

# Implicaciones del filtrado de calidad del índice de vegetación EVI para el seguimiento funcional de ecosistemas

Reyes-Díez, A.<sup>\*1</sup>, Alcaraz-Segura, D.<sup>2</sup>, Cabello-Piñar, J.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG). Universidad de Almería. España.

<sup>2</sup>Departamento de Botánica. Universidad de Granada. España.

<sup>3</sup>Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería. España.

---

**Resumen:** El seguimiento de los ecosistemas con imágenes procedentes del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, espectroradiómetro de imágenes de resolución media) está actualmente muy extendido tanto en tareas de investigación como de gestión. Los índices de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, índice de vegetación de la diferencia normalizada) y EVI (*Enhanced Vegetation Index*, índice de vegetación mejorado) son ampliamente usados para la caracterización del funcionamiento ecosistémico. Ambos índices se emplean como estimadores lineales de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fAPAR), el principal control de la producción primaria. A pesar de sus ventajas, las imágenes de índices de vegetación no están libres de errores. El producto índices de vegetación MOD13Q1 proporciona una capa QA (*Quality assessment*, evaluación de la calidad) que informa sobre la calidad asociada a cada píxel. Esta información representa una gran ventaja para el usuario, al permitir filtrar aquellos datos que puedan inducir a errores al verse alterados por la presencia de aerosoles, nubes, nieve o sombras. Sin embargo, la realización de un filtrado homogéneo a lo largo de una gran región puede ocasionar la pérdida sistemática de información en determinadas zonas o épocas del año, introduciendo así un sesgo espacial o en la serie temporal. Esta situación puede ser especialmente crítica en regiones con alta heterogeneidad ambiental, como el Sureste Ibérico. En este trabajo evaluamos el efecto que el filtrado de calidad tiene sobre la información espacial y temporal de la base de datos del EVI en el periodo 2001-2010. Los resultados, expresados en porcentaje de información perdida (filtrada) y como efecto de estas pérdidas sobre los valores del EVI, indican que mientras que las áreas de menor altitud no se ven afectadas por el filtrado, las regiones de alta montaña muestran variaciones significativas en sus valores del EVI cuando son filtrados por aerosoles, sombras o la presencia de hielo o nieve. Esto pone de manifiesto la importancia del establecimiento de un protocolo para el procesamiento de la información que considere las características espaciales y temporales de los datos a filtrar.

**Palabras clave:** Clave: MODIS, EVI, Índices de vegetación, QA, Análisis de la calidad, Seguimiento funcional de ecosistemas.

## Implications of quality filtering of Enhanced Vegetation Index (EVI) for ecosystem functioning monitoring

**Abstract:** The use of MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) images for ecosystem monitoring is currently widespread both in research and management. Vegetation indexes (VIs), such as NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) and EVI (*Enhanced Vegetation Index*), are broadly extended for monitoring ecosystem functioning. These indexes are linear estimators of the fraction of photosynthetically active radiation intercepted by vegetation (fAPAR), the main control of net primary production. However, VIs are subject to errors. To handle such errors, the

\* Autor para la correspondencia: [ard243@ual.es](mailto:ard243@ual.es)

MOD13Q1 VI product includes a Quality Assessment (QA) layer with information about pixel quality. This QA layer represents a great advantage for final users, allowing filtering of pixels with VI values influenced by aerosols, clouds, snow, or shadows. However, the use of homogeneous filtering criteria throughout a heterogeneous region may cause the systematic loss of information in particular areas or times of the year. In this paper, we assessed the effect of different filtering criteria on spatiotemporal data of EVI for the period 2001-2010 in the Iberian Southeast. Our results showed no effect of filtering on EVI availability and magnitude values in low altitudes, but strong and significant differences in the mountains depending on the filter applied: aerosol, shadows or snow filters. Such effects of filtering on the EVI revealed that monitoring programs in these regions should include a filtering step before exploring for abrupt changes or long-term trends in the EVI time series.

