

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

VALIDACIÓN DE PRODUCTOS MODIS RELACIONADOS CON LA ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE CARBONO EN UN ECOSISTEMA DE DEHESA

ELIA DURÁ CANDELA¹, GORKA MENDIGUREN GONZÁLEZ¹, JAVIER PACHECO LABRADOR¹, MARÍA PILAR MARTÍN ISABEL¹, DAVID RIAÑO^{1,2}, MAITANE ITURRATE GARCÍA³, CRISTINA GIMENO CÓLERA³, ARNAUD CARRARA³

¹Instituto de Economía, Geografía y Demografía, Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). elia.dura@cchs.csic.es. C/Albasanz, 26-28, Madrid, España

²Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS), 233 Veihmeyer Hall/ One Shields Avenue, University of California, Davis, CA 95616-8617, EE.UU.

³Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). C/ Charles R. Darwin, Paterna, España

RESUMEN

En este trabajo se validan diferentes productos MODIS a partir de mediciones de campo. Se ha empleado una serie temporal de los productos de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, MOD/MYD13Q1), índice de área foliar (LAI, MOD/MYD/MCD15A2) y productividad primaria bruta (GPP, MOD/MY17A2) adquiridos entre los años 2009 y 2011 en una dehesa de Cáceres que dispone de una torre de medición de flujos incluida en la red internacional FLUXNET. Los resultados obtenidos muestran correlaciones significativas (P-valor<0,01) para NDVI ($r^2=0,91$), LAI ($r^2=0,73$) y GPP ($r^2=0,79$). A pesar de que MODIS recoge bien las dinámicas temporales en el ecosistema, se observaron importantes diferencias, el error medio cuadrático relativo (RRMSE) fue menor para el NDVI (7,5%) que para los productos más complejos LAI (30,1%) y GPP (59,5%).

Palabras clave: productos MODIS, índice de vegetación de diferencia normalizada, índice de área foliar, productividad primaria bruta, validación, flujos de carbono, ecosistema mediterráneo.

VALIDATION OF MODIS PRODUCTS RELATED TO ESTIMATION OF CARBON FLOWS IN A "DEHESA" ECOSYSTEM

ABSTRACT

This paper validates different MODIS products using *in situ* field measurements. To this end, a temporal series of normalized difference vegetation index (NDVI, MOD/MYD13Q1), leaf area index (LAI, MOD/MYD/MCD15A2) and gross primary productivity (GPP, MOD/MY17A2) products acquired between 2009 and 2011 are analysed. The study area is located in a "dehesa", in Caceres province, where an "eddy covariance" tower part of the FLUXNET international network is located. The results show significant correlation (P-value<0,01) for NDVI ($r^2 = 0,91$), LAI ($r^2 =$

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

0,73) and GPP ($r^2 = 0,79$). Although MODIS adequately capture ecosystem temporal dynamics and structural vegetation changes, significant differences were found between estimated and observed data, relative root mean square error (RRMSE) was lower for NDVI (7,5%) than for more complex products such as LAI (30,1%) and GPP (59,5%).

Keywords: MODIS products, normalized difference vegetation index, leaf area index, gross primary productivity, validation, carbon fluxes, Mediterranean ecosystem.

1. Introducción

El gran interés que, por parte de la comunidad científica, ha suscitado el uso de la información procedente del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) y, más concretamente, del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), se fundamenta en la excelente calidad de los datos proporcionados a escala global, su libre y rápido acceso en la red y la disponibilidad de un buen número de herramientas para el procesado y análisis de la información (López Saldaña *et al.*, 2011). Además, todo esto ha ayudado a que la Agencia Espacial Estadounidense (NASA) haya generado productos globales estándar para muy diversas aplicaciones, entre ellas la estimación de variables relacionadas con la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas.

Productos derivados de la información captada por el sensor MODIS, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de área foliar (LAI) o la productividad primaria bruta (GPP) han sido ampliamente utilizados, no sólo en la modelización de los ciclos de carbono y agua a nivel global (Zhao *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2008; Lu y Zhuang, 2010), sino también en el estudio de diversos parámetros ecológicos, por su influencia sobre patrones en la distribución de especies animales (Pettorelli *et al.*, 2011; Klaassen *et al.*, 2010), de la biodiversidad vegetal (Waring *et al.*, 2006) o de la productividad vegetal de cultivos (Zhang *et al.*, 2008, Yang *et al.*, 2009).

Uno de los retos más importantes que se plantean al generar este tipo de productos globales es realizar una adecuada validación de los mismos que garantice la calidad y consistencia de las estimaciones. Para la mayoría de los productos, estas validaciones han sido realizadas en un amplio rango de ecosistemas que cubren desde zonas áridas en EE.UU. o Australia (Gokhale y Weber, 2010, Sea *et al.*, 2011) hasta bosques húmedos de Europa (Verger *et al.*, 2007) o EE.UU. (Turner *et al.*, 2006a). Además, estas comparaciones han sido tanto directas, es decir, basadas en datos medidos en terreno (Privette *et al.*, 2002; Cheng, Y. *et al.*, 2006; Pisek y Chen, 2007) como indirectas, esto es, utilizando como referencia información captada por otros sensores tanto aeroportados como satelitales (AVIRIS, MERIS, Landsat-TM, CYCLOPES, etc.) (Cheng, Y. *et al.*, 2006 ; Cheng Y.-B. *et al.* ; 2006, Baret *et al.*, 2006 ; Verger *et al.*, 2007 ; Pisek y Chen, 2007).

Estos trabajos han demostrado la existencia de buenas estimaciones para algunos parámetros biofísicos sobre diferentes tipos de ecosistemas, especialmente en zonas húmedas (Turner *et al.*, 2006a). Sin embargo, en ecosistemas con déficit hídrico, los estudios realizados hasta la fecha muestran diferencias significativas entre los datos estimados por MODIS y los observados

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

en terreno (Cheng Y. *et al.*, 2006, Turner *et al.*, 2006b; Sea *et al.*, 2011; Hill *et al.*, 2006; Privette *et al.*, 2002).

Este trabajo se ha centrado en analizar la calidad de las estimaciones realizadas por diversos productos MODIS en una dehesa, ecosistema mediterráneo de gran valor ecológico, interés socio-económico y extensa representación espacial en el sur de Europa (San Miguel, 1994; Olea y San Miguel-Ayanz, 2006) que presenta un importante déficit hídrico en los meses de verano y una estructura compleja por la presencia de dos estratos de vegetación, el herbáceo y el arbóreo, con características biofísicas muy distintas. En concreto se han analizado los siguientes productos: NDVI (MOD/MYD13), LAI (MOD/MYD/MCD15) y GPP (MOD/MYD17), los cuales, como hemos visto, son herramientas clave en muchos trabajos de seguimiento de cultivos agrícolas y del cambio climático, por lo que un desajuste de los valores estimados puede producir errores significativos en el balance de carbono global (Cohen *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2011) y así en la comprensión de los impactos específicos del Cambio Global en estos ecosistemas.

3. Materiales, datos y métodos

3.1. Área de estudio

El estudio ha sido llevado a cabo en una zona de dehesa situada en Majadas del Tiétar (39°20'41.17''; 0°19'12.03''), al sureste de la provincia de Cáceres (España) y muy próxima al Parque Nacional de Monfragüe. La zona está caracterizada por un clima típico mediterráneo con veranos secos y calurosos e inviernos húmedos y templados. La temperatura y precipitación media anual es 16,7 °C y 572 mm, respectivamente. La altitud media sobre el nivel del mar es de 256 m. Este ecosistema se compone de dos estratos de vegetación muy bien diferenciados: el estrato arbóreo, compuesto por árboles dispersos, donde la especie principal es la encina (*Quercus ilex* L. subsp. *ballota*), encontrando también algunos pies aislados de quejigo (*Quercus faginea* Lam.), y el estrato herbáceo, el cual está compuesto por una gran variedad de especies típicas de dehesa, entre las que destacan por su número *Rumex acetosella* L., *Erygium campestre* L., *Erodium cicutarium* L. y *Erodium botrys* (Cav.). El pasto o estrato herbáceo, sometido a un pastoreo continuo, no suele alcanzar alturas superiores a los 30 cm.

