

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/311572244>

Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales

Conference Paper · November 2016

CITATIONS

0

READS

7,600

16 authors, including:



Jesús Delegido

University of Valencia

103 PUBLICATIONS 1,618 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Carolina Tenjo

University of Valencia

26 PUBLICATIONS 85 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Antonio Ruiz-Verdu

University of Valencia

38 PUBLICATIONS 596 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jochem Verrelst

University of Valencia

191 PUBLICATIONS 3,286 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Solar Induced Fluorescence [View project](#)



Retrieval of canopy water content of different crop types with hyperspectral indices [View project](#)

APLICACIONES DE SENTINEL-2 A ESTUDIOS DE VEGETACIÓN Y CALIDAD DE AGUAS CONTINENTALES

J. Delegido¹; C. Tenjo¹; A. Ruiz-Verdú¹; M. Pereira-Sandoval¹; N. Pasqualotto¹; G. Gibaja¹; J. Verrelst¹; R. Peña¹; E. P. Urrego¹; J. Borràs¹; J. Sanchis-Muñoz¹; A. Pezzola²; Z. Mosquera³; Z. Quinto³; J. J. Gómez⁴; J. Moreno¹

¹ Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia, España

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Hilario Ascasubi. Laboratorio de Teledetección y SIG. Ruta Nac. 3 sur km. 794. (8142) Hilario Ascasubi, Argentina

³ Grupo de Limnología, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia

⁴ Grupo de Hidrogeología, Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla la Mancha, Albacete, España

RESUMEN

Sentinel-2 (S2) es un nuevo satélite de la ESA, que cuenta con 13 bandas, de las cuales cuatro de ellas (en el azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) tienen 10 m de resolución espacial, seis tienen 20 m de resolución que incluyen bandas en el red-edge y en el SWIR y las otras tres tienen 60 m para la corrección atmosférica y detección de nubes. El primer satélite de la serie S2, se lanzó el 23 de junio de 2015. La ESA ha puesto a disposición de los usuarios, de manera gratuita, las imágenes y una toolbox para visualizar y procesar imágenes S2.

El objetivo de este trabajo es desarrollar y validar diferentes metodologías aplicadas a estudios de vegetación y de calidad de aguas, utilizando las primeras imágenes obtenidas por S2 en diferentes sitios. En cuanto a calidad de aguas continentales, se han obtenido mapas de clorofila y profundidad de Disco de Secchi, SD, de la Laguna salada de Pétrola en España, analizando diferentes métodos y validando con datos in situ. Además se han buscado los mejores índices para el estudio de lagos aluviales en la región del Chocó en Colombia. Se ha observado, a partir de los espectros obtenidos por S2, que el lago de Pétrola se puede clasificar como turbio y que el mejor modelo para estimar la clorofila es el modelo tribanda, mientras que SD se puede estimar con un índice de tipo DLB. En vegetación, se han obtenido mapas de Leaf Area Index (LAI) y contenido en clorofila de las hojas en diferentes cultivos en la zona de cultivos de huerta que rodea la ciudad de Valencia (España), utilizando y validando diferentes índices espectrales. Se ha observado que el mejor índice para la estimación de la clorofila es el NAOC (Normalized Area Over reflectance Curve) mientras que el LAI puede ser bien estimado con el índice tipo NDVI pero usando tres bandas. Por otra parte se han aplicado 4 clasificadores (LDA, K-NN, TREE y RF) en la huerta de Valencia y en la Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi al sur de Argentina, variando los porcentajes de datos usados como entrenamiento y como validación, obteniendo que el método K-NN proporciona mejores resultados.

Palabras Clave: Sentinel-2, vegetación, clorofila, LAI, calidad aguas, clasificación

ABSTRACT

Sentinel-2 (S2) is a new satellite of the European Space Agency (ESA), with 13 spectral bands, of which 4 are configured at 10 m (in the blue, green, red and near infrared); 6 at 20 m, including bands in the red-edge and the SWIR; and 3 at 60 m spatial resolution that are used for the atmospheric correction and cloud detection. The first satellite of the S2 series, was launched on June 23rd of 2015. ESA provided, free of charge, the images and a toolbox for visualization and processing S2 images.

The objective of this work is to develop and validate various mapping methodologies, applied to vegetation and water quality studies, by using the first S2 images acquired over several sites. Regarding water quality, we obtained chlorophyll and Secchi Disk depth (SD) maps, in the Pétrola salt lake (Spain) by analyzing several spectral methods that were validated with in situ data. We have also ascertained the most sensitive indices for the study of floodplain lakes in the Chocó region (Colombia). In the Pétrola Lake, classified as turbid based on the spectral data, we analyzed several algorithms for Chl and SD. Chl was best estimated with the three-band model, while SD was best estimated with a DLB type index. Regarding the vegetation studies, by analyzing and validating vegetation indices, we obtained Leaf Area Index (LAI) and leaf Chl content maps of multiple orchard crops around Valencia (Spain). Chl was best estimated with the NAOC (Normalized Area Over reflectance Curve) index, while LAI was best estimated with a NDVI-type index, using three bands. Finally, we also applied four classification techniques (LDA, K-NN, TREE and RF) to map crops types in valencian orchard and in the experimental agronomic station Hilario Ascasubi (Argentina). Considering varying partitions of training and validation data, overall, most accurate maps were reached using K-NN.

KEYWORDS: Sentinel-2, vegetation, chlorophyll, LAI, water quality, classification

INTRODUCCIÓN

El reciente lanzamiento del primer satélite Sentinel-2 (S2) de la ESA, ha despertado un gran interés en la comunidad científica debido a sus múltiples aplicaciones, pues su alta resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica y su distribución gratuita abren una nueva era en la observación de la Tierra. Por ello, una gran cantidad de autores han estudiado las posibilidades de S2 en diferentes publicaciones científicas, tanto para calidad de aguas como vegetación (Drusch et al., 2012; Delegido et al., 2011).

El objetivo de este trabajo es mostrar los primeros resultados de diferentes aplicaciones de S2 a estudios de calidad de aguas y vegetación. Para ello se han elegido dos sitios diferentes para aguas y otros dos para vegetación, y se han analizado una serie de índices espectrales a partir de imágenes S2. En concreto los parámetros estudiados en vegetación son la densidad de clorofila de las hojas (Chl) y el índice de área foliar (LAI) mientras que en cuanto a la calidad de aguas se ha estudiado la concentración de clorofila y la profundidad de disco de Secchi (SD), todos ellos variables clave en los estudios realizados por teledetección. También se ha hecho un análisis de diferentes métodos de clasificación y se ha comparado con otros satélites de menor número de bandas para cuantificar la mejora en la clasificación asociada a las bandas S2.