**Key words:** MODIS, EVI, vegetation Index, QA, quality assessment, monitoring ecosystem functioning.

## 1. Introducción

Los programas de seguimiento son esenciales para determinar el estado de los ecosistemas, monitorear sus cambios, y evaluar la eficacia de las tareas de gestión y conservación. El uso de una herramienta como la teledetección para este fin ofrece dos grandes grupos de aplicaciones (Turner *et al.*, 2003). Por un lado, la generación de mapas de coberturas y usos del suelo relacionados con la composición y estructura de los ecosistemas como la presencia, abundancia y distribución de especies o comunidades, y su evolución en el tiempo (Kerr y Ostrovsky, 2003). Por otro lado, la estimación de variables biofísicas que permiten el seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas (Sellers *et al.*, 1992; Paruelo *et al.*, 2000; Piñeiro *et al.*, 2006; Requena-Mullor *et al.*, 2014).

El seguimiento del funcionamiento de ecosistemas, es decir, de los diferentes aspectos del intercambio de materia y energía entre la biota y la atmósfera (Cabello *et al.*, 2012), presenta importantes ventajas frente a los métodos basados en atributos estructurales. Primero, ofrece una respuesta más rápida ante las perturbaciones y cambios ambientales que la composición o estructura de la vegetación; y esta inercia estructural podría retrasar la detección de perturbaciones (Milchunas y Laurenroth, 1995; Wiegand *et al.*, 2004). Segundo, las variables descriptoras del funcionamiento ecosistémico (atributos funcionales), permiten la caracterización cualitativa y cuantitativa de los servicios ecosistémicos (Costanza *et al.*, 1997). Tercero, los atributos funcionales son más fácilmente estimables mediante teledetección que las características estructurales usando protocolos comunes a lo largo del tiempo, a distintas escalas y entre distintas regiones (Foley *et al.*, 2007). Por último, el análisis combinado de los atributos

funcionales es usado para identificar los tipos funcionales de ecosistemas, los cuales permiten caracterizar el comportamiento de los ecosistemas a escala regional (Alcaraz-Segura *et al.*, 2006; Paruelo *et al.*, 2001).

De las diferentes variables biofísicas que se pueden estimar mediante teledetección (por ejemplo, albedo, temperatura superficial, evapotranspiración, etc.), la producción primaria constituye uno de los descriptores más integradores del funcionamiento de los ecosistemas (McNaughton *et al.*, 1989; Virginia *et al.*, 2001). Los índices espectrales de vegetación (IVs), como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada) o el EVI (*Enhanced Vegetation Index*, Índice de Vegetación Mejorado) están directamente relacionados con la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (Huete *et al.*, 2002), el principal control de la producción primaria (Monteith y Moss, 1977). Estos índices se basan en el contraste entre la elevada absorción de la radiación visible (especialmente la roja) que realizan las clorofilas durante la fotosíntesis, y la elevada reflexión de la radiación infrarroja cercana motivada por la estructura celular del parénquima esponjoso de las hojas.

Sin embargo, la teledetección de la producción primaria presenta algunas limitaciones. Los niveles radiométricos y los índices de vegetación se ven alterados por factores atmosféricos (ozono, aerosoles, vapor de agua, y nubes principalmente) y por la presencia de nieve o sombras en superficie. Resulta muy importante conocer y tener en cuenta estos efectos, sobre todo en estudios multitemporales y en el seguimiento de parámetros biofísicos, para no confundir los posibles cambios en las condiciones atmosféricas con cambios en la

vegetación (Chuvieco, 2010). Por ejemplo, en un sistema de seguimiento y alerta basado en teledetección, una variación en los datos podría suponer una falsa alerta que ponga en guardia a los gestores o, por el contrario, podría enmascarar cambios reales en la vegetación supongan una amenaza para el ecosistema bajo seguimiento. Por ello, el procesamiento de series temporales de imágenes de satélite requiere un conocimiento profundo de cómo afectan estos factores y la consideración explícita de cómo varía e influye la calidad de los datos (Justice *et al.*, 2002).