La zona de estudio comprende, más concretamente, un área aproximada de 1 km² centrada en una torre de medición de flujos por el método *eddy covariance* (Baldocchi, 2003) incluida en la red CARBORED (<http://www.ceam.es/carboredes>) y FLUXNET (<http://fluxnet.ornl.gov>) y gestionada por el CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo) desde el año 2003. Dentro de esta zona se caracterizaron dos áreas de estudio de diferente tamaño, definidas para comparar los productos MODIS, ya que estos presentan distinta resolución espacial (píxeles de 1 km y de 250 m). Para ello se identificaron los píxeles MODIS de diferentes tamaños, dependiendo del producto, centrados en la zona de estudio y se calculó en ellos la proporción (fCover) de cada tipo de cobertura del ecosistema (en este caso, pasto y arbolado) (figura 1). Esta caracterización se realizó mediante digitalización de las copas de los árboles identificadas en una ortofoto PNOA 2006 (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) de 50 cm de resolución utilizando *ArcGIS* 10. El área

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

incluida en el píxel MODIS de 1 km muestra una proporción de encina del 20,9% y del 79,1% de pasto, mientras que en el área correspondiente al píxel de 250 m la proporción de encina estimada fue ligeramente inferior, del 18,7%, frente al 81,3% de pasto.

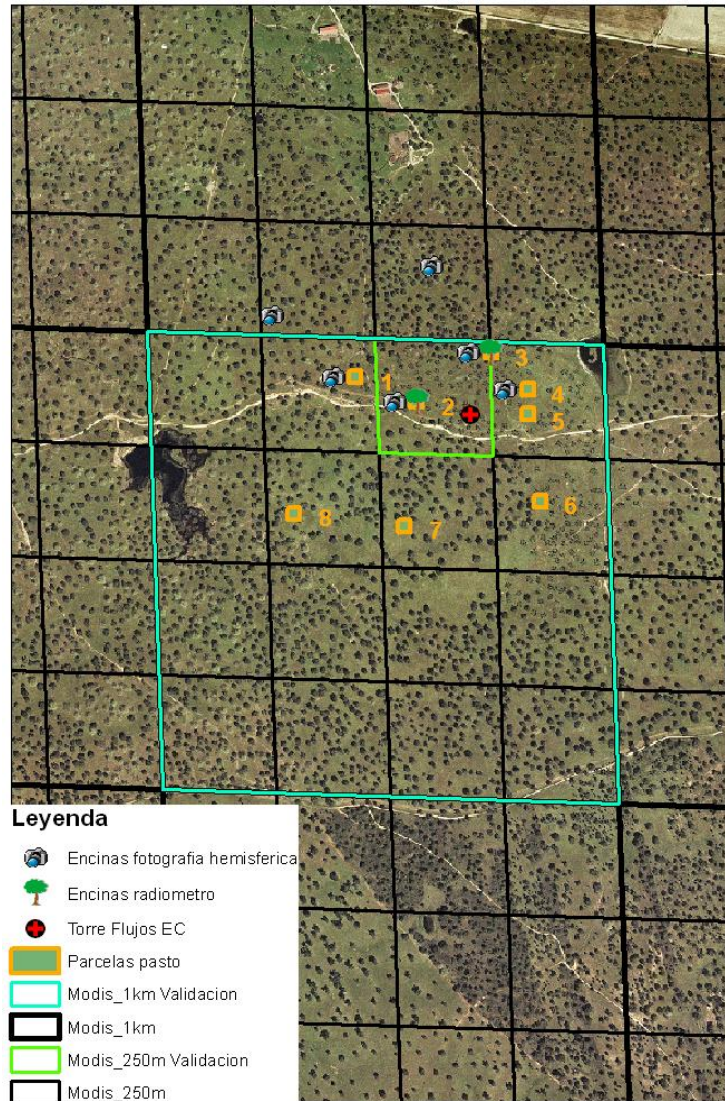


Figura 1. Localización de las parcelas de muestreo de pasto, de la torre de flujos EC y de los píxeles de 250 m y de 1 km.

3.2. Productos MODIS

Los productos NDVI utilizados en el estudio fueron MOD13Q1 y MYD13Q1. El prefijo MOD hace referencia a que el producto ha sido elaborado a partir del sensor MODIS a bordo del

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

satélite TERRA, mientras que el prefijo MYD corresponde al satélite AQUA. Ambos productos tienen una resolución espacial de 250 m y una resolución temporal de 16 días de forma alterna en el tiempo, existiendo, por tanto, datos de MOD o MYD cada 8 días. Información específica sobre el algoritmo empleado para estos y otros productos se pueden encontrar en la red (<http://modis-land.gsfc.nasa.gov>). En el caso del NDVI se emplearon como datos de partida la versión 5 (*collection 5*) que está en su etapa 2 de validación. La etapa de validación indica el rigor de los datos y evoluciona desde 1 hasta 4, siendo 4 el más riguroso (NASA, 2010). Los productos MOD-MYD-MCD15A2 contienen estimaciones de LAI y fAPAR (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation*), si bien en este trabajo sólo se aborda la validación de LAI. En este caso, además de los compuestos basados en TERRA y AQUA, se empleó el producto combinado que lleva el prefijo MCD. Todos ellos presentan una resolución espacial de 1 km² y una resolución temporal de 8 días, sincrónica para ambos satélites. Igualmente, se empleó también la versión 5, que está en su etapa 2 de validación. Por último, los productos MOD-MYD17A2_51 son considerados el primer conjunto de datos fruto del seguimiento global y continuo de GPP y está definido como el carbono acumulado fijado por la vegetación a través de la fotosíntesis en un período de 8 días y con una resolución espacial de 1 km². Se empleó la versión 5.1, que está en su etapa 3 de validación (Tabla 1).

Todos los productos utilizados en este trabajo fueron descargados del *Distributed Active Archive Center for Biogeochemical Dynamics* (NASA, 2012). Se seleccionaron los datos MODIS correspondientes a una zona de influencia de 5 km alrededor de la torre de flujos de Majadas del Tiétar, para un período comprendido entre marzo de 2009 y octubre de 2011. Las imágenes fueron procesadas mediante una rutina programada en MATLAB (Natick, Massachusetts, USA) para la extracción de los valores de todos los parámetros o capas del producto estimado en el píxel deseado centrado en la torre (figura 1). Para su comparación con los datos obtenidos *in situ*, se asignó el día de muestreo en campo al dato MODIS que contenía esta fecha dentro de su periodo de observación (8 ó 16 días).

Todas las imágenes fueron filtradas utilizando los parámetros de calidad, "quality flags" (QC), que los propios productos facilitan y que permiten identificar la presencia de nubes, sombras de nubes, contaminación atmosférica por aerosoles, error en la adquisición del dato o problemas con los algoritmos. En los análisis de validación sólo se han utilizado las imágenes resultantes del filtrado, clasificadas como "buena calidad" (Roy *et al.*, 2002).

Como paso previo a la validación de los productos se realizó un análisis comparativo entre los productos derivados de TERRA y los obtenidos a partir de AQUA. Los parámetros que diferencian ambos satélites pueden resumirse en estos tres puntos importantes:

1. Las órbitas que realizan no son las mismas, por lo que el ángulo de observación a un determinado punto varía según la plataforma para un mismo día.
2. La captura de la imagen se produce a distinta hora. La hora local de paso por el Ecuador para la plataforma TERRA es aproximadamente a las 10:30 AM, mientras que para la plataforma AQUA es a la 01:00 PM. Esta diferencia en la hora de paso provoca diferencias en las condiciones de iluminación, atmósfera y estado fisiológico de la vegetación que se reflejan en los productos derivados de ambos sensores.

