XVI SIMPOSIO INTERNACIONAL SELPER 2014

La Geoinformación al Servicio de la Sociedad

Memorias

Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial Capítulo Colombia

30 AÑOS

Medellín, Colombia
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014

MODELADO DE LA FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA EN AGUAS APLICADO A LA MISIÓN FLEX/Sentinel-3

Carolina Tenjo, Antonio Ruiz-Verdú, Jesús Delegido, Ramón Peña, Neus Sabater, Juan Pablo Rivera, Jorge Vicent, José Moreno

nancy.tenjo@uv.es, antonio.ruiz@uv.es, jesus.delegido@uv.es, rpenamart@yahoo.es, m.neus.sabater@uv.es, juan.rivera@uv.es, jorge.vicent@uv.es, jose.moreno@uv.es

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

Palabras clave: Aguas costeras, Fluorescencia de la clorofila, Misión FLEX

Resumen: La fluorescencia de la clorofila (FC) nos permite entender la fisiología de las plantas y algas, particularmente la estructura y funcionamiento del Fotosistema II (PSII), y estimar la biomasa del fitoplancton y la producción primaria por la tasa de fijación de carbono dada por el fitoplancton, así como también, monitorear crecimientos masivos de algas. La curva de emisión de fluorescencia de la clorofila presenta siempre un máximo a 685 nm.

Actualmente, los únicos sensores remotos que estiman FC son MODIS (desde 1999) y MERIS (de 2002 a 2012). Ambos sensores utilizan el algoritmo FLH (Fluorescence Line Height), que se basa en la relación entre tres bandas, una de las cuales está centrada en el pico de FC, y las otras dos se utilizan como una línea base bajo el pico de fluorescencia. Sin

embargo, ninguno de estos sensores tiene la configuración requerida para una obtención precisa de FC.

La misión FLuorescence Explorer (FLEX) es una de las candidatas al octavo “Earth Explorer” de la ESA. Está especialmente diseñada para permitir la observación de la fluorescencia por teledetección.

Con el fin de evaluar la capacidad de FLEX para la obtención de FC en aguas costeras y continentales, se simularon las propiedades ópticas aparentes de un amplio rango de tipos de agua, utilizando el Modelo de Transferencia Radiativa *HydroLight*. Se usaron como entradas diferentes propiedades ópticas inherentes representativas de las zonas costeras y continentales, así como combinaciones razonables de diferentes concentraciones de los componentes del agua.

En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre el proceso de inversión por tablas de búsqueda (LUT – *Look Up Tables*) para la obtención de FC a partir de las reflectividades obtenidas por el sensor, los cuales serán utilizados para el desarrollo de la primera versión de los productos de nivel 2 en aguas costeras de la misión FLEX. También se ha analizado la variación de la fluorescencia en función de la concentración de clorofila, así como el efecto de otros constituyentes, particularmente los minerales en suspensión, en la señal de fluorescencia detectable por sensores remotos.

Keywords: Coastal waters, Chlorophyll Fluorescence, FLEX mission

Abstract: Chlorophyll fluorescence (CF) provides an understanding into the photosynthetic physiology of plants and algae, in particular, into the structure and function of the Photosystem II (PSII), allowing the estimation of the phytoplankton biomass, the monitoring of Harmful Algal Blooms and the estimation of primary production by the instantaneous gross rate of carbon fixation by phytoplankton. The fluorescence emission curve of Chlorophyll-a always has its maximum at 685 nm.

Up to now, the only operational satellite sensors capable of producing raw estimates of CF are MODIS (in operation since 1999) and MERIS (2002 - 2012). In both cases, the FLH (Fluorescence Line Height) algorithm is used, based on the relation of three wavelengths, one of which is centered on the CF maximum while the other two wavelengths are used to form a baseline below the fluorescence peak. However, none of these two sensors has the configuration required for an accurate retrieval of CF.

The Fluorescence Explorer (FLEX) is one of ESA's 8th Earth Explorer mission candidates, which uses a number of instrument configurations allowing the observation of fluorescence in a broad spectral band.

In order to evaluate the FLEX capabilities for retrieving CF in coastal waters, the apparent optical properties of a wide range of water types were simulated using the Radiative Transfer Model HydroLight. Inherent optical properties representative of different coastal and continental waters were used as inputs, as well as realistic combinations of water component concentrations.

In this paper, are presented the first results on the Look Up Tables (LUT) investment process to FC retrieval from the reflectances obtained by the sensor, which will be used for the development of the first version of level 2 products in coastal waters of the FLEX mission. We also analyzed the variation of fluorescence as a function of chlorophyll concentration, and the effect of other constituents, particularly minerals in suspension, in the fluorescence signal detectable by remote sensors.