MATERIAL Y MÉTODOS

Imágenes Sentinel-2

La misión S2 de la ESA proporciona imágenes de alta resolución (ESA, 2016a), mejorando los servicios de datos multiespectrales disponibles hasta el momento tales como las misiones Landsat y SPOT (Drusch et al., 2012). La misión S2 se basa en una constelación de dos satélites y cuenta actualmente con el primer satélite en órbita, lanzado el 23 de junio de 2015. El par de satélites S2 entregará datos de todas las superficies de la Tierra con un tiempo efectivo de revisita en el Ecuador de cinco días.

Cada satélite S2 lleva un sensor “Multi-espectral Image” (MSI) con 13 bandas espectrales situadas entre la región espectral de visible hasta el infrarrojo de onda corta; con cuatro bandas de 10 m de resolución espacial, seis bandas de 20 m y tres bandas de 60 m y una anchura de barrido de 290 km. S2 incorpora tres nuevas bandas en la región del red-edge que mejora la configuración del sensor para estudios de aguas y vegetación (Delegido et al., 2011). Aunque está previsto que S2 proporcione productos de alto nivel (Nivel 2b/3), actualmente los datos S2 disponibles son un producto de radiancia en el techo de la atmósfera, formado por un conjunto de grillas (*granules*) contiguas de 100 km², correspondientes al nivel 1c. Para el procesado de los datos 1c se utiliza el software Sen2Cor (Sentinel 2 Corrections), basado en un conjunto de técnicas para la corrección atmosférica y un módulo de clasificación de escena (ESA, 2016b). El resultado es un producto de reflectividades en superficie correspondiente al nivel 2a.

Zonas de estudio

Se han elegido cuatro zonas de estudio, dos de ellas para los estudios de calidad de agua y las otras dos para estudios de vegetación y clasificación. Para aguas se ha elegido las ciénagas del Chocó (en Colombia) y la Laguna salada de Pétrola (España), mientras que para vegetación se ha elegido la huerta de Valencia (España) y la Estación Experimental Hilario Ascasubi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, Argentina). En la Figura 1 se muestra la ubicación de las cuatro zonas en estudio.

Ciénagas del Chocó

El Chocó se encuentra situado al oeste de Colombia, entre la cordillera Occidental y el océano Pacífico. La mayor parte del territorio está constituido por la depresión que abren de sur a norte los ríos Atrato y San Juan. El clima es cálido y muy húmedo, con precipitaciones que superan los 10.000 mm anuales, por lo que este área se considera la segunda zona más lluviosa del planeta. Ello propicia el desarrollo de una selva exuberante y unos ríos muy caudalosos, en especial el Atrato, el San Juan y el Baudó, navegables en su mayor parte. La zona de estudio comprende los lagos (ciénagas) junto al río Atrato entre la ciudad de Quibdó y la desembocadura del río en el golfo de Urabá, en el mar Caribe. Un gran número de personas viven de estas ciénagas desde la antigüedad, de ahí no solo su importancia ecológica sino también económica y social (Lozano, 2010). Estos lagos son de tipo aluvial, generalmente en comunicación con el río, por lo que suelen tener altas concentraciones de sólidos en suspensión.

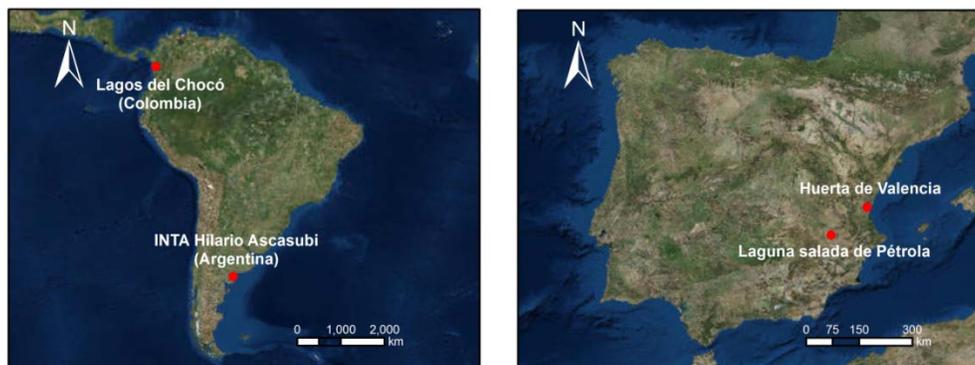


Figura 1. Ubicación de las zonas en estudio en Sudamérica (izquierda) y España (derecha).

El grupo de Limnología de la Universidad tecnológica del Chocó viene realizando distintas campañas de campo en estos lagos para su caracterización y estudio, midiendo diferentes parámetros biofísicos del agua, entre ellos SD y Chl. Además, se está desarrollando una serie de campañas de campo, en coordinación con la Universidad de Valencia, para medir SD y Chl entre julio y diciembre de 2016 coincidiendo con la toma de imágenes S2.

No obstante, como no se dispone de datos de campo de reflectividad y parámetros de calidad del agua de las ciénagas del Chocó, se ha generado una base de datos simulados con el modelo de transferencia radiativa (RTM) Hydrolight-Ecolight (Mobley, 1989). Este modelo físico simula la interacción de la luz solar con el agua y sus constituyentes ópticamente activos (OAC) y proporciona espectros de reflectividad para cualquier combinación de concentraciones de esos OAC. A partir de la información disponible, se han asignado valores de concentración de clorofila (Chl, en mg/m^3) de 1, 5, 10, 20, 30 y 50; valores de materia orgánica disuelta coloreada (CDOM en m^{-1}) de 1, 2, 5, 10, 15, 20 y 30; y de partículas inorgánicas en suspensión (en g/m^3) de 1, 5, 10, 20, 50, 100 y 200. Del total de combinaciones ($7*7*7=343$) se descartaron aquellas sin sentido físico, quedando una base de datos de 294 espectros de reflectividad del agua. Usando la toolbox ARTMO (*Automated Radiative Transfer Models Operator*) (Rivera et al., 2014) se han buscado las mejores combinaciones de bandas de diferentes índices mostrados en la Tabla 1 simulando las bandas de S2. ARTMO permite evaluar todas las combinaciones de bandas posibles para cada uno de los índices mostrados en la Tabla 1. Posteriormente ordena los resultados según el parámetro estadístico específico elegido (por ejemplo R^2).

Tabla 1. Índices para el estudio de calidad del agua, donde R_i es la reflectividad en una banda genérica i.