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo de absorción electromagnética, llegando a imposibilitar la observación de la superficie terrestre en determinadas longitudes de onda y permitiendo sólo aquellas que se encuentran en las llamadas ventanas atmosféricas. Aun así, las ventanas atmosféricas no quedan totalmente libres de los procesos de absorción y dispersión atmosférica de los gases como el ozono (afecta en la región del espectro entre 0 y 0,3  $\mu\text{m}$ ), los aerosoles (afectan principalmente en la región del espectro visible) y el vapor de agua (afecta de forma intensa en la región de 6  $\mu\text{m}$ , y por encima de los 27  $\mu\text{m}$ ), que originan alteraciones en las reflectancias usadas para el cálculo de índices espectrales. Otros aspectos, como la geometría del sensor respecto del sol y de la superficie terrestre también influyen en los índices de vegetación. Por ejemplo, Morton *et al.*, (2014) muestran como el aparente aumento en el verdor del bosque amazónico en período seco observado con datos satelitales no es real, sino que se corresponde con una alteración en la geometría sensor-sol. La deriva satelital (alteraciones que experimenta la órbita del satélite debido a diversos factores como atracciones gravitacionales, la asimetría terrestre o fricción atmosférica) también cambia esta geometría y ha dado lugar a extensos debates sobre la existencia real o no de tendencias significativas en los registros de NDVI tras corregir el impacto de la deriva (Alcaraz-Segura *et al.*, 2010).

Para poder minimizar los efectos que estas fuentes de incertidumbre puedan tener sobre los índices de vegetación, los productos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, espectroradiómetro de imágenes de resolución media) incluyen una capa QA (*Quality Assessment*, evaluación de la calidad) con nueve indicadores

de calidad a nivel de píxel (Huete *et al.*, 1999) (Descripción de los indicadores en sección 2.3). Sin embargo, la complejidad de los mismos hace que frecuentemente no se utilicen. A continuación presentamos una revisión de los trabajos que tienen en cuenta explícitamente las consecuencias de aplicar la información de calidad. La búsqueda fue realizada en Scopus en Junio de 2014. El 50% de aproximadamente 35 trabajos encontrados sólo utiliza la información del *Usefulness Index* (Índice de utilidad), un indicador sintético sobre la calidad de los datos más fácil de utilizar (e.g. Alexandridis *et al.*, 2008; Beck *et al.*, 2007; Colditz *et al.*, 2006; Giner *et al.*, 2012; Gu *et al.*, 2009; Hess *et al.*, 2009; Jacquin *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2008; Reinart *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2005). El problema que plantea este índice es que no permite conocer cuál es el origen de la incertidumbre en la calidad final de los datos. El resto de trabajos (e.g.; Myneni *et al.*, 2002; Huete *et al.*, 2006; Cabello *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013; De Abelleira y Verón, 2014; Requena-Mullor *et al.*, 2014) sí emplean los aspectos concretos que afectan a la calidad (e.g. nubes, aerosoles, sombras, nieve, etc.). El empleo del resto de indicadores concretos de calidad proporciona un mayor control sobre qué factores ambientales están relacionados con la pérdida de calidad. Algunos trabajos muestran cómo filtrar los IVs en función de unos criterios u otros puede dar lugar a obtener distintos resultados, ya que no todos los factores ambientales afectan igual ni en el mismo sentido (Poulter y Cramer, 2009). Numerosos trabajos (e.g. Hess *et al.*, 2009; Colditz *et al.*, 2006, Reinart *et al.*, 2008) advierten que aplicar un filtrado muy restrictivo conlleva una proporción de píxeles eliminados muy alta, lo que puede sesgar la información hacia determinadas épocas del año o regiones de la imagen. Dozier *et al.* (2008) también advierten que existen errores de omisión y de comisión, por ejemplo al confundir nubes de poco espesor con nieve.