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

- En tercer lugar, existen diferencias derivadas de problemas en los sensores. Así, 14 de los 20 detectores de la banda 6 (1,6 μm) del satélite AQUA son inefectivos desde poco tiempo después del lanzamiento (Shen *et al.*, 2011) y la banda 5 (1,23~1,25 μm) del satélite TERRA produce imágenes ruidosas, debido a fallos en uno de sus 20 detectores (Wang *et al.*, 2011). Por ello, para algunos productos, en los que la reflectividad en estas bandas es utilizada, existen marcadas diferencias entre los valores estimados según el satélite.

Tabla 1. Descripción básica de los productos MODIS y datos de campo utilizados en el estudio.

PARAMETRO	TIPO	FUENTE	RESOLUCION TEMPORAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL/ ÁREA DE MUESTREO	COLECCIÓN/ VERSION
NDVI	CAMPO	Pasto: Radiometría	16 días 2009-2011	Mediciones puntuales en 2 parcelas de 25x25 m	
		Arbolado: Radiometría	Campañas puntuales 2010	2 encinas seleccionadas en el área de estudio	
	MODIS	MOD13Q1 + MYD13Q1	16 días 2009-2011	250m	Versión 5 Estadio Val. 2
LAI	CAMPO	Pasto: Muestreo destructivo	16-30 días	Mediciones puntuales en 8 parcelas de 25x25 m	
		Arbolado: Fotografía hemisférica	Campañas puntuales 2009-2010	6 encinas seleccionadas en el área de estudio	
	MODIS	MCD15A2	8 días 2009-2011	1.000 m	Versión 5 Estadio Val. 2
GPP	CAMPO	Sistema Eddy Covariance	Diaria 2009-2010	Footprint torre	
	MODIS	Promedio entre MOD17A2 y MYD17A2	8 días 2009-2011	1.000 m	Versión 5 Estadio Val. 3

3.3. Datos de terreno

3.3.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI está basado en el contraste espectral entre las regiones del visible e infrarrojo cercano. El comportamiento diferencial de la vegetación en estas dos regiones del espectro se relaciona con el verdor y, tal y como se ha demostrado en la literatura, permite estimar diversos parámetros relacionados con el estado y estructura de la cubierta vegetal (Gamon *et al.*, 1995). En este estudio los valores de NDVI calculados por el correspondiente producto MODIS se compararon con los calculados a partir de radiometría de campo medida sobre el pasto y las encinas. Para ello, se empleó un espectro-radiómetro ASD Fieldspec FR3 (Boulder, Colorado, USA) que mide en un rango espectral desde 350 nm hasta 2500 nm. Los valores de reflectividad de este instrumento se encuentran disponibles en intervalos de 1 nm, por lo que fueron remuestreados a las bandas MODIS utilizando el *software* ENVI (Boulder, Colorado, USA), que emplea una función normal como respuesta espectral de cada banda.

Las mediciones de reflectividad del pasto se obtuvieron aproximadamente cada 16 días en las 8 parcelas de pasto seleccionadas (figura 1), aunque sólo se han considerado las parcelas 2 y 3 que están incluidas dentro del píxel MODIS de 250 m para la comparación con los productos MOD-MYD13Q1 (figura 1). En cada parcela se realizaron dos transeptos, recorriéndose las diagonales NE-SW y NW-SE. Antes de realizar las mediciones de cada transepto se calibró el espectro-radiómetro usando un blanco de referencia calibrado (Labsphere, Inc, North Sutton, NH, USA); se obtuvieron las medidas a una altura aproximada de 1 m sobre la superficie, obteniendo entre 10 y 20 espectros por transepto que fueron promediados para cada parcela y para cada píxel MODIS.

Adicionalmente, se realizaron dos campañas de medición de reflectividad de dosel arbóreo, utilizando el mismo espectro-radiómetro elevado mediante una grúa Genie TZ-34/20 (Terex Corporation, Westport, Connecticut, USA) sobre dos encinas localizadas dentro del píxel MODIS 250 m (figura 1). Estas mediciones se realizaron en los meses de mayo y julio de 2010. Los valores de NDVI de estas encinas se consideraron constantes debido a la baja variabilidad espacio-temporal que presenta esta especie, ya evaluada en otros estudios (Gamon *et al.*, 1995; Lloret *et al.*, 2007).

Finalmente, los valores de NDVI de pasto y encina fueron promediados teniendo en cuenta la proporción de cada componente en el píxel MODIS 250 m, siendo, en este caso, de 18,7% de cobertura arbórea y 81,3% de pasto. De esta forma recalculamos un valor de terreno para cada día de muestreo al que denominamos NDVI Ecosistema (Ecuación 1).

$$\text{NDVI Ecosistema}_i = \sum_{j=1}^n (\text{NDVI}_j \times f\text{Cover}_j) \text{ [Ecuación 1]}$$

Donde i es cada uno de los días de muestreo; n = número máximo de tipos de coberturas que existe en el ecosistema; NDVI es el valor promedio del píxel medido para cada uno de los tipos de

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

coberturas y $fCover$ es la proporción de 0 a 1 de cada cobertura respecto de la superficie total del píxel MODIS.

3.3.2. Índice de área foliar (LAI)

Este parámetro está definido como el área relativa de la hoja por unidad de superficie de suelo (m^2 hoja/ m^2 suelo). Se trata de un parámetro clave para definir la estructura del dosel y se relaciona de manera directa con la productividad del ecosistema (Pisek y Chen, 2007).

Caracterizar el LAI en sistemas abiertos, similares a las sabanas, constituye un reto, ya que la altura del pastizal en estos ecosistemas puede ser insuficiente para poder captar su dinámica mediante métodos no destructivos utilizando sensores como *Tracing Radiation and Architecture of Canopies* (TRAC), LAI-2000 (*Plant Canopy Analyser*, LI-COR) o fotografía hemisférica (Privette *et al.*, 2002). Debido a las peculiares características del ecosistema estudiado, en el presente trabajo se ha abordado la medición del LAI mediante la combinación de métodos destructivos (en el caso del pasto) y no destructivos (en el caso del arbolado), tal y como se describe a continuación.

A lo largo de los dos años de estudio (2009-2011) y con una periodicidad aproximada de 16 días, se muestrearon 8 parcelas cuadradas de pasto de 25 m de lado, distribuidas aleatoriamente dentro del área de estudio (figura 1). En cada una de estas parcelas se realizó el muestreo destructivo de tres cuadrantes de 25 por 25 cm localizados, a su vez, de forma aleatoria dentro de la parcela. De cada uno de los cuadrantes se recolectó, cortando a ras de suelo, toda la vegetación verde o seca siempre que estuviese enraizada. Adicionalmente, se recolectó, de forma separada, la biomasa muerta depositada sobre el terreno (hojas, ramitas, frutos, etc.). Las muestras de cada cuadrante fueron introducidas en una bolsa *zip* y pesadas en campo. Posteriormente, fueron conservadas en una nevera portátil y transportadas al laboratorio donde, para cada muestra, se seleccionó una submuestra representativa de la vegetación recolectada en el cuadrante. Esta submuestra fue escaneada para obtener el valor del área foliar de toda la vegetación enraizada. El valor de LAI se obtuvo relacionando el peso de la submuestra con el peso total de la muestra del cuadrante y el área del mismo. Durante 33 campañas de muestreo se recolectaron un total de 794 muestras. Estas muestras fueron sometidas a un riguroso proceso de control, eliminándose todas las que pudieran ofrecer valores anómalos por la presencia de hongos, tierra o raíces. Finalmente, se obtuvieron un total de 16 días en los que las mediciones de LAI se consideraron libres de posibles errores derivados del muestreo.