INTRODUCCIÓN

Cuando las moléculas de clorofila absorben luz, una fracción de la energía absorbida es reemitida como fluorescencia. Esta propiedad de la molécula de clorofila, ha sido ampliamente utilizada en limnología biológica y oceanografía en los últimos 40 años (Huot & Babin, 2010). Su medida “in vivo”, fue presentada por primera vez en el ámbito de las ciencias acuáticas en 1966 (Lorenzen, 1966), para monitorear cambios en la biomasa del fitoplancton. Actualmente está muy extendido el uso de fluorómetros para la medida “in situ” de la fluorescencia inducida, en monitoreos oceanográficos y limnológicos.

Morel & Prieur, 1977 y Neville & Gower, 1977, fueron los primeros en detectar, en aguas oceánicas, el pico de fluorescencia inducida por la luz solar en los espectros de reflectividad medidos con espectrorradiómetros de campo. El pico de fluorescencia en 683-685 nm se puede representar por una función gaussiana con una anchura media máxima de ~25 nm (Gordon, 1979).

La fluorometría de la clorofila se utiliza actualmente para obtener la distribución espacial y temporal de la biomasa de fitoplancton en el agua a varias escalas. Sin embargo su impacto va más allá de estimar la biomasa, ya que permite la observación del estado fotofisiológico de las células para a su vez estimar la producción primaria en el agua.

En 1999 fue lanzado MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) a bordo del satélite TERRA, que incluye dos bandas espectrales dedicadas a medir la señal de fluorescencia, permitiendo realizar observaciones globales de la fluorescencia emitida por la superficie del océano. Este fue seguido posteriormente por los sensores MODIS/AQUA y MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) lanzados en 2002.

El algoritmo que utilizan actualmente los sensores remotos para la estimación de la señal de fluorescencia conocido como FLH (Fluorescence Line Height), se basa en la relación de tres bandas, una de las cuales está centrada en el pico máximo de la fluorescencia de la clorofila, y las otras dos son usadas para formar una línea base bajo el pico de fluorescencia. (Figura 1). FLH se calcula como el valor interpolado de la radiancia en λ_2, sobre la línea base entre las radiancias en λ_1 y λ_3. Para MODIS, las bandas λ_2, λ_1 y λ_3 corresponden a 678, 667 y 748 nm respectivamente, mientras que para MERIS las bandas son 681, 665 y 709 nm respectivamente. En ambos instrumentos, la medida de fluorescencia se hace en una longitud de onda menor que la ideal (685 nm) para evitar la fuerte absorción del oxígeno en la banda a 687 nm. El algoritmo FLH usa la radiancia ascendente del tope de la atmósfera, la cual es corregida por dispersión Rayleigh, pero no por dispersión de aerosoles, ya que se asume que la radiancia ascendente es una función

linear de la longitud de onda para la dispersión de aerosoles (Huot et al., 2005). El algoritmo FLH se expresa de la siguiente manera (Gower & King, 2012):

$$FLH = L_2 - \left(L_3 + \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} (L_1 - L_3) \right) \quad (1)$$

Donde L_i es la radiancia calculada para las bandas i, centradas en la longitud de onda λ_i. Los índices 1 y 3 indican las bandas de la línea base y el índice 2 indica la banda de la fluorescencia.

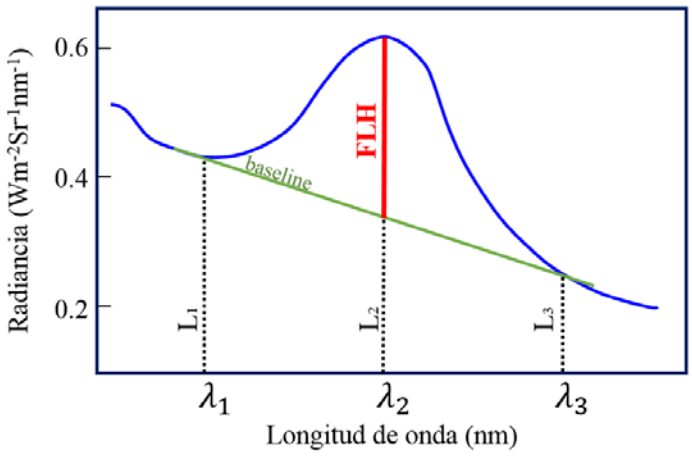

Figura 1. Descripción gráfica del algoritmo FLH (Fluorescence Line Height) (rojo) λ_2, λ_1 y λ_3 representan la longitud de onda de la banda central y las dos bandas de base respectivamente y L_2, L_1 and L_3 son las radiancias correspondientes.