El control del efecto relativo que tiene la calidad de los píxeles en las imágenes del MOD13Q1 (producto que incluye información sobre los IVs) es particularmente importante en áreas extensas o con alta heterogeneidad ambiental, en las que diferentes indicadores cobran importancia en distintas regiones de la imagen (e.g. Beck *et al.*, 2007). Geográficamente, las investigaciones revisadas se ubican en áreas muy diversas y generalmente se

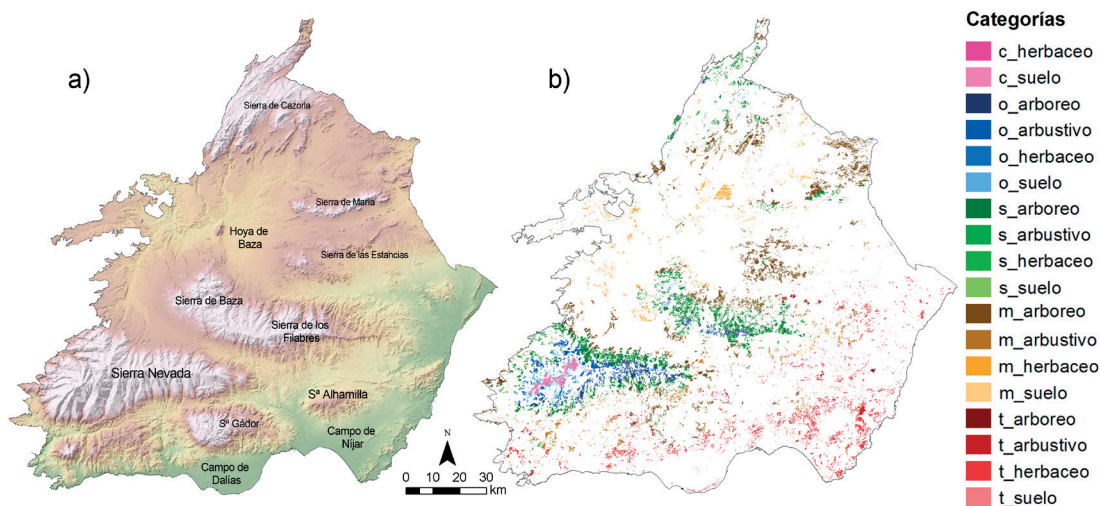
centran en el indicador de calidad que más afecta según las condiciones ambientales locales. Por ejemplo, el efecto de las nubes ha sido ampliamente estudiado en las regiones tropicales como la Amazonía (Hess *et al.*, 2009, Huete *et al.*, 2006, Poulter *et al.*, 2010), Ghana y Costa de Marfil (Colditz *et al.*, 2006), la sabana de Madagascar (Jacquin *et al.*, 2010). El efecto de la nieve se ha estudiado en la alta montaña (Dozier *et al.*, 2008) o el norte de Europa (Beck *et al.*, 2007, Reinart *et al.*, 2008, Wang *et al.*, 2005). Otros trabajos combinan varios indicadores como en áreas con cultivos en Estados Unidos (Zhao *et al.*, 2010) o en la meseta china (Li *et al.*, 2008).

El objetivo de este trabajo es explorar el efecto que tienen los diferentes filtros de calidad sobre la serie temporal del EVI (producto MOD13Q1) y sobre los atributos funcionales derivados. Se usó el EVI debido a sus ventajas frente al NDVI (Gao *et al.*, 2000; Huete *et al.*, 2002): presenta mayor fiabilidad en situaciones de alta biomasa, incluye un factor de ajuste de la influencia del fondo de dosel "L", minimiza la influencia de la atmósfera mediante la incorporación de la banda del azul y responde mejor ante cambios estructurales en la vegetación. Como resultado, se identificaron las áreas, pisos bioclimáticos, coberturas y épocas del año que requieren los diferentes tipos de filtrado para el SE Ibérico, una región con una gran heterogeneidad ambiental.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Área de estudio y diseño del muestreo

El estudio se realizó en el SE ibérico (Figura 1a) (provincias de Almería, Granada y Jaén). Esta región muestra un gran rango altitudinal (de 0 a 3482 msnm), lo que conlleva un amplio gradiente de condiciones ambientales. Debido a su variabilidad climática (precipitación anual entre 140-1500 mm, temperatura media anual entre 4-19°C), su heterogeneidad paisajística y su historia evolutiva, en el SE ibérico se da lugar una gran diversidad de especies vegetales y animales. La región se revela como muy vulnerable ante los efectos del cambio global (Giorgi y Lionello, 2008; IPCC, 2013) ya que es un área de transición entre regiones áridas y secas y zonas más húmedas (Europa central) por lo que es muy sensible a los procesos de desertificación. Además, se prevé una pérdida continua de vegetación natural debido a la expansión agrícola (Piquer-Rodríguez *et al.*, 2012). Dada la importancia ecológica de la región y las presiones a las que se somete, se están llevando a cabo distintos esfuerzos para la generación a largo plazo de conocimiento científico. Buenos ejemplos son la presencia del Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada (<http://www.obsnev.es>) en el programa LTER (*Long Term Ecological*