El LAI del dosel arbóreo se obtuvo a partir de fotografía hemisférica, utilizando una cámara Canon Nikon Coolpix 4500 y una lente Fisheye. En condiciones de nubosidad o con bajo ángulo solar (atardecer) se adquirieron cuatro imágenes hemisféricas bajo el dosel de encinas seleccionadas en el área de estudio, colocando la cámara en cada uno de los puntos cardinales alrededor del tronco. Las imágenes fueron procesadas con el programa *HemiView-Forest Canopy Image Analysis System* (*Delta-T Devices*) para la estimación de LAI. Se realizaron tres campañas de medición de LAI arbóreo durante los dos años (julio y octubre de 2009 y agosto de 2010) para seis árboles (figura 1) que fueron considerados representativos de la variabilidad espacial del arbolado presente en la zona (ejemplares podados y no podados). Los valores de LAI obtenidos para cada árbol y

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

campana se promediaron para obtener un valor único de LAI, ya que los análisis no mostraron diferencias significativas entre las encinas muestreadas, ni entre las diferentes campañas de muestreo (ANOVA, $P=0,05$, $F=1,15$), por lo que se asumió un LAI arbóreo sin variaciones significativas, tanto espacial como temporalmente.

Finalmente, el LAI del ecosistema fue calculado como un valor ponderado (Ecuación 2) para cada día de muestreo, teniendo en cuenta la proporción de arbolado y pasto en el píxel MODIS de 1 km.

$$\text{LAI}_{\text{Ecosistema}_i} = \sum_{j=1}^n (\text{LAI}_j \times f_{\text{Cover}_j}) \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde i es cada uno de los días de muestreo; n = número máximo de tipos de coberturas que existe en el ecosistema; LAI es el valor promedio del píxel medido para cada uno de los tipos de coberturas y f_{Cover} es la proporción de 0 a 1 de cada cobertura respecto de la superficie total del píxel MODIS.

3.3.3. Productividad Primaria Bruta (GPP)

Los valores de GPP utilizados para la validación de los productos MODIS corresponden a los datos estimados a partir de las medidas de intercambio neto de carbono proporcionadas por la torre de medición de flujos situada en la zona de estudio durante los años 2009 y 2010. La medida del intercambio neto de CO_2 entre el ecosistema y la atmósfera se realizó por el método micrometeorológico *eddy covariance* (EC) a partir de sensores instalados en la zona en una torre de 15,5 m de altura. La instrumentación utilizada consiste en un anemómetro sónico tridimensional Solent R3-50, (Gill Instruments, Lymington, UK) y un analizador de gases (CO_2 , H_2O) infrarrojo LI-7500 (LI-COR Inc. Lincoln, NE, USA).

Tanto el cálculo como el control de calidad de los datos de intercambio neto de CO_2 a nivel del ecosistema (NEE) se realizaron siguiendo las directivas y recomendaciones utilizadas por las principales redes internacionales de medidas de flujos de carbono, como CarboEurope (Aubinet *et al.*, 2000). El proceso de *gap-filling*, necesario para rellenar los huecos en las series de datos de NEE, se realizó por el método de *Marginal Distribution Sampling* (MDS), que se considera uno de los métodos más robustos y eficaces para el relleno de series de NEE (Moffat *et al.*, 2007) y es uno de los dos métodos estándar utilizado por las redes internacionales FLUXNET y CarboEurope (Papale *et al.*, 2006).

Los valores de GPP han sido estimados a partir de las medidas de NEE, realizando un *flux-partitioning*, que consiste en la separación del NEE entre respiración del ecosistema (Reco) y producción primaria bruta (GPP). Esta separación se realizó utilizando el método estándar de FLUXNET y CarboEurope, que se basa en la extrapolación de las medidas de flujos nocturnos de NEE con ecuaciones no lineales relacionando Reco con la temperatura ambiente (Reichstein *et al.*, 2005).

3.4. Estadísticos de validación

A fin de comparar los productos generados por MODIS con los datos observados en campo, hemos seleccionado algunos parámetros estadísticos recomendados por la bibliografía existente para tal propósito (Richter *et al.*, 2012). A través del cálculo de la raíz del error medio cuadrático (RMSE, Ecuación 3), evaluamos la magnitud del error de las estimaciones. Calculamos, además, el coeficiente de determinación (R^2 , Ecuación 4), que indica el grado de acuerdo entre los valores estimados y observados y las relaciones relativas entre ellos a través de la pendiente (m) y el interceptor (b) de la función de ajuste (Ecuación 5). Y por último, evaluamos el error medio cuadrático relativo o RRMSE (Ecuación 6), para hacer comparable el error de los productos de NDVI, LAI y GPP entre sí.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{est}^i - V_{obs}^i)^2} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{est}^i - \hat{V}_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{est}^i - \bar{V}_{est})^2} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

$$V_{est}^i = m V_{obs}^i + b \quad \text{[Ecuación 5]}$$

$$RRMSE = 100 * \frac{RMSE}{\bar{V}_{obs}} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Siendo V_{obs} = valor de la variable biofísica observado en terreno; V_{est} = valor de la variable biofísica estimada por el satélite e i = cada uno de los días de observación.

4. Resultados y discusión

4.1. Comparación del NDVI.

Como ya se ha estudiado en otros trabajos, el NDVI está estrechamente relacionado con otros parámetros estructurales de la vegetación como son el LAI, la fracción fotosintética activa (fPAR) y GPP (Gamon *et al.*, 1995). Por tanto, las dinámicas temporales vienen a ser muy similares, disminuyendo en los veranos secos y calurosos del mediterráneo y aumentando la cantidad de verdor durante el invierno y, especialmente, en primavera (figura 2).

Los resultados del cálculo de NDVI del dosel de las encinas a partir de las mediciones de espectro-radiometría de campo dieron un valor promedio de 0,70. Sin embargo los valores de NDVI del pasto mostraron diferencias pronunciadas entre el verano y el invierno, (0,23 -0,72, figura 2). Los valores de NDVI del ecosistema, que ponderan ambas coberturas, proporcionaron valores que fluctuaron entre 0,31 y 0,71 (figura 2), con un promedio anual de 0,51.

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

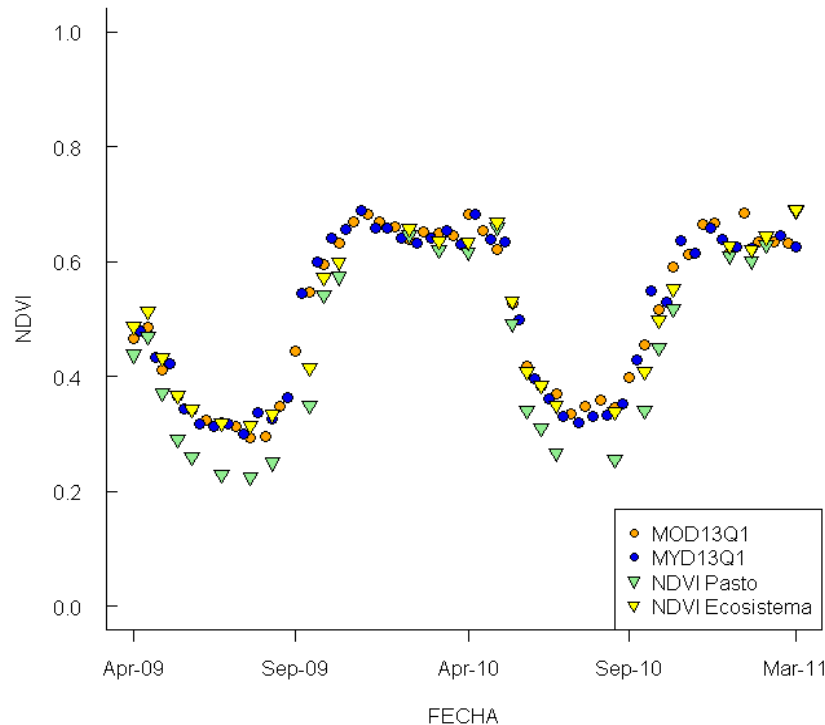


Figura 2. Dinámicas temporales de los productos del NDVI MODIS (MOD13Q1, MYD13Q1) y NDVI de radiometría de campo: sólo para pasto (NDVI Pasto) y ponderado (pasto + encina) (NDVI Ecosistema).