La misión FLuorescence EXplorer (FLEX): La misión FLEX es una de las candidatas como octavo "Earth Explorer" de la ESA. El nuevo concepto de misión FLEX consiste en

un pequeño satélite con un único sensor a bordo, el Fluorescence Imaging Spectrometer (FLORIS) que volará en tándem con Sentinel-3, aprovechando los sensores OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) y SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer). Esta sinergia de sensores permitirá agregar el valor añadido de las medidas de fluorescencia adquiridas por FLORIS a los productos de nivel 2 esperados para Sentinel-3. FLORIS tendrá una resolución especial de 300 m y un rango espectral entre 500 y 780 nm, cubriendo la reflectividad fotoquímica (500 a 600 nm), la banda de absorción de clorofila (600 a 677 nm), y la franja del rojo-infrarrojo (697 a 755 nm). En los picos de absorción del Oxígeno A (760,4 nm) y B (687,0 nm), las bandas espectrales de FLORIS tendrán una resolución de 0,3 nm en los picos de absorción del oxígeno, y el resto de bandas de 2 nm, aproximadamente. El tiempo aproximado de revisita será de dos semanas (Moreno et al., 2014).

Métodos de inversión por LUT (Look Up Tables): Los métodos de inversión por LUT consisten básicamente en la comparación de un espectro real con los espectros de una LUT, por medio de funciones de costo que buscan minimizar el error, para encontrar el espectro de la LUT que más se ajusta al real (Verrelst et al., 2012).

En este trabajo se ha empleado la metodología propuesta por Rivera et al., 2013 de evaluar múltiples funciones de costo presentadas en Leonenko et al., 2013 y Rivera et al., 2013 para luego encontrar la que mejor minimice los errores entre los datos simulados y los datos reales. Las funciones de costo utilizadas se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Funciones de costo empleadas en este trabajo (Leonenko et al., 2013).

FUNCIONES DE COSTO	
RMSE	Exponential
Shannon entropy	Harmonique Toussaint
Pearson chi-square	Bhattacharyya divergence
Neyman chi-square	Shannon (1948)
Kullback-Leibler	K(x)=log(x)+1/x
Jeffreys-Kullback-Leibler	K(x)=-log(x)+x
K-divergence Lin	K(x)=(log(x))^ 2
L-divergence Lin	K(x)=x(log(x))-x
W Kagan	Normal distribution-LSE
Negative exponential disparity	Least absolute error
Generalised Kullback-Leibler or likelihood disparity	Geman and McClure

Para este trabajo, la metodología de inversión por LUT consiste en tomar cada uno de los espectros reales, y con cada una de las funciones de costo (en este caso se han utilizado 22, ver Tabla 1), se evalúa cuál espectro de reflectividad de la LUT se asemeja más al espectro de reflectividad real. Posteriormente, se selecciona el espectro que más se repite de los 22 obtenidos, es decir la moda, para luego asignar el valor del parámetro dado, en este caso [Chla] y Fluorescencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha generado una LUT de 200 espectros de reflectividad, simulando las bandas de FLORIS, que incluye [Chla] y fluorescencia inducida por el sol, dentro de los parámetros que posteriormente se utilizarán para la validación del método de inversión empleado, siguiendo la a metodología de Rivera et al., 2013 y Leonenko et al., 2013.

Para la creación de la LUT se empleó el modelo de transferencia Radiativa (RTM) para aguas HydroLight (Mobley, 1989), con los siguientes parámetros constantes: ángulo solar cenital de 30º, rendimiento cuántico de la fluorescencia de la clorofila de 0.02 y concentración de materia orgánica disuelta colora (CDOM) igual a 0.01 m^{-1}. Los principales componentes variables son la concentración de clorofila-a [Chla] que varía de 0 a 300 mg/m^3 y la de sólidos minerales en suspensión (SMS) que varía de 0 a 100 g/m^3, para un total de 200 espectros simulados. Se han simulado espectros con [Chla] = 0, para observar el comportamiento de la fluorescencia de los otros componentes (CDOM y agua).

Cabe anotar que una LUT solamente con 200 espectros es una LUT demasiado pequeña para un uso óptimo de los métodos de inversión. De momento se ha optado por generar una LUT de ese tamaño, debido a que una LUT mayor tendría un coste computacional demasiado elevado para los medios disponibles actualmente. En cuanto se disponga de una capacidad computacional mayor, se llevarán a cabo simulaciones más extensas.