**Figura 1.** a) Área de estudio (SE Ibérico) b) diferentes pisos bioclimáticos y tipos de cobertura usados en el análisis. Los prefijos de las categorías indican el piso bioclimático: c, Crioromediterráneo; o, Oromediterráneo, s, Supramediterráneo; m, Mesomediterráneo; t, Termomediterráneo. Para la interpretación de los colores consultar edición digital disponible en <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3316>.

*Research*, investigación ecológica a largo plazo) y la reciente incorporación del Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG, <http://www.caescg.org/>) como plataforma LTSER, que además del conocimiento ecológico integra factores socio-económicos.

Se diseñó un muestreo a lo largo del gradiente altitudinal y sobre distintos tipos estructurales de vegetación. Usamos el mapa de vegetación de Andalucía (escala 1:10000, años 1996-2006) intersectado por una rejilla con píxeles del mismo tamaño que los píxeles de las imágenes de EVI, para identificar píxeles puros correspondientes a cada tipo de vegetación. Establecimos 17 categorías basadas en tipos estructurales de vegetación y pisos bioclimáticos. Los pisos bioclimáticos se definen como cada uno de los diferentes espacios que se suceden en el gradiente altitudinal, y que están delimitados en función de los factores climáticos cambiantes (Rivas-Martínez, 1983). En el área de estudio, perteneciente a la región mediterránea, se establecen los pisos (de menor a mayor altitud) termomediterráneo, mesomediterráneo, supramediterráneo, oromediterráneo y criomediterráneo. Todos los tipos estructurales de vegetación se encontraron en todos los pisos bioclimáticos, excepto en el criomediterráneo, en el que sólo pudimos distinguir suelo desnudo, formado en este piso por roquedos con presencia de vegetación altamente especializada.

Seleccionamos todos los píxeles con más de un 70% de su superficie ocupada por una mismo tipo de vegetación en la fase de muestreo. Identificamos un total de 11410 píxeles con una distribución desigual en las categorías (Tabla 1). Los pisos bioclimáticos con más píxeles fueron el mesomediterráneo y el supramediterráneo (de los que más de 70% son píxeles de cobertura arbórea),

ocupando más de la mitad de los píxeles del estudio. El tipo de vegetación con más píxeles fue el arbóreo, y el que menos, el herbáceo. El 78% de los píxeles de suelo se encuentran en el piso criomediterráneo (100% de sus píxeles son de suelo) y el oromediterráneo.

## 2.2. El producto MOD13Q1

El análisis se basó en el compuesto de 16 días del EVI del producto MOD13Q1 de la colección 005 (empezó a generarse en el año 2000, y se ha ido agrupando en diversas colecciones, cada una con mejoras y resoluciones de errores). El MOD13Q1 pertenece al grupo de productos MODIS de seguimiento de vegetación y aporta información sobre esta a través de los índices de vegetación (IVs). Está generado a partir del producto diario L2G (nivel 2G) de reflectancia de la superficie. Las observaciones diarias se aglutinan en compuestos de 16 días mediante la técnica MVC (*Maximum Value Composite*, compuesto de valor máximo), que mantiene como válido el máximo valor registrado dentro de un intervalo de tiempo concreto con el objetivo de minimizar el efecto de las nubes y conseguir la máxima calidad y representatividad del período de 16 días (Solano *et al.*, 2010). La resolución espacial es de 231,66 m aproximadamente, aunque en la documentación referente al producto y en el nombre de las bandas se indica 250 m como aproximación. Contiene 12 capas de datos, incluyendo las capas de NDVI y EVI, así como una capa con información sobre calidad. Esta capa, contiene información codificada en binario de 16 bits por píxel. Estos *QA bits* aportan información a distintos niveles de detalle y sobre varios aspectos: los primeros 2 bits son comunes a todos los productos MODIS, muestran 4 niveles que indican si el IV se ha producido con

**Tabla 1.** Número de píxeles puros (>70% de pureza) de 231×231 metros aproximadamente del producto MOD13Q1 para el EVI en cada cobertura y piso bioclimático del SE Ibérico.