Nombre	Acrónimo	Fórmula
Cociente simple (Simple Ratio)	SR	R_1/R_2
Diferencia Normalizada (tipo NDVI)	ND	$(R_1-R_2)/(R_1+R_2)$
Diferencia Normalizada 3 bandas	ND3	$(R_1-R_2)/(R_2+R_3)$
Diferencia Normalizada 4 bandas	ND4	$(R_1-R_2)/(R_3+R_4)$
Distancia a línea base	DLB	$R_1-1/2(R_2+R_3)$
Tribanda (Dall’Olmo & Gitelson (2005))	DO	$R_1(1/R_2-1/R_3)$

La Laguna de Pétrola

La Laguna salada de Pétrola se encuentra situada en el sureste de la península Ibérica, en la provincia de Albacete (Figura 1). Con un tamaño de unas 350 ha y una profundidad entre 1 y 2 m, sus aguas son de tipo clorurado magnésico-sódicas, eutróficas, con altas concentraciones de nutrientes inorgánicos, de pigmentos fotosintéticos y baja transparencia (Vicente y Miracle, 1997). La laguna recibe los vertidos sin depurar de la población de Pétrola. Es una laguna de tipo endorreico con altos contenidos de sulfato disuelto (Gómez-Alday et al., 2004). Por el interés de su avifauna, está declarada Reserva Natural y Refugio de Fauna.

De forma similar al estudio realizado en las ciénagas del Chocó, la metodología consistió en la simulación con el RTM Hydrolight de las condiciones de la laguna de Pétrola, teniendo en cuenta que es un lago hipertrófico (Vicente y Miracle, 1997) por lo que han sido simulados los mismos valores que en las simulaciones del Chocó pero añadiendo los valores de clorofila 100, 150, 200 y 300 mg/m³. En esta laguna se han obtenido medidas de SD en tres puntos diferentes en tres fechas coincidentes con imágenes S2: el 10 de junio, el 20 de junio y el 10 de julio de 2016 con valores todos ellos entre 0,19 y 0,30 m.

Huerta de Valencia

La “huerta valenciana” se extiende desde Puzol, al norte de la ciudad de Valencia (España) hasta los alrededores de la Albufera, un gran lago situado al sur de la ciudad, y por el este hasta los pueblos de Paterna, Torrente y Moncada. En ella se cultivan principalmente cítricos y hortalizas, y alrededor de la Albufera, arroz. En cada parcela se pueden obtener dos o tres cosechas al año de diferentes cultivos. Con una extensa red de acequias construidas en el periodo islámico, se canaliza el agua del río Turia para llevar a cabo el regadío que se realiza por inundación. Como zona de estudio se ha elegido la zona de huerta comprendida entre las poblaciones de Valencia, Burjassot, Moncada y Alboraya caracterizada por pequeñas parcelas de entre 40 y 100 m de lado. Los datos utilizados en este estudio han sido obtenidos en dos campañas de campo realizadas en 2016 los días 1 y 2 de mayo y 10 y 11 de julio, coincidentes con la toma de imagen S2 en dos días totalmente despejados (1 de mayo y 10 de julio de 2016). Se han seleccionado fechas distantes para poder abarcar mayor variedad de cultivos. En la campaña de mayo fueron seleccionadas 22 parcelas con diferentes cultivos: 6 parcelas de naranjo (*Citrus sinensis*), 5 de patata (*Solanum tuberosum*), 3 de cebolla (*Allium cepa*), 3 de alcachofa (*Cynara scolymus*), 2 de repollos (*Brassica oleracea* – grupo Capitata), 1 de alfalfa (*Medicago sativa*), 1 de lechuga (*Lactuca sativa*) y 1 de palmera enana (*Phoenix roebelenii*). En la campaña de julio fueron seleccionadas 10 parcelas: 4 de chufa de Valencia (*Cyperus esculentus*), 2 de calabaza (*Cucurbita maxima*), 1 de maíz (*Zea mays*), 1 de alfalfa (*Medicago sativa*), 1 de naranjo (*Citrus sinensis*) y 1 de sandía (*Citrullus lanatus*). El criterio para la selección de las parcelas fue que fueran grandes (al menos 50 m x 50 m) y que en la base de datos hubiera el mayor número de especies distintas posible. Además se seleccionaron 8 parcelas de suelos desnudos. En cada parcela se muestrearon 30 hojas al azar, repartidas a lo largo de todo el campo y cercanas al dosel de la planta. En cada hoja se tomó una medida con el clorofilómetro SPAD-502, calibrado anteriormente mediante la función (ecuación (6) de Delegido et al., 2014):

$$\text{Chl } (\mu\text{g cm}^{-2}) = 0,021752 * \text{SPAD}^{2,1129} \quad (1)$$

Una vez estimado el contenido en clorofila de cada hoja, se calculó el promedio y la desviación estándar para cada una de las parcelas. Además, en algunas parcelas se hicieron estimaciones del LAI con la aplicación Pocket LAI para dispositivos móviles (Confalonieri et al., 2013) realizando 3 series de 9 fotos en 3 puntos diferentes. Con cada foto la aplicación obtiene un valor del LAI. Posteriormente se hace el promedio de los 27 valores y la desviación estándar de cada parcela.

A partir del valor de Chl y LAI de cada parcela, se ha elaborado una base de datos añadiendo a cada parcela el espectro obtenido del píxel central de la parcela de la imagen S2 corregida con Sen2Cor. A la base de datos se han añadido 8 suelos desnudos asignándoles Chl y LAI cero. Con esta base de datos se han analizado todos los índices incluidos en la Tabla 1 para estudiar los que mejor correlación obtienen con la Chl y el LAI y la mejor combinación de bandas. Este análisis estadístico se ha hecho con la toolbox ARTMO.

Además de los índices de la Tabla 1, también se ha calculado el índice NAOC (Normalized Area Over Reflectance Curve) definido como (Delegido et al., 2010):

$$\text{NAOC} = 1 - \frac{\int_a^b \rho \, d\lambda}{\rho_{\max} (b - a)} \quad (2)$$

Donde ρ es la reflectividad, λ la longitud de onda, ρ_{\max} es la máxima reflectividad en la región del rojo-infrarrojo, correspondiente a la reflectividad en la longitud de onda “b”, y “a” y “b” son los límites de integración alrededor de la zona de máxima absorción de Chl (~670 nm). Este índice presenta alta correlación con Chl en una amplia variedad de cultivos cuando los límites (“a” y “b”) son 643 y 795 nm (Delegido et al., 2010).