Para calcular la fluorescencia a partir se realizaron dos simulaciones para cada combinación de variables biofísicas: una incluyendo la emisión de fluorescencia de la clorofila-a y otra que no incluye esta emisión. La fluorescencia se calcula a partir de la diferencia entre las radiancias del agua (Lw) obtenidas en ambas simulaciones, en la franja espectral correspondiente al pico de la fluorescencia de la clorofila (entre 655 y 715 nm), asumiendo un ancho de banda del pico de fluorescencia de 60 nm (Figura 2). Es importante recalcar que la fluorescencia obtenida no es la fluorescencia *emitida* por la clorofila-a, sino la porción de esa fluorescencia que permanece en los espectros de radiancia y/o reflectividad

del agua, tras la interacción con los diferentes Constituyentes Ópticamente Activos (OAC) y su paso por la interfaz agua-aire. Es, por tanto, la fluorescencia *detectable* por sensores remotos. En este trabajo, cuando se habla de fluorescencia se hace referencia todo el tiempo a esa fluorescencia *detectable*.

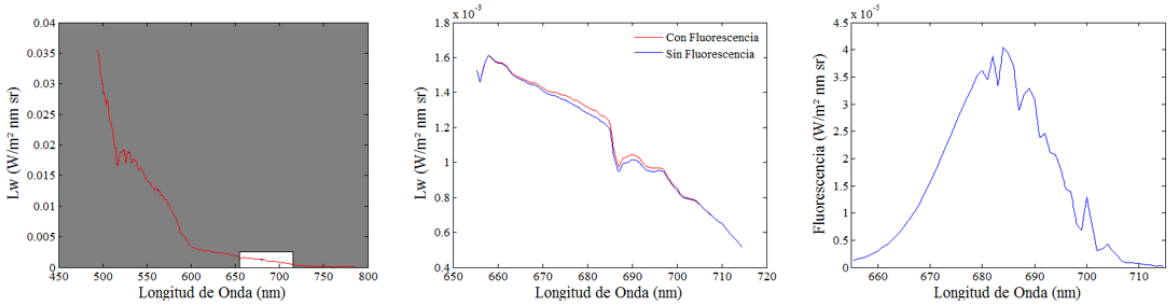

Figura 2. Ejemplo de 2 espectros de radiancia simulados por el RTM (izquierda); detalle de la región de emisión de fluorescencia de la clorofila-a (centro) y emisión de fluorescencia resultante de la resta de los dos espectros simulados (derecha)

Para la fase de aplicación de las funciones de costo, se emplearon datos in situ, obtenidos en campañas de campo realizadas por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas – España) entre 2001 y 2007, que incluyen varios parámetros biofísicos, como lo son la concentración de clorofila ([Chla]), los sólidos minerales en suspensión (SMS) y la materia orgánica colora disuelta (CDOM). Los espectros de esta base de datos fueron interpolados para simular las bandas de FLORIS. Como la base de datos in situ no cuenta con medidas de fluorescencia inducida por el sol, para la validación de ésta se utilizó [Chla].

Por último, se realizó un remuestreo espectral/espacial, para simular una imagen FLORIS, a partir de una imagen HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean) (Lewis et al., 2009; OSU, 2014), corregida atmosféricamente con el método de Vicent et al., 2014, tomada el 23 de marzo de 2012 en la zona de La Albufera de Valencia – España (39°20’10”N, 0°21’10”W), sobre la cual se aplicó el método de inversión para obtener mapas preliminares de clorofila y fluorescencia. El estado trófico de La Albufera (hipertrófico) y el de la zona costera aledaña (meso-oligotrófico) son bien conocidos y constantes en el tiempo (Oltra et al., 2001), lo que permite hacer una valoración cualitativa de los resultados obtenidos y su sentido físico, aun cuando no se disponga de datos de fluorescencia medida in situ para la fecha de la imagen.

RESULTADOS

De la observación de los espectros obtenidos en la simulación con el RTM, cabe destacar que (1) en ausencia de Chla, la señal de fluorescencia predominante, corresponde a la respuesta espectral del CDOM, con valores del orden de 10^{-5} W/m ^{2} nm sr (Figura 3 a), y (2) que cuando las concentraciones de SMS son mucho mayores que [Chla], la señal de fluorescencia desaparece en los espectros de reflectividad, probablemente porque es dispersada por los SMS (Figura 3 b).