Debido a la alternancia entre los satélites TERRA y AQUA no es posible comparar los productos MOD y MYD entre sí. Las comparaciones se han realizado únicamente con los datos medidos en terreno, de los que 25 mediciones están solapadas con MOD13Q1 y tan sólo 6 con MYD13Q1. Para evitar resultados incoherentes por esta diferencia en el número de muestras, y debido a que sus valores y dinámicas son muy similares (figura 2), decidimos unir los valores de ambos satélites, creando una nueva variable combinada llamada NDVI MODIS (MOD13Q1 y MYD13Q1). Cuando comparamos directamente los valores de NDVI MODIS con los valores de NDVI medidos en terreno sobre las parcelas de pasto únicamente (NDVI Pasto), obtenemos un grado elevado de ajuste ($r^2=0,91$), aunque con una pendiente que marca infraestimación y una constante alejada de 0 ($m=0,74$, $b=0,16$), obteniendo un error absoluto y relativo de 0,07 y 14,8%, respectivamente. Esta estimación empeora para los meses de verano, produciendo un sesgo muy pronunciado ($RMSE= 0,09$, $RRMSE=26,8\%$), como se observa claramente en la figura 2.

Sin embargo, la diferencia entre los valores estimados y observados disminuye significativamente ($r^2=0,91$, $m=0,91$, $b=0,04$, $RMSE= 0,04$, $RRMSE=7,5\%$) (figura 3) cuando ponderamos el valor del NDVI para los diferentes estratos del ecosistema (pasto y arbolado), es decir, cuando usamos el valor calculado como NDVI Ecosistema (Ecuación 1). La reducción del

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

offset en verano entre NDVI Ecosistema y NDVI MODIS parece, por tanto, resultado del aporte de la encina al verdor detectado por el píxel MODIS (figura 2).

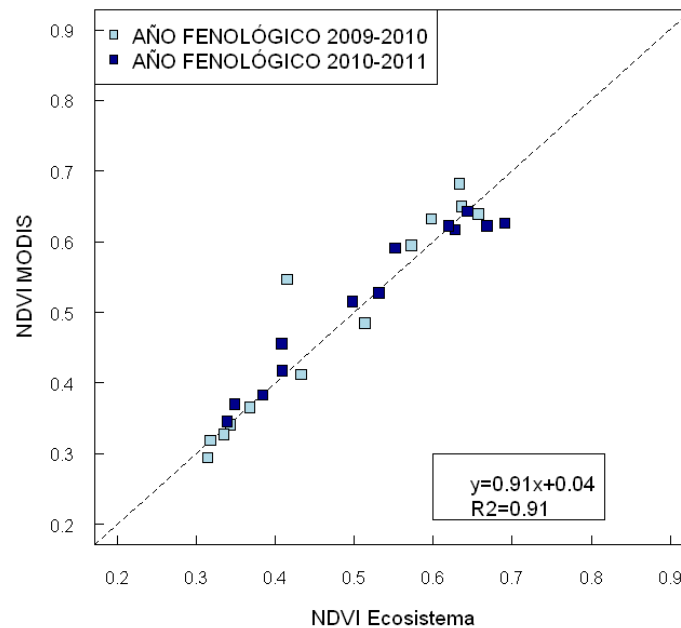


Figura 3. Comparación NDVI estimado por MODIS y NDVI medido en campo (NDVI Ecosistema).

De esta forma, se aprecia como la diversidad de estructuras en el ecosistema debe ser correctamente identificada y considerada en un eventual escalado espacial de la información de terreno, ya que, si bien en primavera la radiometría de pasto resulta representativa del valor recogido por el sensor dentro del píxel, durante los meses de verano, cuando el pasto permanece inactivo, el aporte de las encinas es fundamental. Por lo que podemos concluir que, para ecosistemas heterogéneos, tanto a nivel específico como estructural, parece imprescindible tener un muestreo representativo del ecosistema para realizar una correcta validación de los productos MODIS.

4.2. Comparación del LAI

Los resultados mostraron ciertas inconsistencias entre los productos de TERRA (MOD15A2) y de AQUA (MYD15A2) al compararlos con el dato de campo (LAI Ecosistema), presentando una desviación típica media de $0,07 \text{ m}^2/\text{m}^2$ y una diferencia máxima de $0,9 \text{ m}^2/\text{m}^2$ en la primavera de 2009 (figura 4). En base a este análisis se decidió utilizar el producto combinado de ambos satélites (MCD15A2) para los análisis posteriores.

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

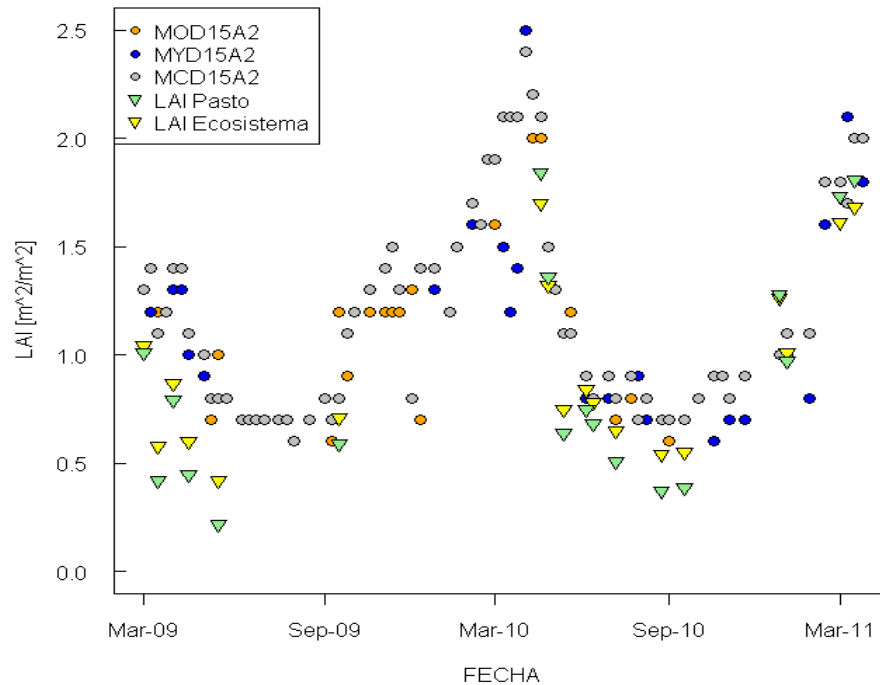


Figura 4. Dinámica temporal de los productos de LAI estimados (MOD15A2, MYD15A2, MCD15A2) y los observados mediante radiometría: sólo pasto (LAI Pasto) y pasto + encina ponderados (LAI Ecosistema).