INTA Hilario Ascasubi - Argentina

El área en estudio corresponde al área geográfica de la Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), que comprende a los partidos de Villarino y Patagones, en el valle bonaerense del río Colorado en Argentina. La superficie de ambos partidos es de 2.443.000 ha de las cuales 140.000 ha están bajo riego, con grandes extensiones de cultivos como el zapallo, trigo, maíz, girasol, alfalfa y pastos para el ganado. Dentro del área de estudio se encuentra la mayor área de producción de cebolla en Argentina, con 15.000 ha de regadío dedicadas a este cultivo. Uno de los objetivos de este centro es poder llegar a hacer una buena predicción de cosecha de cebolla, mejorando para ello la clasificación por teledetección, que hasta ahora se ha hecho con Landsat y SPOT, por lo cual se plantea en este trabajo un primer estudio de la mejora de la clasificación con S2. Para ello, se han analizado varios algoritmos de clasificación supervisada. Los algoritmos elegidos han sido el LDA (Linear Discriminant Analysis), el RF (Random Forest), el K-NN (k Nearest Neighbours) y el TREE (Árbol de decisión). El LDA (McLachlan, 2004) es un método paramétrico de clasificación que adapta cada clase de datos a una curva gaussiana. El RF (Breiman, 2001), es un método no paramétrico basado en árboles de decisión, que genera cada árbol usando un subconjunto de elementos de entrenamiento diferente en cada

iteración. El K-NN (Altman, 1992) es un método no paramétrico que estima la clase de un individuo en función de los “k” vecinos más cercanos mediante un sistema de votación, donde la mayoría determina la clase. El TREE (Quinlan, 1993) es un método no paramétrico que representa un conjunto de condiciones que se organizan de forma jerárquica y que se aplican sucesivamente desde una raíz hasta llegar a un nodo terminal u hoja del árbol. Para determinar la calidad final de los métodos, se ha aplicado una evaluación cuantitativa, usándose el índice Kappa (Carletta, 1996), calculando este índice con diferentes porcentajes de datos de entrenamiento y validación y comparando los resultados obtenidos con las 13 bandas de S2 y usando solo las 4 bandas de SPOT. Para este análisis se han usado datos georreferenciados de más de 100 parcelas con diferentes coberturas tanto en la zona del INTA Hilario Ascasubi de Argentina como de la Huerta de Valencia. Se muestra finalmente un mapa de coberturas para cada zona.

RESULTADOS

Calidad del agua de las Ciénagas del Chocó

A partir de las simulaciones Hydrolight simulando las bandas S2 y usando ARTMO, se han buscado las mejores combinaciones de bandas de los índices mostrados en la Tabla 1. Para el caso de la clorofila, los ajustes que obtienen los mejores coeficientes de determinación R^2 se obtienen con el índice ND con las bandas centradas en 705 y 665 nm y un ajuste de tipo exponencial. En la Figura 2 (izquierda) se ha representado los valores de Chl en función del índice, que se puede ajustar a la función:

$$\text{Chl (mg/m}^3\text{)} = 6,9588 e^{8,4965 \text{ ND}} \quad R^2 = 0,743 \quad (3)$$

Siendo $\text{ND}_{705,665} = (\text{R}_{705} - \text{R}_{665}) / (\text{R}_{705} + \text{R}_{665})$ (4)

Sin embargo, también se obtiene buena correlación, aunque con R^2 algo menor, con el modelo tribanda (DO) con las bandas centradas en 740, 665 y 705 nm (Figura 2, derecha) que se puede ajustar mediante la ecuación lineal:

$$\text{Chl (mg/m}^3\text{)} = 11,051 + 134,95 \text{ DO}_{740, 665, 705} \quad R^2 = 0,678 \quad (5)$$

Siendo $\text{DO}_{740, 665, 705} = \text{R}_{740} (1/\text{R}_{665} - 1/\text{R}_{705})$ (6)

Ambas ecuaciones permiten la estimación de la Chl con S2, teniendo en cuenta a la hora de seleccionar una de ellas que el ajuste de la ecuación 3, a pesar de tener mejor correlación, es de tipo exponencial y que para valores altos del índice $\text{ND}_{705,665}$, un pequeño error en la estimación del índice proporcionará un error grande en la estimación de Chl (Figura 2 izda.), mientras la ecuación 5 es de tipo lineal y no presenta el problema de saturación.

Para el caso de SD, los ajustes que obtienen los mejores R^2 se basan en la reflectividad en la banda de 865 nm (R_{865}) con ajustes de tipo logarítmico y en el índice DLB en las bandas 705, 740 y 490 nm ($\text{DLB}_{705, 740, 490}$). En la Figura 3 (izquierda) se ha representado la SD en función de estos dos índices, y a la derecha se muestra la misma gráfica con el logaritmo decimal de una o las dos variables. Como se observa, la SD se puede estimar con:

$$\text{Log SD} = -3,0257 - 1,4379 (\log R_{865}) - 0,12747 (\log R_{865})^2 \quad R^2 = 0,983 \quad (7)$$

Donde SD se da en m. Coeficientes R^2 similares al ajuste anterior y superiores a 0,97 se obtienen con las bandas de 842, 783 y 740 nm. El siguiente índice que presenta la mejor correlación es el $\text{DLB}_{705, 740, 490}$ (Figura 3 abajo) que se puede ajustar con la ecuación:

$$\text{SD (m)} = -0,3137 + 0,0928 (\log \text{DLB}_{705,740,490}) + 0,3132 (\log \text{DLB}_{705,740,490})^2 \quad R^2 = 0,819 \quad (8)$$

Donde $\text{DLB}_{705,740,490} = R_{705} - \frac{1}{2} (R_{740} + R_{490})$ (9)

que corresponde a la altura del pico centrado en 705 nm respecto al promedio de 740 y 490 nm tomados como línea base.

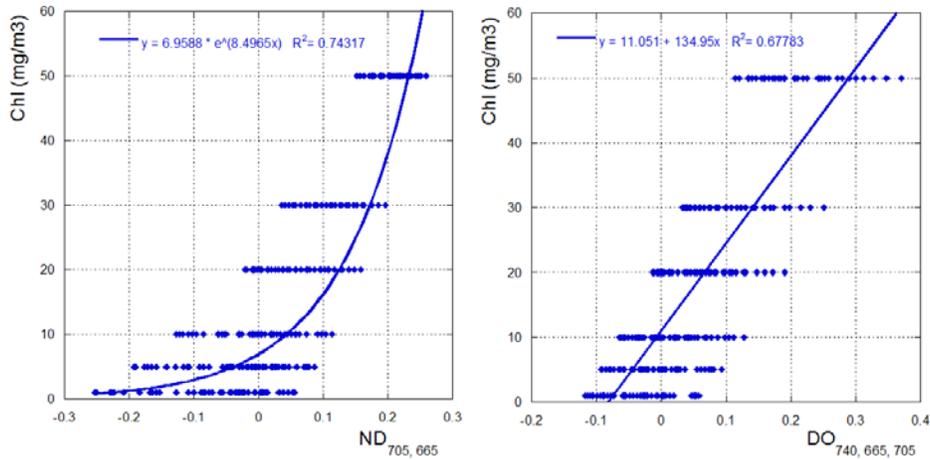


Figura 2. Concentración de clorofila en función de los índices $\text{ND}_{705,665}$ y $\text{DO}_{740, 665, 705}$ para las simulaciones S2 a partir de Hydrolight de las ciénagas del Chocó.

Analizando la Figura 3 se observa que, aunque la correlación de la ecuación 8 es inferior a la de la 7, el índice de la ecuación 8 puede tener una mayor capacidad de estimación de SD a causa de que la pendiente de la curva es inferior (Figura 3 izquierda) lo que proporciona una indeterminación menor en la predicción como consecuencia del error con el que se obtiene el índice. El resto de índices con diferentes combinaciones de bandas estudiados proporcionan R^2 menores a 0,57.