Cobertura	Piso Bioclimático					Total
	termo	meso	supra	oro	crioro	
Suelo desnudo	148	27	53	186	648	1062
Herbácea	435	332	29	39	0	835
Arbustiva	453	489	195	876	0	2013
Arbórea	161	3116	3553	670	0	7500
Total	1197	3964	3830	1771	648	11410

buena calidad, o con incertidumbre por la presencia de nubes u otras razones, o no se ha calculado por la mala calidad del píxel. El segundo grupo es el “Índice de Utilidad” (*Usefulness Index*), un resumen más detallado de la calidad del píxel, que expresa la calidad general del píxel en niveles de calidad decreciente. Los siguientes 4 bits informan sobre si se han aplicado o no correcciones atmosféricas: cantidad de aerosoles, nubes adyacentes y corrección BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Factor*, factor de distribución de reflectividad bidireccional). Con la etiqueta nubes adyacentes se marcan aquellos píxeles en los que alguno de los píxeles colindantes es nuboso, o probablemente nuboso. El 6º campo (bit nº10) indica si hay presencia de nubes mixtas: para el cálculo de los IV, se usan las bandas roja y NIR (originalmente 231,66 metros aproximadamente de resolución espacial), que deben agregarse a 500 m antes del cálculo. Si alguno de los píxeles que forman el agregado de 500 m tenía presencia de nubes, se indicará como positivo para la presencia de nubes mixtas. Los bits 11, 12 y 13 se usan para las máscaras de agua o tierra, ya que los IV no se calculan para las clases de aguas oceánicas o aguas continentales (si se calculan para otros cuerpos de agua más someros) cuando se indica que el píxel es una superficie de agua. Los 2 últimos píxeles indican la posible existencia de nieve y/o hielo y sombras (Solano et al., 2010).

Para el filtrado usamos los bits referidos a: 1) Aerosoles 2) Nubes 3) Sombras y 4) Hielo, ya que son elementos con una alta variabilidad dentro de la región de estudio. Para aerosoles se usaron 2 niveles de intensidad en el filtrado: AERle1, que filtra los píxeles etiquetados como de altas y medias concentraciones (filtrado estricto) y AERle2, que filtra solo las concentraciones altas (filtrado moderado). Se aplicaron 2 filtros referentes a la presencia de nubes: adyacentes (ADJCLDeq0) y mixtas (MXDCLDeq0). El filtro de sombras se llamó SHAeq0 y el de hielo ICEeq0. El nombre de los filtros hace referencia a la nomenclatura usada en el *script* de filtrado y refleja el estado de cada aspecto a filtrar (activado o desactivado, o la intensidad en el caso de los aerosoles).

### 2.3. Filtrado de datos MOD13Q1 con la capa QA

Filtramos aquellos píxeles con una calidad inferior a la requerida mediante un *script* escrito en IDL (*Interactive Data Language*, lenguaje de datos interactivo) desarrollado por el grupo de investigación de Ecología de Zonas Áridas de la Universidad de Almería en colaboración con el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección de la Universidad de Buenos Aires y el grupo de Ecología de Carnívoros de la Estación Biológica de Doñana –CSIC-. El *script* recorre píxel a píxel la banda del EVI de MOD13Q1 leyendo la capa QA y realizando la operación indicada por el usuario: los píxeles en los que no se cumplen los requisitos de calidad exigidos, el valor del EVI es transformado, bien a valor del EVI “0” o a NAN (*Not a Number*, no es un número o “valor perdido”). El criterio utilizado fue: se transformaron en NaN aquellos píxeles afectados por: 1) aerosoles; 2) nubes (ambos afectan a la relación rojo-infrarrojo, reduciendo los valores del EVI), 3) sombras (reducen EVI); es decir, AERle1, AERle2, ADJCLDeq0, MXDCLDeq0 y SHAeq0 debido a que no es posible conocer la intensidad del efecto que tienen sobre los IV. Además, se transformó en valor 0 aquel píxel identificado por el filtro ICEeq0, dado que un píxel cubierto de hielo/nieve no contiene vegetación con actividad fotosintética. El *script* ofrece un resultado añadido, en forma de imagen que muestra la cantidad de compuestos que se han “perdido” en el proceso de filtrado al no cumplir los requisitos de calidad. Para el filtro ICEeq0 no hay pérdida sino una transformación del valor del EVI a 0. Además, la información sobre la cantidad de compuestos perdidos sirve para identificar áreas afectadas por el aspecto filtrado (e.g. zonas con alta contaminación por aerosoles) (Zhou et al., 2014) reflejando dónde puede ser útil un tipo de filtrado u otro.