El ecosistema de dehesa es un sistema mixto entre una pradera de flora anual y especies arbóreas de hoja perenne, por este motivo las dinámicas anuales de LAI son muy pronunciadas. El LAI promedio de las encinas, considerado constante, obtuvo un valor de $1,17 \text{ m}^2/\text{m}^2$, mientras que el LAI de pasto medido en terreno (LAI Pasto) fluctuó desde $0,22 \text{ m}^2/\text{m}^2$ hasta $1,84 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Combinando ambos para obtener el LAI Ecosistema (Ecuación 2) encontramos unos valores máximos próximos a $1,70 \text{ m}^2/\text{m}^2$ durante el invierno (figura 4), que contrastan con unos valores significativamente menores del índice durante la época estival ($0,42 \text{ m}^2/\text{m}^2$), muy similares a los observados en una cobertura vegetal estival en sabanas del Kalahari (Privette *et al.*, 2002). La figura 4 muestra la evolución temporal de cada uno de los productos MODIS (AQUA, TERRA y combinado), así como medidos en terreno (LAI Pasto y LAI Ecosistema). Definiendo el año fenológico como el periodo comprendido entre el 1 de abril y el 31 de marzo del año siguiente, observamos una sobreestimación del LAI en el año fenológico 2009, que mejora considerablemente en 2010.

Si comparamos los pares de valores entre el LAI Ecosistema y el LAI MODIS (MCD15A2) (figura 5) para todo el período de estudio, obtenemos un ajuste alto ($r^2=0,73$, $n=16$, $m=0,89$, $b=0,32$), pero con un errores elevados (RMSE=0,30, RRMSE=30,1%). Las estimaciones son peores

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

en el año fenológico 2009-2010 ($r^2=0,45$, $n=5$, $m=1,01$, $b=0,40$, $RMSE=0,44$, $RRMSE=68,7\%$) que para el año fenológico 2010-2011 ($r^2=0,87$, $n=11$, $m=1,05$, $b=0,08$, $RMSE=0,21$, $RRMSE=21,3\%$).

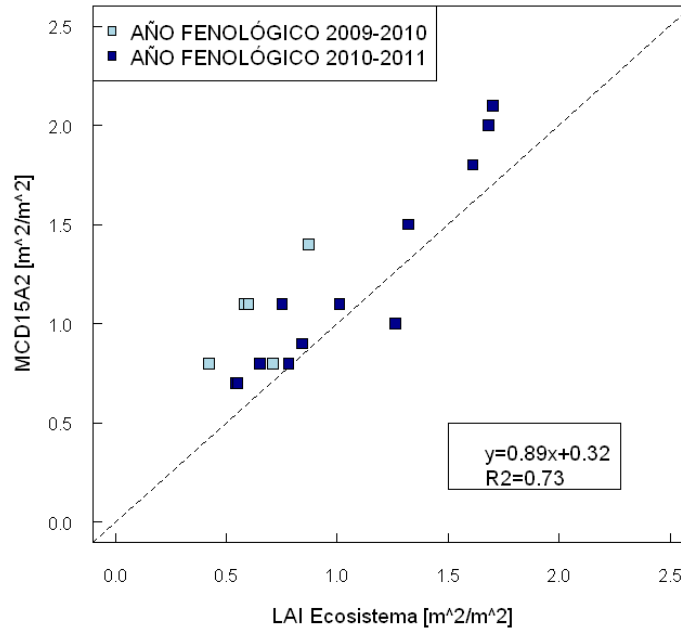


Figura 5. Comparación entre el LAI estimado de MODIS (MCD15A2) y el LAI medido en terreno (LAI Ecosistema).

4.3. Comparación de la Productividad Primaria Bruta (GPP).

En primer lugar comparamos las diferencias entre los productos estimados por los satélites TERRA y AQUA de MODIS ($r^2=0,98$, $m=1.0$ y $b=6E-05$). Debido a la alta correlación de ambos sensores, decidimos utilizar para la comparación con datos de terreno un valor promedio de ambos productos (MOD17A2 y MYD17A2). Dada la fenología de las praderas de pastos de flora anual que caracteriza la mayor parte de un ecosistema de dehesa, las mayores tasas de fijación de carbono se producen durante el período de crecimiento, centrado normalmente en los meses primaverales. Los productos GPP de MODIS indican que, especialmente durante la primavera del año 2010, se llegó a fijar por fotosíntesis $70\text{gC}/\text{m}^2$ desde el día 09/05/2010 hasta el día 16/05/2010. En cambio, encontramos un valor mínimo acumulado para un período de 8 días de $9\text{gC}/\text{m}^2$ a partir del 21 de agosto de 2009. Estos cambios intra-anales están, muy probablemente, relacionados con la disponibilidad de agua, factor limitante en estos ecosistemas mediterráneos. Durante los meses de febrero a mayo de 2010 la pluviometría llegó a 802 mm, mientras que desde mayo hasta agosto tan sólo se acumularon 104 mm.

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

Las dinámicas capturadas por la torre de flujos (GPP EC) y el balance estimado por los satélites TERRA y AQUA (GPP MODIS) se comparan en la figura 6. El análisis muestra como MODIS infraestima de manera muy significativa la fijación de carbono en el ecosistema de dehesa (ANOVA, $p=0,001$, $F=3,9$). Estas diferencias entre los pares de valores están dentro del rango 0,0001-0,0359, teniendo un valor promedio de 0,0111 kgC/m² cada 8 días. Las diferencias no son constantes, sino que están relacionadas positiva y directamente con la cantidad de flujo fijado ($r^2=0,78$), es decir, las mayores desviaciones entre los datos estimados y observados en campo se producen en las épocas de mayor fijación de carbono.

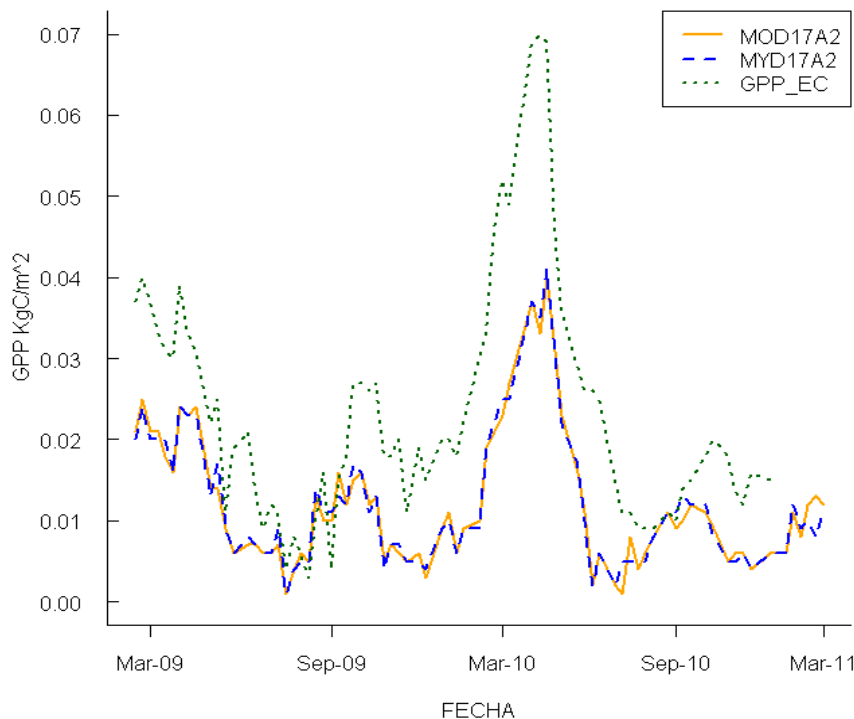


Figura 6. Dinámicas temporales de Productividad Primaria Bruta estimada por MODIS (MOD17A21, MYD17A2) y el medido en campo (GPP_EC)

Finalmente, comparamos los pares de valores en una gráfica de dispersión desde el 1 de abril de 2009 hasta el 31 diciembre de 2010, obteniendo un elevado ajuste de los datos ($r^2=0,79$) y un interceptor cercano a 0 ($b=0,0004$), aunque con una pendiente muy alejada de 1 ($m=0,51$), lo que marca una infraestimación de alrededor del 50% para el total de datos analizados, con altos errores ($n=67$, $RMSE=0,01$, $RRMSE=59,5\%$). A pesar de que faltan los datos de los tres últimos meses para completar la serie analizada de dos años, podemos observar un mejor ajuste en el año fenológico 2010-2011, aunque con un mayor error relativo ($r^2=0,86$, $n=26$, $RMSE=0,02$, $RRMSE=61,7\%$) que en el año fenológico 2009-2010 ($r^2=0,67$, $n=41$, $RMSE=0,01$, $RRMSE=56,8\%$) (figura 7).