Lamentablemente hasta el momento de la redacción de este trabajo, no hemos conseguido ninguna imagen despejada S2 de esta zona en estudio, por lo que los métodos propuestos no han podido ser validados. La razón de que no existan imágenes se debe, por una parte, a la alta nubosidad de la región y por otra, el hecho de que, de momento, S2 no toma todas las imágenes en cada órbita en el continente americano. Están previstas distintas campañas de campo hasta final de año que esperamos nos puedan proporcionar datos de validación con imágenes S2 coincidentes con el momento de la toma de muestras.

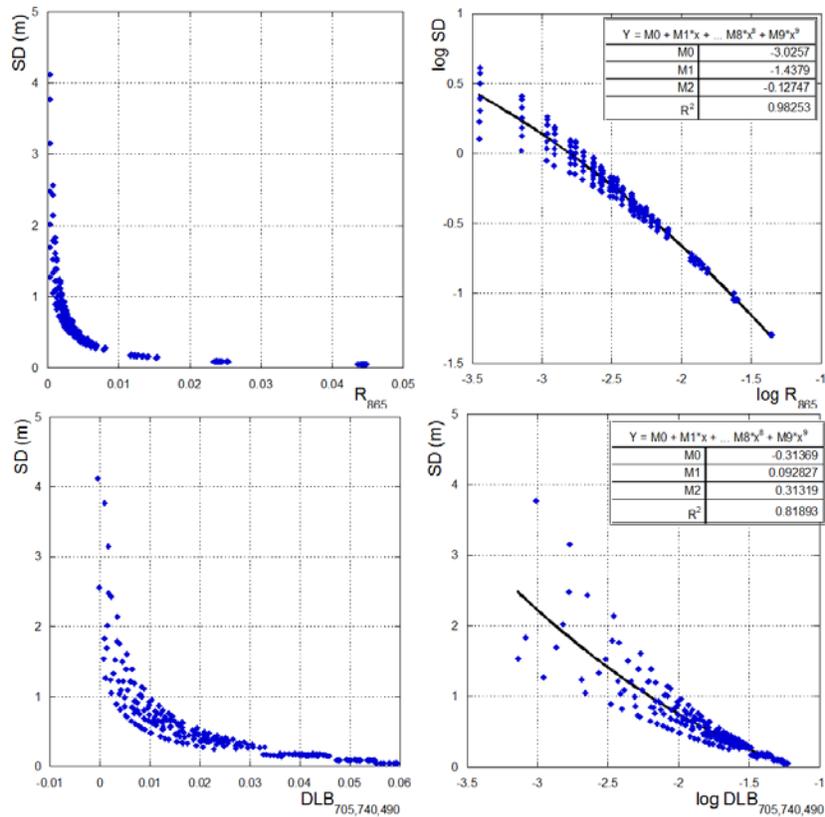


Figura 3. SD de las simulaciones S2 a partir de Hydrolight de las ciénagas del Chocó en función de R_{865} y de $DLB_{705,740,490}$ (izquierda) y aplicando logaritmos (derecha).

Calidad del agua de la Laguna de Pétrola

A partir de las simulaciones Hydrolight para la Laguna de Pétrola simulando las bandas S2 y usando ARTMO, se han buscado las mejores combinaciones de bandas de los índices mostrados en la Tabla 1. Para Chl, la mejor correlación se obtiene con el índice DO (fórmula 6) con la ecuación

$$\text{Chl (mg/m}^3\text{)} = 25,151 + 145,77 \text{ DO}_{740, 665, 705} \quad R^2 = 0,850 \quad (10)$$

La gráfica es similar a la Figura 2 (derecha) por lo que no se muestra por falta de espacio. Para SD la mejor correlación se obtuvo con el índice $DLB_{705,740,490}$ mediante la relación:

$$\text{SD (m)} = -31869 x^3 + 3699,6 x^2 - 140,49 x + 1,9477 \quad R^2 = 0,819 \quad (11)$$

Donde $x = DLB_{705,740,490}$. (definido en la ecuación 9).

Se eligió la imagen S2 del 10 de julio de 2016 pues no tiene nubes y disponemos de algunos datos de campo de SD. La imagen fue corregida con Sen2Cor y se le aplicaron las ecuaciones 10 y 11. Sin embargo, los resultados obtenidos no tenían sentido dentro del rango esperado, por lo que se analizó por separado banda por banda, observando que en las bandas centradas

en 705 y 740 nm un elevado porcentaje de pixeles (mayor al 50 %) mostraban valores cero de reflectividad, lo que se atribuye a que Sen2Cor no está optimizada para cuerpos de agua. Para solventar el problema, se ha probado con otro algoritmo de corrección atmosférica de S2, el procesador C2RCC (Case-2 Regional / Coast Colour). Éste ha sido desarrollado para formar parte de la toolbox de ESA STEP (Science Toolbox Exploitation Platform) y permite realizar la corrección atmosférica y obtener las propiedades ópticas inherentes (IOP) a partir de imágenes de radiancia de MERIS, MODIS, MSI, OLCI y SeaWiFS (Brockmann et al., 2016). A partir de la imagen S2 corregida con C2RCC se ha aplicado la fórmula 10 y se ha obtenido el mapa de Chl que se muestra en la Figura 4 (arriba izquierda). Para comparar con el producto de Chl que el propio algoritmo C2RCC proporciona, en la Figura 4 (derecha) se muestra este mapa; a partir del diagrama de dispersión de los dos mapas se observa que los valores numéricos difieren en menos del 5% en valores centrales (alrededor de 23 mg/m³) y en el 20% para valores extremos.

La Figura 4 (abajo) muestra el mapa de SD obtenido con la ecuación 11 sobre la misma imagen S2 corregida con C2RCC. Los valores promedio coinciden con los medidos en campo (del orden de 0,3 m) aunque los valores mostrados en el mapa cerca de las orillas no son tan realistas, posiblemente debido a efectos de borde o de la propia influencia de la reflectividad de fondo.