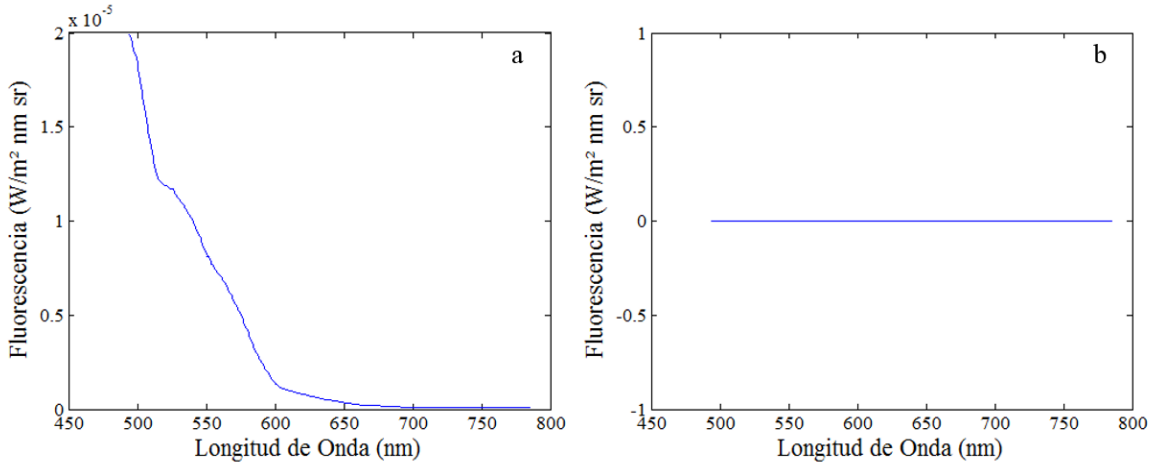

Figura 3. (a) Fluorescencia del CDOM en ausencia de clorofila. (b) Espectro de fluorescencia de una muestra con [Chla] = 0.02 mg/m³ y SMS = 59.05 g/m³

El valor total de FC se obtuvo como la integral de la fluorescencia obtenida entre 655 y 715 nm, que correspondería al pico de la fluorescencia de la clorofila, en unidades de W/m² nm sr (Figura 4).

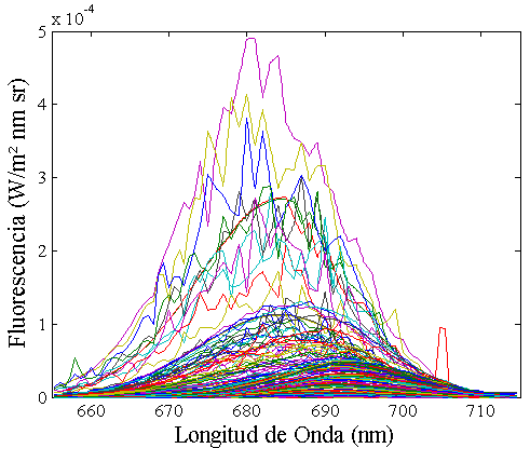

Figura 4. Fluorescencia obtenida para los espectros simulados

Las variaciones en la señal de fluorescencia detectable en los espectros de radiancia del agua, se han analizado en función de la concentración de clorofila-a, para distintas concentraciones de sólidos minerales en suspensión (Figura 5 a), observándose un importante efecto de disminución para concentraciones de clorofila superiores a 10 mg m^{-3}, que es debido a la reabsorción de la fluorescencia por la propia clorofila y a la dispersión de la señal por las partículas en suspensión. El efecto de reabsorción aumenta con concentraciones crecientes de SMS, lo cual es congruente con el incremento de la dispersión que estas partículas producen, aunque la tendencia observada no es lineal.

Se ha analizado también el porcentaje que representa la señal de fluorescencia respecto de la radiancia total del agua entre 655 y 715 nm (Figura 5 b). Para concentraciones de clorofila inferiores a 10 mg m^{-3}, la señal de fluorescencia representa en torno a un 0,5% de la radiancia total, siempre y cuando la concentración de minerales en suspensión no sea elevada. A medida que aumenta la concentración de clorofila, disminuye notablemente el porcentaje de señal de fluorescencia, tendiendo a estabilizarse, para concentraciones altas de clorofila, en torno a un 0.05%. Hay que recalcar que estos valores corresponden a todo el intervalo espectral de 655 a 715 nm. El porcentaje de fluorescencia en la radiancia, para longitudes de onda cercanas a 685 nm, es muy superior.