### 2.4. Caracterización del funcionamiento de los ecosistemas a partir del producto MOD13Q1

Para analizar el efecto del filtrado sobre la dinámica estacional del EVI, calculamos una serie de descriptores del funcionamiento ecosistémico pre y post-filtrado: 1) la dinámica anual media del EVI, es decir, el comportamiento anual del EVI

promedio de todo el periodo de estudio (en adelante, curva de año medio), además de una curva de año medio sin filtrar, 2) a partir de la curva de año medio, se calcularon los atributos funcionales como integradores del funcionamiento de los ecosistemas (Oyonarte *et al.*, 2010): la media anual del EVI (EVI medio), un buen estimador de la fAPAR anual y por lo tanto de la PPN (Tucker y Sellers, 1986); los valores máximo (MAX) y mínimo (MIN) del EVI, relacionados con la capacidad fotosintética máxima y mínima de los ecosistemas, así como las fechas de este máximo (MMAX) y del mínimo (MMIN), relacionadas con los momentos de máxima y mínima actividad fotosintética (Hoare y Frost 2004; Lloyd 1990) y el coeficiente de variación intraanual EVI-CV (sCV), como descriptor de la estacionalidad en las ganancias de carbono por parte de la vegetación (Paruelo *et al.*, 1995) y los flujos de carbono (Potter y Brooks 1998; Alcaraz-Segura *et al.*, 2009). Los atributos relacionados con la fenología (MMAX y MMIN) a pesar de que fueron calculados, quedaron fuera de los análisis posteriores.

### 3. Resultados

#### 3.1. Efecto del filtrado de calidad sobre la serie temporal de MOD13Q1 2001-2010

La información sobre pérdida de fechas representa la cantidad de compuestos MVC de EVI que no cumplieron los requisitos de calidad exigidos por cada filtro. En el caso del filtro de nieve (ICEeq0), las pérdidas hacen referencia a la cantidad de compuestos en los que el valor del EVI fue transformado a cero.

La cantidad de información de baja calidad eliminada de la serie temporal 2001-2010 varió significativamente según el filtro que se aplicó (Tabla 2). En promedio para toda el área de estudio la presencia de aerosoles en concentraciones medias y altas (AERle1, 12%) y de sombras (SHAeq0, 11%) ocasionaron las mayores pérdidas de información. Al eliminar sólo aquellos valores con concentraciones altas de aerosoles (AERle2), la cantidad de compuestos eliminados no llegó al 1,5%. La presencia

**Tabla 2.** Porcentaje de compuestos MOD13Q1 de 16 días que se perdieron en el período 2001-2010 al filtrar los valores del EVI con baja calidad por pisos bioclimáticos, cobertura y tipo de filtro aplicado.

