecha), las diferencias son del orden de 10 µg/L, inferiores en todo caso al RMSE.

## 5. Conclusiones

Utilizando un enfoque empírico y a partir de un grupo de datos heterogéneos, se han probado 14 índices para la determinación de la concentración de clorofila-a en aguas continentales. Los índices muestran una buena correlación lineal con [Chl-a] en la base de datos utilizada, con un  $R^2$  en torno a 0,8 en muchos casos, observándose que en la inmensa mayoría de los índices las mejores correlaciones se obtienen cuando se usan las bandas centradas en 590 y 706 nm. Sin embargo la banda de 590 no se encuentra ni en Sentinel-2 ni en Sentinel-3, por ello se han buscado otras combinaciones que también presenten buena correlación.

Para el futuro sensor MSI de Sentinel-2, aplicando el principio de parsimonia, se propone un índice basado en el cociente de reflectividad de las bandas de 706 y 490 nm. El índice ha sido calibrado y validado con imágenes HICO, permitiendo obtener la [Chl-a] con RMSE de 43 µg/L en el lago de la Albufera.

De manera similar, para OLCI de Sentinel-3 se propone un índice basado en el cociente entre las bandas de 706 y 622 nm. También este índice ha sido calibrado con imágenes HICO de la Albufera permitiendo obtener la [Chl-a] con RMSE de 19 µg/L.

En ambos casos se puede concluir que, cuando Sentinel-2 y -3 estén en funcionamiento, el calibrado con las mismas imágenes que vayan a usarse de manera sistemática, permitirá disminuir los errores propios del método.

En resumen, se ha puesto de manifiesto la posibilidad de estudiar, con los futuros Sentinel-2 y 3, la calidad del agua de estos sistemas lacustres, que sólo en Colombia se cuentan por millares y que ocupan centenares de miles de hectáreas. Las imágenes de Sentinel-2, con 20 m de resolución espacial, permitirán estudiar los patrones de variación espacial con mayor detalle y en masas de agua de menor tamaño; mientras que las imágenes de Sentinel-3, para las que los modelos producen menor error, pueden ser usadas en lagos y embalses más grandes por su resolución de 300 m.

## Agradecimientos

Se agradece al CEDEX por facilitarnos los datos de radiometría *in situ* y de [Chl-a] del Embalse de Rosarito y La Albufera, y al Grupo de Ecología de la Universidad de Valencia por los datos de [Chl-a] medidos en la Albufera.

## Referencias

- Alonso, L., Gómez-Chova, L., Moreno, J., Guanter, L., Brockmann, C., Fomferra, N., Regner, P. 2009. CHRIS/PROBA Toolbox for hyperspectral and multiangular data exploitations. En: *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 12-17, Cape Town, South Africa. 2: 202-205.
- Bernstein, L., Adler-Golden, S., Sundberg, R., Levine, R., Perkins, T., Berk, A., Ratkowski, A., Felde, G., Hoke, M. 2005. A New Method for Atmospheric Correction and Aerosol Optical Property Retrieval for VIS-SWIR Multi- and Hyperspectral Imaging Sensors: QUAC (QUick Atmospheric Correction). En: *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 25-29, Seoul, Korea. 5: 3549-3552.
- Dall'Olmo, G., Gitelson, A., 2005. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Applied Optics*, 44(3): 412-422. doi:10.1364/AO.44.000412
- Dall'Olmo, G., Gitelson, A. 2006. Effect of bio-optical parameter variability and uncertainties in reflectance measurements on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: Modeling results. *Applied Optics*, 45(15): 3577-3592. doi:10.1364/AO.45.003577

- Gons, H.J., Rijkeboer, M., Ruddick, K.G. 2002. A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (Medium Resolution Imaging Spectrometer) of inland and coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 24(9): 947-951. doi:10.1093/plankt/24.9.947
- Gons, H.J., Rijkeboer, M., Ruddick, K.G. 2005. Effect of a waveband shift on chlorophyll retrieval from MERIS imagery of inland and coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 27(1): 125-127. doi:10.1093/plankt/fbh151
- Gregor, J., Maršálek, B. 2004. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: A comparative study of *in vitro*, *in vivo* and *in situ* methods. *Water Research*, 38(3): 517-522. doi:10.1016/j.watres.2003.10.033
- Lewis, M., Gould, R., Arnone, R., Lyon, P., Martinolich, P., Vaughan, R., Lawson, A., Scardino, T., Hou, W., Snyder, W., Lucke, R., Corson, M., Montes, M., Davis, C., 2009. The Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO): Sensor and data processing overview. En: *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, October 26-29, Biloxi, Mississippi, USA, pp. 1-9.
- Lucke, R.L., Corson, M., McGlothlin, N.R., Butcher, S.D., Wood, D.L., Korwan, D.R., Li, R.R., Snyder, W.A., Davis, C.O. and Chen, D.T. 2011. Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: instrument description and first images. *Applied Optics*, 50(11): 1501-1516. doi:10.1364/AO.50.001501
- Matthews, M.W. 2011. A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21): 6855-6899. doi:10.1080/01431161.2010.512947
- Odermatt, D., Gitelson, A., Brando, V. E., Schaepman, M., 2012. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118: 116-126. doi:10.1016/j.rse.2011.11.013
- OSU (Oregon State University). 2009. Data Characteristics. En *HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean)*. Último acceso: 18 marzo 2014, de <http://hico.coas.oregonstate.edu/index.shtml>
- Soria, J.M., Vicente, E. 2002. Estudios de los aportes hídricos al parque natural de la Albufera de Valencia. *Limnetica*, 2: 105-115.