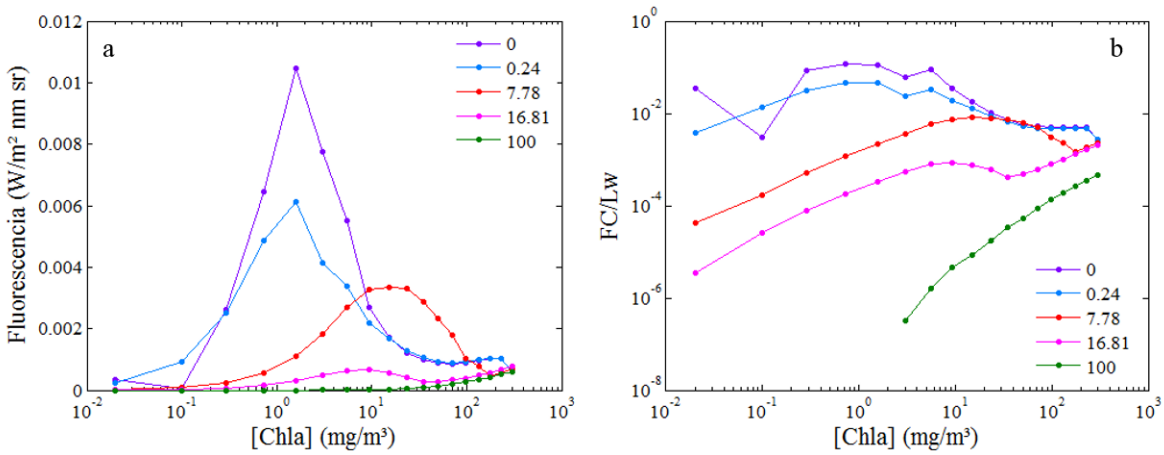

Figura 5. Fluorescencia detectable (a) y porcentaje de la señal de fluorescencia respecto de la radiancia total entre 655 y 715 nm (b), en función de la concentración de clorofila-a, para distintas concentraciones de minerales en suspensión (SMS, en g/m³)

Pese a partir de una LUT relativamente pequeña, el método se inversión propuesto reproduce aceptablemente los espectros de reflectancia de validación, teniendo en cuenta que en la base de datos in situ no se cuenta con datos de SMS, que permitirían hacer un ajuste más fino (Figura 6).

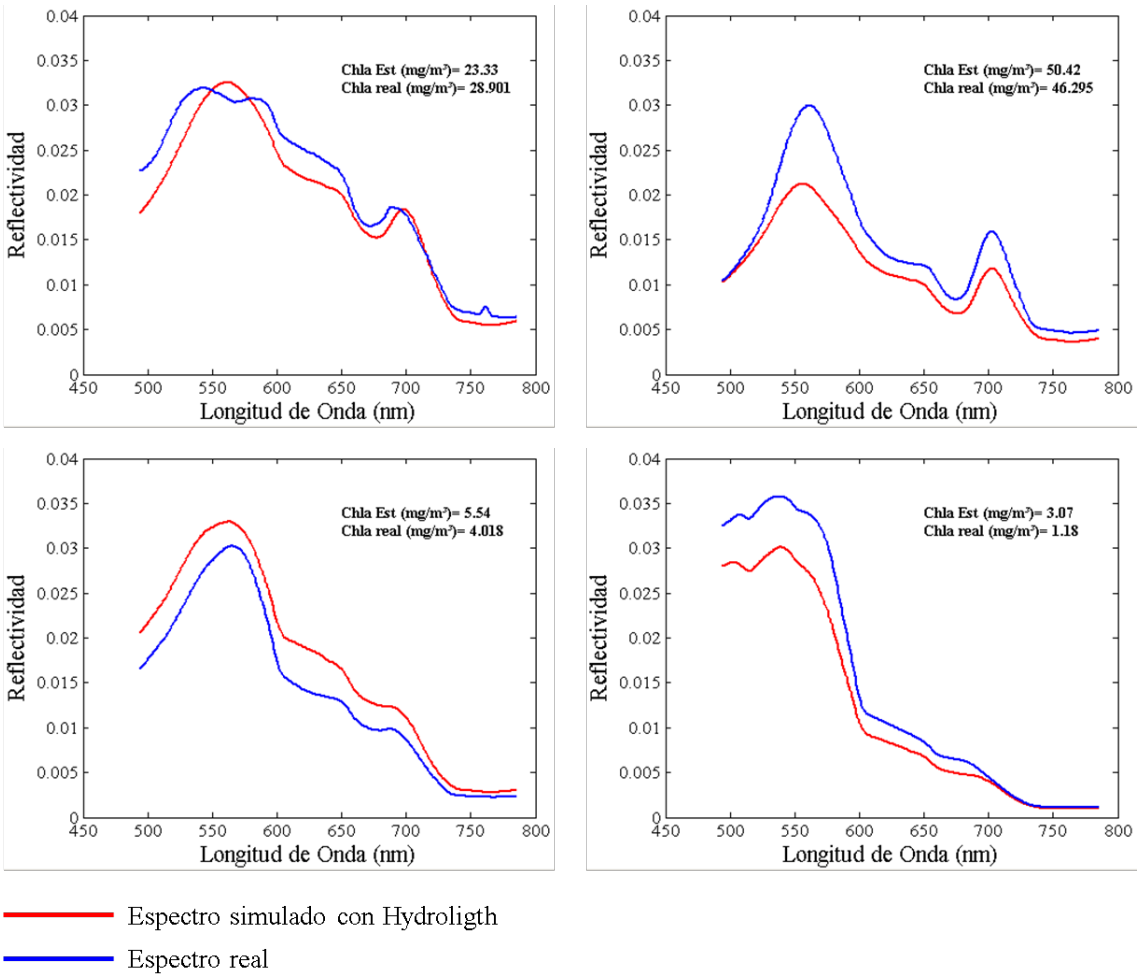

Figura 6. Comparación de las reflectividades medidas in situ con las estimadas utilizando el método de inversión por LUT