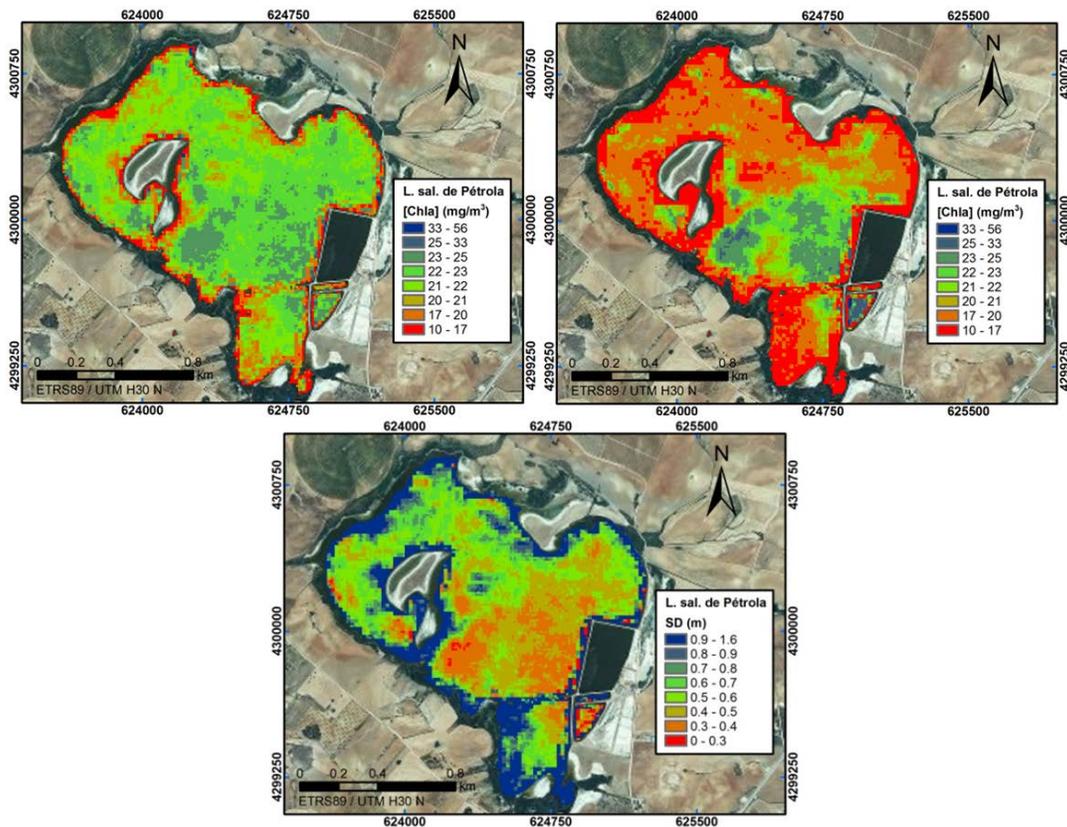


Figura 4. Mapas de Chl (arriba) de la Laguna de Pétrola a partir de la imagen S2 del 10 de Julio usando la ecuación 10 (izquierda) y producto de Chl ofrecido por C2RCC (derecha). Abajo, mapa de SD a partir de la misma imagen S2 usando la ecuación 11.

Chl y LAI de la Huerta de Valencia

A partir de la base de datos de Chl y LAI medidos en campo y los espectros S2 obtenidos de las imágenes corregidas atmosféricamente con Sen2Cor, se han analizado las mejores combinaciones de bandas de los índices de la Tabla 1, junto al índice NAOC usando la toolbox ARTMO. Los mejores resultados para la clorofila son (Figura 5):

$$\text{Chl } (\mu\text{g}/\text{cm}^2) = 109,75 + 79,66 \log \text{NAOC} \quad R^2 = 0,600 \quad (12)$$

$$\text{Chl } (\mu\text{g}/\text{cm}^2) = 62,339 + 201,9 \text{DO}_{665,1610,740} \quad R^2 = 0,595 \quad (13)$$

Siendo $\text{DO}_{665,1610,740} = R_{665} (1/R_{1610} - 1/R_{740})$.

El índice NAOC ha sido aplicado en otros trabajos a diferentes cultivos y vegetación urbana (Delegido et al., 2014), aunque el ajuste mejoraría con una muestra de mayor tamaño. En cuanto al índice tribanda $\text{DO}_{665,1610,740}$, parece tener sentido al usar las tres bandas clave para los estudios de vegetación: la de 665 nm, donde se produce la mayor absorción de la clorofila, la del red-edge (centrada en 740 nm) y la de 1610 nm, ambas muy utilizadas en estudios de vegetación.

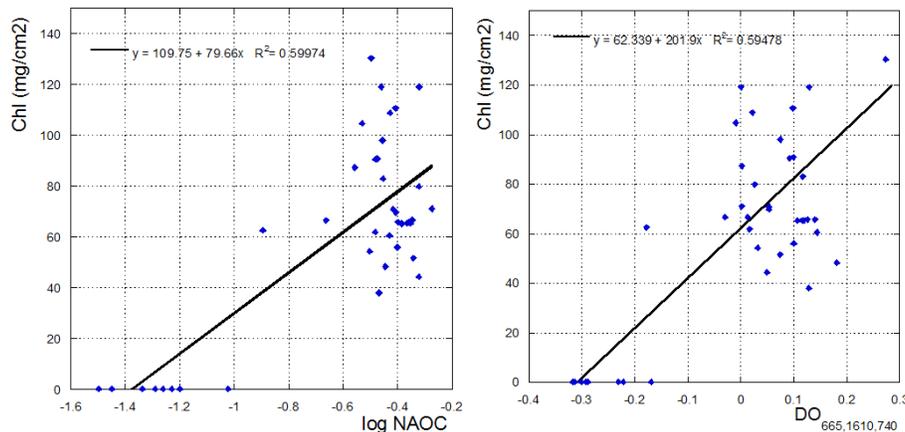


Figura 5. Valores experimentales de Chl en la huerta valenciana en función de los índices NAOC (izquierda) y $\text{DO}_{665,1610,740}$ (derecha) obtenidos de las imágenes S2.

En cuanto a los mejores resultados para el LAI (Figura 6) se obtienen con las ecuaciones

$$\text{LAI} = 1,8562 + 13,535 \text{ND}_{3560,665,945} \quad R^2 = 0,654 \quad (14)$$

$$\text{Siendo} \quad \text{ND}_{3560,665,945} = (R_{560} - R_{665}) / (R_{665} + R_{945}) \quad (15)$$

$$\text{LAI} = 0,11814 + 3,243 \text{ND}_{740,665} \quad R^2 = 0,577 \quad (16)$$

$$\text{Siendo} \quad \text{ND}_{740,665} = (R_{740} - R_{665}) / (R_{740} + R_{665}) \quad (17)$$

Ambos índices tienen sentido, pues $ND_{3560,665,945}$ corresponde a la altura del verde respecto al rojo, normalizado por la suma del rojo y de la máxima reflectividad en el NIR. También el índice $ND_{740,665}$ tiene sentido pues es similar al índice propuesto por otros autores usando las bandas del rojo y red-edge (Delegido et al., 2011).