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

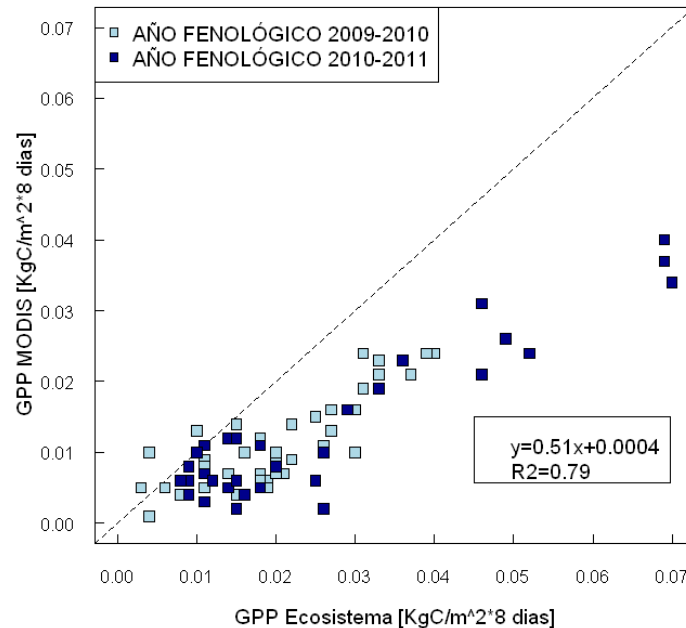


Figura 7. Comparación GPP estimado por MODIS y GPP medido por la torre de flujos EC.

Estas diferencias de ajuste entre años no son debidas a cambios en los algoritmos, ya que ambos corresponden a la versión 5.1. El problema podría ir en la línea de los factores que limitan la productividad primaria en los ecosistemas, como es la disponibilidad hídrica. Durante el año 2009 la pluviometría fue menor que para el año 2010, por lo que al estar los errores positiva y directamente relacionados con la fijación de carbono en los ecosistemas, 2009 presenta un error relativo menor que 2010. Pero por otro lado, debido a esa diferencia de pluviometría, las dinámicas se ven mejor representadas en el año 2010 que en el 2009, año para el que existe un mayor desajuste entre los pares de valores de MODIS y los datos del terreno.

5. Conclusiones

Los resultados muestran que ecosistemas mediterráneos presentan problemas para una adecuada estimación de parámetros biofísicos pues son biomas complejos estructuralmente y heterogéneos en su composición específica, presentando, en el caso de la dehesa, dos capas con diferentes dinámicas estacionales (pasto y arbolado).

Los compuestos MODIS más simples derivados como productos de primer nivel desde la reflectividad de la superficie, como es NDVI, muestran buenos ajustes en su estimación comparada con los datos de terreno. Aunque la diversidad de estructuras en el ecosistema debe ser correctamente identificada y considerada en un eventual escalado espacial de la información de

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

terreno. Mientras en primavera la radiometría de pasto resulta representativa del valor recogido por el sensor dentro del píxel, durante los meses de verano el único aporte de verdor en el ecosistema es el proveniente del arbolado. Por tanto, en ecosistemas complejos parece imprescindible tener una caracterización representativa del espacio para poder realizar una correcta interpretación de los productos MODIS.

Los compuestos más complejos evaluados, como MOD-MYD15 y MOD-MYD17, presentan desajustes más importantes debidos, posiblemente, a la acumulación de errores en los datos auxiliares que intervienen en su cálculo.

Como se puede ver en el caso del LAI, las diferencias en las estimaciones obtenidas por los satélites TERRA y AQUA son grandes. En este caso, la utilización del producto combinado MCD15 dota de mayor estabilidad a las dinámicas y reduce el *offset* de las estimaciones.

El año hidrológico con mayor pluviometría (2010-2011) presentó mejores ajustes estadísticos para los productos LAI y GPP de MODIS. Posiblemente, la escasez hídrica sea un factor que limite la correcta estimación de productos de segundo y tercer nivel de variables biofísicas globales de MODIS.

Por último, podemos observar una fuerte infraestimación de GPP en los productos MOD-MYD17A2 en este ecosistema. Como indican otros trabajos, este producto es uno de los más complejos elaborados a partir de este sensor. Se necesitan de muchos insumos en sus algoritmos, entre los que se encuentra el LAI, lo que puede producir una acumulación de errores importantes, cuando dichos insumos están mal estimados, y deriva en un fuerte sesgo entre la productividad primaria pronosticada y la observada. Aunque este producto se presenta con un estadio de validación 3, idóneo para su uso en publicaciones científicas, no parece ser suficientemente óptimo en ecosistemas mediterráneos, por lo que pensamos que es necesario abordar un mayor esfuerzo de validación en estos biomas para poder otorgarles a dichos productos de validez global.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos Biospec (CGL2008-02301/CLI) y Fluxpec (CGL2012-34383) y por el CSIC a través del programa JAE-TEC. Queremos expresar nuestro agradecimiento a todo el personal de los grupos del CCHS, INIA, CEAM, Universidad de Alcalá y Universidad de Zaragoza que han participado en el proyecto BIOSPEC por su valiosa contribución, tanto en los muestreos de campo como en el análisis y procesado de imágenes.

Referencias bibliográficas

Aubinet, M. ; Grelle, A. ; Ibrom, A. ; Rannik, U. ; Moncrieff, J. *et al.* (2000): "Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology", *Advances in Ecological Research*, 30, pp. 113–175.

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

Baldocchi, D. (2003): "Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future", *Global Change Biology*, 9, pp. 479-492

Baret, F.; Weiss, M.; Moreno, J. *et al.* (2006): "Report on the validation of Vegetation products derived from MERIS", ESA Contract AO/1-4233/02/I-LG.

Chen, M.; Zhuang, Q.; Cook, D.R.; Pekour, M.; Scott, R.L.; Munger, J.W. y Bible, K. (2011): "Quantification of terrestrial ecosystem carbon dynamics in the conterminous United States combining a process-based biogeochemical model and MODIS and AmeriFlux data", *Biogeosciences*, 8, pp. 2665-2688.

Cheng, Y.; Gamon, J.A.; Fuentes, D.A.; Mao, Z.Y.; Sims, D.A.; Qui H.L. *et al.* (2006): "A multi-scale analysis of dynamic optical signals in a Southern California chaparral ecosystem: a comparison of Field, AVIRIS and MODIS data", *Remote Sensing of Environment*, 103, 3, pp. 369-378.

Cheng, Y.-B.; Zarco-Tejada, P.J., Riaño, D.; Rueda, C.A. y Ustin S.L. (2006): "Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes", *Remote Sensing of Environment*, 105, pp. 354-366.

Cohen W.B.; Maiespergen, T.K.; Turner, D.P.; Ritts W.D.; Pflugmacher, D.; Kennedy, R.E., Kirschbaum, A.; Running, S.W.; Costa, M. y Gower, S.T. (2006): "MODIS Land Cover and LAI Collection 4 Product Quality Across Nine Sites in the Western Hemisphere", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 7, pp.1843-1857.