Una vez se ha comprobado que el método de inversión por LUT produce resultados aceptables, se ha aplicado sobre una imagen HICO, para obtener los correspondientes mapas de [Chla] y FC (Figura 7)

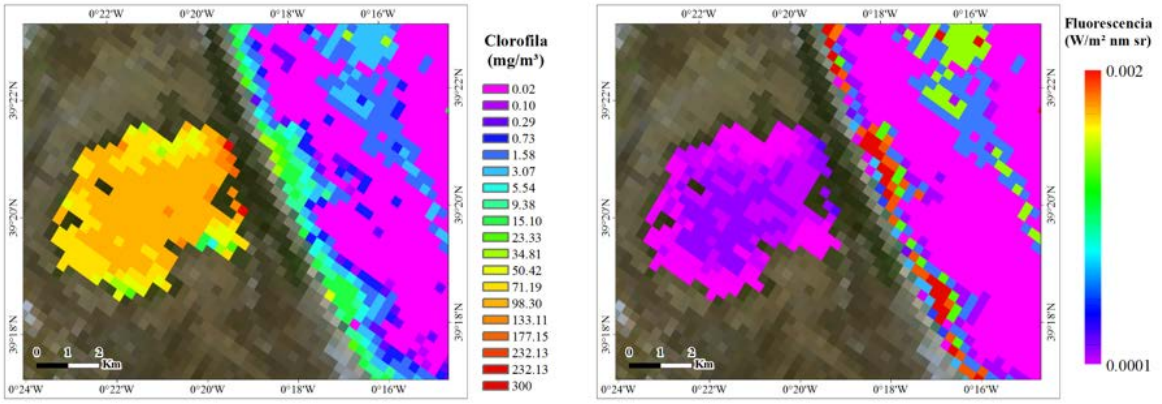

Figura 7. Mapas de clorofila (izquierda) y fluorescencia (derecha), obtenidos por el método de inversión de LUT para una imagen simulada a la resolución espacial y espectral de FLORIS.

Los mapas de concentración de clorofila muestran resultados coherentes con la información disponible, con valores de hipertrofia (cercanos a 100 mg m^{-3}) en la Albufera de Valencia en línea con lo obtenido en trabajos previos (Vicent et al., 2014), así como valores oligotróficos en el área costera. En cuanto al mapa de fluorescencia, los valores obtenidos son también coherentes con los resultados de la simulación con el RTM, que indican que la fluorescencia detectable es menor cuando la concentración de clorofila es más alta.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de una simulación de la fluorescencia de la clorofila-a inducida por la irradiancia solar en aguas costeras y continentales. La simulación se ha realizado con un RTM que utiliza como entradas rangos y combinaciones de OAC realistas, así como propiedades ópticas inherentes características de este tipo de masas de agua. Aunque el número de espectros simulados es relativamente pequeño (200), ha

permitido analizar la variación de la fluorescencia, detectable en los espectros de radiancia del agua, en función de la concentración de clorofila, así como el efecto de las partículas minerales en suspensión.

Los resultados son coherentes con las observaciones previas, que indicaban que el rango óptimo para la detección de la fluorescencia de la clorofila-a está en concentraciones inferiores a 10 mg m-3. A concentraciones superiores, el efecto de reabsorción disminuye notablemente la contribución de la fluorescencia en la radiancia del agua. Cuando las concentraciones de minerales en suspensión son elevadas, la fluorescencia de la clorofila llega a ser indetectable.

Se ha propuesto un enfoque novedoso para la inversión de las LUT generadas a partir del RTM, basado en el uso combinado de varias funciones de coste, que persigue una mayor robustez y significación estadística. La inversión ha producido buenos resultados, tanto en el ajuste con medidas in situ de reflectividad y [Chl-a] como en los mapas producidos en imágenes FLEX, emuladas a partir de imágenes hiperespectrales de HICO. Aunque es necesaria una validación más extensa y cabe esperar que los resultados mejoren con una simulación más completa, las estimaciones de [Chl-a] se ajustan muy bien a los datos experimentales disponibles.