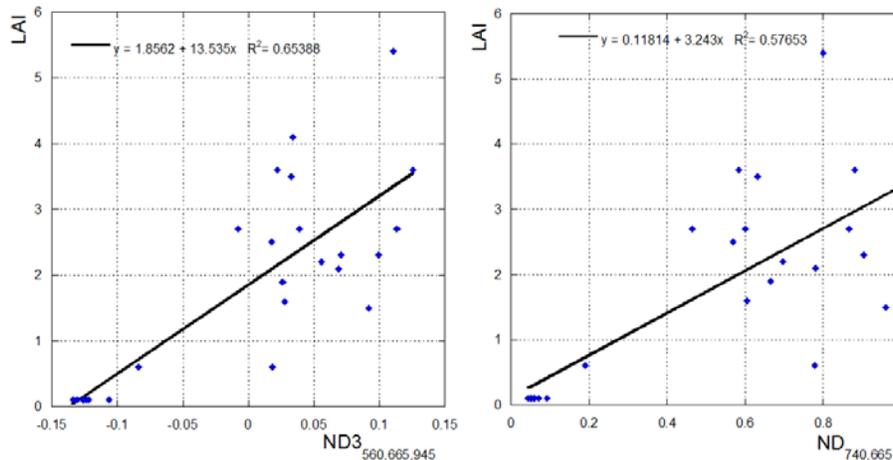


Figura 6. Valores experimentales de LAI en la huerta valenciana en función de los índices $ND_{3560,665,945}$ (izquierda) y $ND_{740,665}$ (derecha).

Aplicando las ecuaciones 12 y 14, se ha elaborado la Figura 7 que muestra el mapa de Chl (izquierda) y LAI (derecha) de la zona en estudio de la huerta valenciana, obtenida a partir de la imagen S2 del 1 de mayo de 2016 corregida con Sen2Cor. Los valores más altos de Chl (superiores a $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) y LAI (superiores a 2) corresponden a campos de naranjos, en ambos mapas en tonos azules, mientras los campos sin cultivar o suelos desnudos, con valores de Chl y LAI cercanos a cero, aparecen en rojo y naranja en las mapas de la Figura 7.

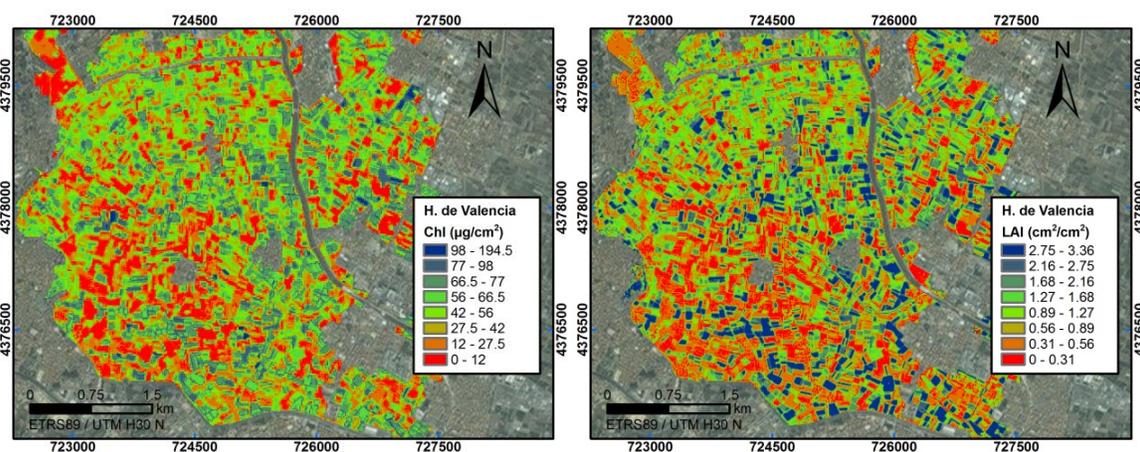


Figura 7. Mapa de Chl (izquierda) y LAI (derecha) de la zona en estudio de la Huerta de Valencia, obtenida a partir de la imagen S2 del 1 de mayo de 2016 aplicando las ecuaciones 12 y 14.

Clasificación de cultivos en la Estación Hilario Ascasubi (Argentina) y la Huerta de Valencia (España)

El objetivo de esta parte fue la cuantificación de la mejora en la clasificación de coberturas de suelos respecto a un satélite de referencia como SPOT. Para ello, se han usado como bases de datos más de 100 parcelas georreferenciadas y con información de su cobertura tanto en la zona del INTA como en la Huerta de Valencia, coincidentes con imágenes S2 de ambas zonas. Las categorías que forman el esquema de clasificación empleado para la Huerta de Valencia son: 1) suelo abandonado (sin cultivar); 2) alfalfa; 3) asfalto; 4) barranco (cauce seco); 5) cebolla; 6) coles; 7) lechuga; 8) naranjo; 9) palmera; 10) patata; 11) construcciones; 12) suelo desnudo; 13) vivero; 14) alcachofa. Y las categorías que forman el esquema para la zona de cultivos argentina son: 1) pasto natural o pastizal; 2) vivero; 3) maíz; 4) girasol; 5) cebolla; 6) construcciones o urbano; 7) parcela sin cultivo; 8) caminos; 9) alfalfa; 10) agua; 11) agropiro.

En la Tabla 2, se muestra el índice Kappa de los cuatro métodos en estudio y de la combinación de los cuatro, usando diferentes porcentajes de entrenamiento (entre 10 y 50%) y con las trece bandas de S2 comparando con las cuatro de SPOT. Se puede comprobar cómo las clasificaciones realizadas son mejores con todas las bandas que con cuatro bandas. Por otro lado, también se deduce que el mejor clasificador, es el K-NN, pues presenta el mayor índice Kappa.

En la Figura 8 se muestran dos imágenes clasificadas a partir de la imagen S2 corregida con Sen2Cor de la zona de la Huerta de Valencia, del 1 de mayo de 2016, y de la zona argentina del día 15 de enero de 2016 usando el clasificador K-NN en ambas.

Tabla 2. Índice Kappa aplicando diferentes técnicas con las 13 bandas de S2 y con las 4 bandas de SPOT.