Gamon, J.A.; Field, C.B.; Goulden, M.L.; Griffin, K.L.; Hartley, A.E.; Joel, G.; Peñuelas, J. y Valentini, R. (1995): "Relationships between NDVI, canopy, structure and photosynthesis in three californian vegetation types", *Ecological Applications*, 5, pp. 28-41.

Gokhale, B. y Weber, K.T. (2010): "Correlation between MODIS LAI, GPP, PsnNet, and FPAR and Vegetation Characteristics of Three Sagebrush-Steppe Sites in Southeastern Idaho", K. T. Weber and K. Davis (Eds.), Final Report: Forecasting Rangeland Condition with GIS in Southeastern Idaho (NNG06GD82G), 189, pp. 75-86.

Hill, M.J.; Senarath, U.; Lee, A.; Zeppel, M.; Nightingale, J.M.; Williams, R.D.J. y McVicar, T.R., (2006): "Assessment of the MODIS LAI product for Australian ecosystems", *Remote Sensing of Environment*, 101, 4, pp. 495-518.

Klaassen, R.H.G.; Strandberg, R.; Hake, M.; Olofsson, P.; Tottrup, A.P. y Alerstam, T. (2010): "Loop migration in adult marsh harriers *Circus aeruginosus*, as revealed by satellite telemetry", *Journal Avian Biology*, 41, pp. 200-207.

López Saldaña, G.; Colditz, R.; Cruz López, M.I.; Ressler, R. y Mas, J.F. (2011): "Herramientas para el análisis de los datos de MODIS", en Mas, J. F. (2011): *Aplicaciones del Sensor MODIS para el Monitoreo del Territorio*, México, pp. 71-93.

Lloret, F.; Lobo, A.; Estevan, H. *et al.* (2007): "Woody plant richness and NDVI response to drought events in Catalanian (Notheastern Spain) forests", *Ecology*, 88, pp. 2270-2279.

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

Lu, X. y Zhuang, Q. (2010): "Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data", *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 1924–1939.

Moffat, A.M.; Papale, D. *et al.* (2007): "Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes", *Agricultural and Forest Meteorology*, 147, pp. 209–232.

NASA, 2010. <http://science.nasa.gov/earth-science/earth-science-data/data-maturity-levels>

NASA, 2012. http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl

Olea, L. y San Miguel-Ayanz, A. (2006): "The Spanish dehesa. A traditional Mediterranean silvopastoral system linking production and nature conservation", *21st General Meeting of the European Grassland Federation*. Badajoz (Spain).

Papale, D.; Reichstein, M.; Aubinet, M.; Canfora, E.; Bernhofer, C.; Kutsch, W.; Longdoz, B.; Rambal, S.; Valentini, R.; Vesala, T. y Yakir, D. (2006): "Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation", *Biogeosciences*, 3, pp. 571–583.

Pettorelli, N.; Ryan, S.; Mueller, T.; Bunnefeld, N.; Jędrzejewska, B.; Lima, M. y Kausrud, K. (2011): "The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology", *Climate Research*, 46, pp. 15-27.

Pisek, J. y Chen, J. M. (2007): "Comparison and validation of MODIS and VEGETATION global LAI products over four BigFoot sites in North America", *Remote Sensing of Environment*, 109, pp. 81–94.

Privette, J.L.; Myneni, R.B.; Knyazikhin, Y.; Mukelabai, M.; Roberts, G.; Tian, Y.; Wang, Y. y Leblanc, S.G. (2002): "Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari", *Remote Sensing of Environment*, 83, 1–2, pp. 232–243.

Reichstein, M.; Katterer, T.; Andren, O.; Ciais, P.; Schulze, E.D.; Cramer, W. y Valentini, R. (2005): "Does the temperature sensitivity of decomposition vary with soil carbon pools or quality?", *Biogeosciences Discuss*, 2, pp. 737–747.

Richter, K.; Atzberger, C.; Hank, T. y Mauser, W. (2012): "Derivation of biophysical variables from Earth Observation data: validation and statistical measures", *Journal of Applied Remote Sensing*, 6, 1, pp. 063557-1 - 063557-23.

Roy, D.P.; Borak, J.S.; Devadiga, S.; Wolfe, R.E.; Zheng, M. y Descloitres, J. (2002): "The MODIS Land Quality Assessment Approach", *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 62–76.

San Miguel, A. (1994): "La dehesa española. Origen, tipología, características y gestión", *Fundación Conde del Valle de Salazar*, Madrid (Spain), pp. 96.

Sea, W.B.; Choler, P.; Weinmann, R.A.; Beringer, J.; Hutley, L.B. y Leuning, R. (2011): "Documenting improvement in leaf area index estimates from MODIS using hemispherical photos for Australian savannas", *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, pp. 1453–1461.

Durá Candela, E., Mendiguren González, G., Pacheco Labrador, J., Martín Isabel, M. P., Riaño, D., Iturrate García, M., Gimeno Cólera, C., Carrara, A. (2013): "Validación de productos MODIS relacionados con la estimación de flujos de carbono en un ecosistema de dehesa", *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 291-310. ISSN: 1578-5157

Shen, H. F.; Zeng, C. y Zhang, L. P. (2011): "Recovering reflectance and radiance of AQUA MODIS band 6 based on within-class local fitting", *Journal of Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4, pp.185–192.

Turner, D.P.; Ritts, W.D.; Cohen, W.B.; Gower, S.T.; Running, S.W.; Zhao, M.; Costa, M.H.; Kirschbaum, A.; Ham, J.; Saleska, S. y Ahl, D.E. (2006a) "Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes", *Remote Sensing of Environment*, 102, pp.282-292.

Turner, D.P.; Ritts, W.D.; Zhao, M.; Kurc, S.A.; Dunn, A.L.; Wofsy, S.C.; Small, E.E. y Running, S.W. (2006b): "Assessing interannual variation in MODIS-based estimates of gross primary production", *IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing*, 44, pp.1899-1907.

Verger, A.; Camacho-de Coca, F. y Meliá, J. (2007): "Análisis comparativo de métodos pragmáticos y modelos físicos para la estimación del LAI a escala global", XII Congreso AET. 19-21 Sept 2007. Mar del Plata (Argentina). pp. 347-354. (ISBN: 978-987-543-126-3).

Wang, R.; Zeng, C.; Li, P. y Shen, H.F. (2011): "Terra MODIS band 5 Stripe noise detection and correction using MAP-based algorithm", *International Conference on Remote Sensing, Environment, and Transportation Engineering (RSETE 2011)*, 24-26 Jun. 2011. Nanjing, China, pp. 8612 – 8615

Waring, R.H.; Coops, N.C.; Fan, W. y Nightingale, J.M. (2006): "MODIS enhanced vegetation index predicts tree species richness across forested ecoregions in the contiguous U.S.A", *Remote Sensing of Environment*, 103, 2, pp.218–226.

Xiao, J.; Zhuang, Q.; Baldocchi, D.D.; Law, B.E.; Richardson, A.D.; Chen, J. *et al.* (2008): "Estimation of net ecosystem carbon exchange for the conterminous United States by combining MODIS and AmeriFlux data", *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, pp. 1827–1847.

Yang, Y.H.; Fang, J.Y.; Pan, Y.D. y Ji, C.J. (2009): "Aboveground biomass in Tibetan grasslands", *Journal of Arid Environments*, 73, pp. 91–95.

Zhang, Y.; Yu, Q.; Jiang, J.I.E. y Tang, Y. (2008): "Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau", *Global Change Biology*, 14, pp. 757–767.

Zhao, M.; Heinsch, F.A.; Nemani, R.R. y Running, S.W. (2005): "Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global dataset", *Remote Sensing of Environment*, 95, pp. 164–176.