En cuanto a las estimaciones de la fluorescencia de la clorofila (FC), aun cuando no se dispone de datos de validación, los resultados son coherentes con los valores esperables y con las observaciones previas. Hay que destacar que existen muy pocas medidas directas de la fluorescencia de la clorofila-a inducida por el sol en masas de agua, debido a la dificultad

de desacoplar esta señal de la radiancia reflejada. El uso de herramientas de simulación (RTM) permite extraer esa señal de fluorescencia y analizar su dependencia de variables biofísicas y condiciones de iluminación. Los resultados de la inversión del RTM son muy prometedores e indican que, aunque la señal es muy baja, es posible extraer la fluorescencia de la radiancia del agua si se cuenta con una resolución espectral y radiométrica adecuada, como es el caso del sensor FLORIS de FLEX.

La metodología utilizada se pretende utilizar como base para el desarrollo de los algoritmos de nivel 2 de FLEX en aguas costeras y continentales, para la obtención de mapas de [Chla] y FC en aguas costeras y continentales.

AGRADECIMIENTOS: Al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial de España (INTA), que puso a nuestra disposición el software HydroLight, y al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas – España (CEDEX), que suministró la base de datos de muestras in situ.

REFERENCIAS

Gordon, H. R. (1979). Diffuse reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll a fluorescence at 685 nm. *Applied Optics*, *18*(8), 1161–1166. doi:http://dx.doi.org/10.1364/AO.18.001161

Gower, J. & King, S. (2012). Use of satellite images of chlorophyll fluorescence to monitor the spring bloom in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, *33*(23), 7469–7481. doi:10.1080/01431161.2012.685979

Huot, Y. & Babin, M. (2010). *Chlorophyll a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications*. (D. J. Suggett, O. Prášil & M. A. Borowitzka, Eds.) (pp. 31–74). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-90-481-9268-7

Huot, Y., Brown, C. A. & Cullen, J. J. (2005). New algorithms for MODIS sun-induced chlorophyll fluorescence and a comparison with present data products. *Limnology and Oceanography: Methods*, *3*(1990), 108–130. doi:10.4319/lom.2005.3.108

Leonenko, G., Los, S. & North, P. (2013). Statistical Distances and Their Applications to Biophysical Parameter Estimation: Information Measures, M-Estimates, and Minimum Contrast Methods. *Remote Sensing*, *5*(3), 1355–1388. doi:10.3390/rs5031355

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. *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, 1–9.

Lorenzen, C. J. (1966). A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration *. *Deep Sea Research*, *13*(December 1965), 223–227.

Mobley, C. D. (1989). A numerical model for the computation of radiance distributions in natural waters with wind-roughened surfaces. *Limnology and Oceanography*, *34*(8), 1473–1483. doi:10.4319/lo.1989.34.8.1473

Morel, A. & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, *22*(4), 709–722. doi:10.4319/lo.1977.22.4.0709

Moreno, J., Alonso, L., Delegido, J., Rivera, J. P., Ruiz-verdú, A., Sabater, N., Tenjo, C., Verrelst, J. & Vicent, J. (2014). Misión Flex (Fluorescence Explorer): Observación de la fluorescencia por teledetección como nueva técnica de estudio del estado de la vegetación terrestre a escala global. *Revista de Teledetección AET*, *41*, 111–119.

Neville, R. & Gower, J. (1977). Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll fluorescence. *Journal of Geophysical Research*, *82*, 3487–3493.

Oltra, R., Alfonso, M. T., Sahuquillo, M. & Miracle, M. R. (2001). Increase of rotifer diversity after sewage diversion in the hypertrophic lagoon , Albufera of Valencia , Spain. *Hydrobiologia*, *446*(447), 213–220.

OSU. (2014). *HICO - Sensor and Data Characteristics*. *http://hico.coas.oregonstate.edu/datasets/datacharacteristics.shtml#L1b*.

Rivera, J., Verrelst, J., Leonenko, G. & Moreno, J. (2013). Multiple Cost Functions and Regularization Options for Improved Retrieval of Leaf Chlorophyll Content and LAI through Inversion of the PROSAIL Model. *Remote Sensing*, *5*(7), 3280–3304. doi:10.3390/rs5073280

Verrelst, J., Rivera, J. P., Leonenko, G., Alonso, L. & Moreno, J. (2012). Optimizing LUT-based radiative transfer model inversion for retrieval of biophysical parameters using hyperspectral data. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International* (pp. 7325–7328). doi:doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351969

Vicent, J., Sabater, N., Tenjo, C., Ruiz-verdú, A., Delegido, J., Peña-Martínez, R. & Moreno, J. (2014). HICO level-2 data processing toolbox for the atmospheric correction and the retrieval of water quality parameters. *6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, Lausanne, 24-27 June 2014.*, 1–4.