13 Bandas					
Entrena. (%)	LDA	K-NN	Tree	RF	Combinación
10	0.76	0.82	0.62	0.84	0.85
20	0.81	0.88	0.75	0.88	0.90
30	0.80	0.91	0.81	0.91	0.93
40	0.81	0.94	0.82	0.94	0.94
50	0.80	0.96	0.87	0.95	0.96
4 Bandas					
Entrena. (%)	LDA	K-NN	Tree	RF	Combinación
10	0.70	0.79	0.61	0.77	0.80
20	0.71	0.85	0.75	0.82	0.85
30	0.71	0.89	0.78	0.88	0.90
40	0.72	0.91	0.79	0.90	0.91
50	0.72	0.94	0.82	0.92	0.94

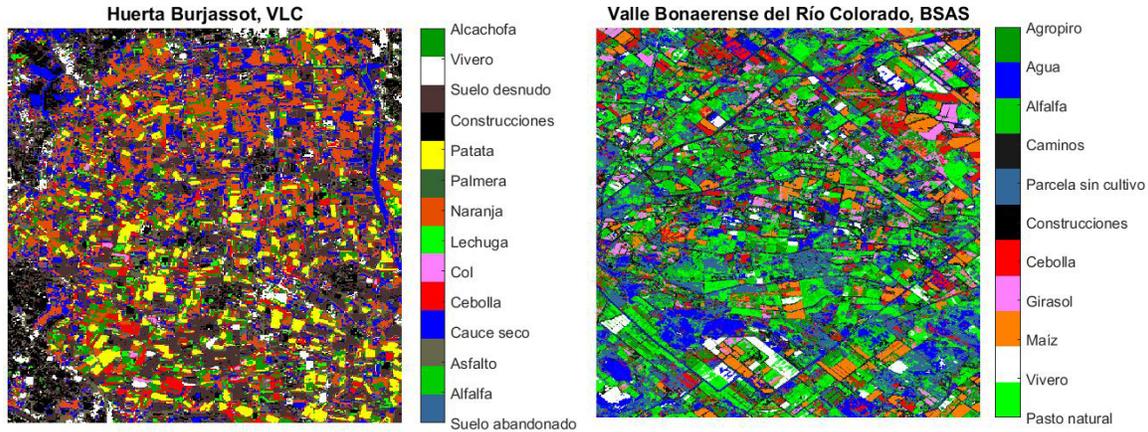


Figura 8. Imágenes clasificadas de la zona de Huerta de Valencia (izquierda) y del Valle Bonaerense del Río Colorado (derecha) con el clasificador K-NN a partir de S2.

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestran los primeros resultados de diferentes aplicaciones del nuevo S2 en estudios de vegetación y calidad de aguas. Se han obtenido índices para el estudio de la Chl y SD en lagos de la región del Chocó, observando que la Chl se puede estimar con un índice tipo ND con las bandas 705 y 665 nm y también con el índice Dall'Olmo (DO) con las bandas centradas en 740, 665 y 705, que coinciden prácticamente con las bandas propuestas por los autores. La SD se puede estimar a partir de la banda en 865 nm o con un índice tipo DLB en 705, 740 y 490 nm. Resultados parecidos se obtienen en la Laguna de Pétrola, estimando la Chl con el mismo índice DO y la SD con el índice DLB en las mismas bandas, mostrando los mapas resultados muy similares a los del procesador C2RCC.

Se muestran también los mejores índices para el estudio de la Chl y el LAI en los cultivos de la Huerta de Valencia, obteniendo buenos resultados para la Chl con el NAOC y el índice tipo DO con las bandas 665, 1610 y 740 nm y para el LAI con un índice tipo ND3 con las bandas 560, 665 y 945 nm y un índice tipo ND con las bandas 740 y 665 nm.

Del análisis de diferentes métodos de clasificación hemos observado que el mejor clasificador es el K-NN y se ha cuantificado la mejora respecto a SPOT resultando que S2 es capaz de mejorar la clasificación con SPOT entre el 2 y el 5 %, dependiendo del método utilizado.

S2 abre una nueva era en las aplicaciones de la teledetección, con imágenes de alta calidad que mejoran sensiblemente las misiones operativas actuales, aunque es necesario mejorar todavía los procesos de búsqueda y descarga de imágenes, así como el acceso a productos de nivel avanzado.

BIBLIOGRAFÍA

Altman, N. S., 1992. "An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression". *The American Statistician*, 46 (3), 175–185.

- Breiman, L., 2001. "Random forests". *Mach. Learn.*, 45, 5–32.
- Brockmann, C.; Doerffer, R.; Krasemann, H.; Steinmetz, F.; Tilstone, G.; Ruddick, K.; Ruescas, A.; Regner, P., 2016. "Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters". *Living Planet Symposium 2016 (ESA)* (<http://lps16.esa.int>)
- Carletta, J., 1996. "Assessing agreement on classification tasks: The kappa statistic". *Computational Linguistics*, 22(2), 249–254.
- Confalonieri, R. et al., 2013. "Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods". *Comput. Electron. Agriculture*, 96, 67–74.
- 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.
- Delegido, J.; Alonso, L.; González, G.; Moreno, J., 2010. "Estimating chlorophyll content of crops from hyperspectral data using a normalized area over reflectance curve (NAOC)". *International Journal Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 165–174.
- Delegido, J.; Verrelst, J.; Alonso, L.; Moreno, J., 2011. "Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content". *Sensors*, n. 11, 7063-7081.
- Delegido, J.; Van Wittenberghe, S.; Verrelst, J.; Ortiz, V.; Veroustraete, F.; Valcke, R.; Samson, R.; Rivera, J.P.; Tenjo, C.; Moreno, J., 2014. "Chlorophyll content mapping of urban vegetation in the city of Valencia based on the hyperspectral NAOC index". *Ecological Indicators*, 40, 34-42.
- Drusch, M.; Del Bello, U.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F.; Hoersch, B.; Isola, C.; Laberinti, P.; Martimort, P., et al. 2012. "Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services". *Remote Sensing Environment*, 120, 25–36.
- ESA, 2016a. "ESA's Sentinel Satellites". Disponible online: http://www.esa.int/esaLP/SEMM4T4KXMF_LPgmes_0.html (acceso el 30 junio 2016).
- ESA, 2016b. "Sentinel-2 MSI. Level-2a Prototype Processor Installation and User Manual". Disponible online: <http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.2.1/S2PAD-VEGA-SUM-0001-2.2.pdf> (acceso el 30 de junio 2016).
- Gómez-Alday, J.J.; Castaño, S.; Sanz, D., 2004. "Origen geológico de los contaminantes (sulfatos) presentes en las aguas subterráneas de la Laguna de Pétrola (Albacete, España). Resultados preliminares". *Geogaceta*, 35, 167-170.
- Lozano, L. A., 2010. "Concepciones socioculturales y económicas de las ciénagas de Beté (Chocó, Colombia)". *Bioetnia* 7 (1), 59-67.
- McLachlan, G. J. (2004). "Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition". Wiley Interscience.
- Mobley, C. D., 1989. "A numerical model for the computation of radiance distributions in natural waters with wind-roughened surfaces". *Limn. and Ocean.*, 34(8), 1473–1483.
- Quinlan, J.R., 1993. "Programs for Machine Learning". 1st ed. San Mateo, CA, Morgan.
- Rivera, J.; Verrelst, J.; Delegido, J.; Veroustraete, F.; Moreno, J., 2014. "On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization". *Remote Sensing* 6 (6), 4924–4951.
- Vicente, E.; Miracle, M. R., 1997. "Estudio limnológico de 28 humedales de Castilla-La Mancha como base para la elaboración del Plan de Ordenación de recursos Naturales". Univ. Val. y Junta Com. CLM. www.limnetica.com/document/Humedales_CLM.pdf