Categorías		Filtro					
Cobertura	Piso bioclimático	AERle1	AERle2	ADJCLDeq0	MXDCLDeq0	ICEeq0	SHAeq0
Arbórea	Termomediterráneo	8	0	0	0	0	1
	Mesomediterráneo	6	0	0	0	0	4
	Supramediterráneo	11	1	0	0	2	12
	Oromediterráneo	18	3	0	0	8	14
Arbustiva	Termomediterráneo	7	0	0	0	0	0
	Mesomediterráneo	4	0	0	0	0	2
	Supramediterráneo	10	1	0	0	1	12
	Oromediterráneo	22	3	0	1	12	30
Herbácea	Termomediterráneo	7	0	0	0	0	1
	Mesomediterráneo	19	1	0	0	0	3
	Supramediterráneo	17	2	0	1	1	11
	Oromediterráneo	20	2	0	1	11	29
Suelo desnudo	Termomediterráneo	12	3	0	0	0	1
	Mesomediterráneo	17	3	0	1	1	9
	Supramediterráneo	25	2	0	0	0	5
	Oromediterráneo	27	3	0	1	13	33
	Crioromediterráneo	31	3	0	0	13	33

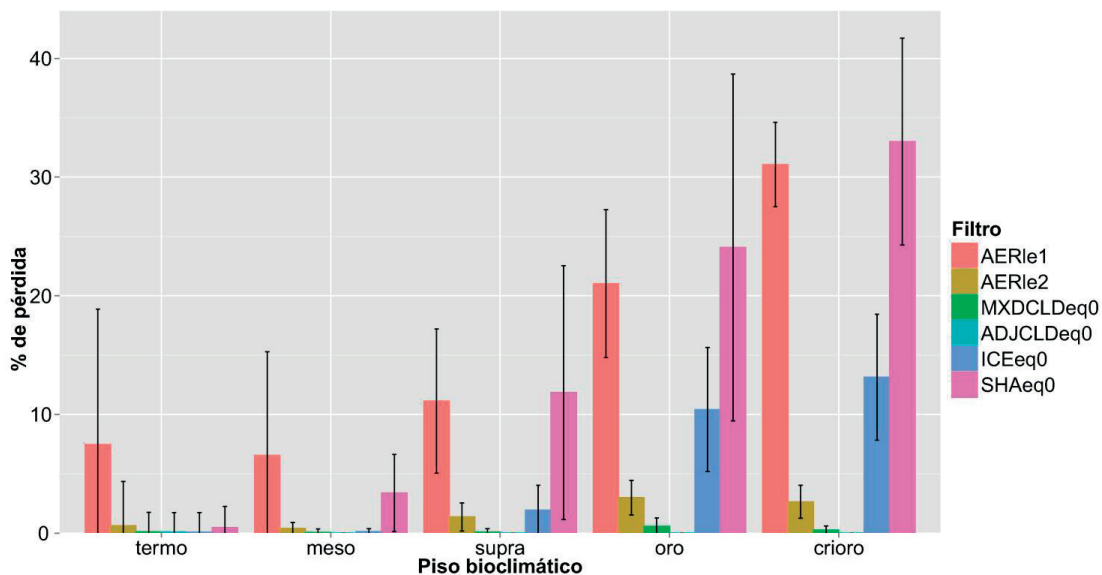
AERle1: contenido medio-alto de aerosoles; AERle2: contenido alto en aerosoles; MXDCLDeq0: presencia de nubes mixtas; ADJCLDeq0: presencia de nubes adyacentes; ICEeq0: presencia de hielo o nieve; SHAeq0: presencia de sombras.

de hielo o nieve (ICEeq0) afectó al 3% de las fechas disponibles del EVI en promedio para el área de estudio y la presencia de nubes (adyacentes o mixtas) a menos del 1% de las fechas.

La pérdida de compuestos con baja calidad en la serie temporal aumentó con la altitud de forma general para todos los filtros, especialmente para los filtros de nieve y sombras (Figura 2). Desde el piso termomediterráneo, situado al nivel del mar, hasta el criomediterráneo, correspondiente a las cimas de Sierra Nevada (>2800 msnm), el porcentaje de pérdida máximo pasó del 7% a más del 30% (Tabla 2). Los filtros de alto contenido en aerosoles, y de nubes mixtas y adyacentes mostraron los porcentajes más bajos de pérdidas, menores al 3% para nubes adyacentes. El filtrado de nieve o hielo provocó pérdidas principalmente en los pisos oromediterráneo y criomediterráneo y en las coberturas de suelo desnudo, herbáceas y arbustos.

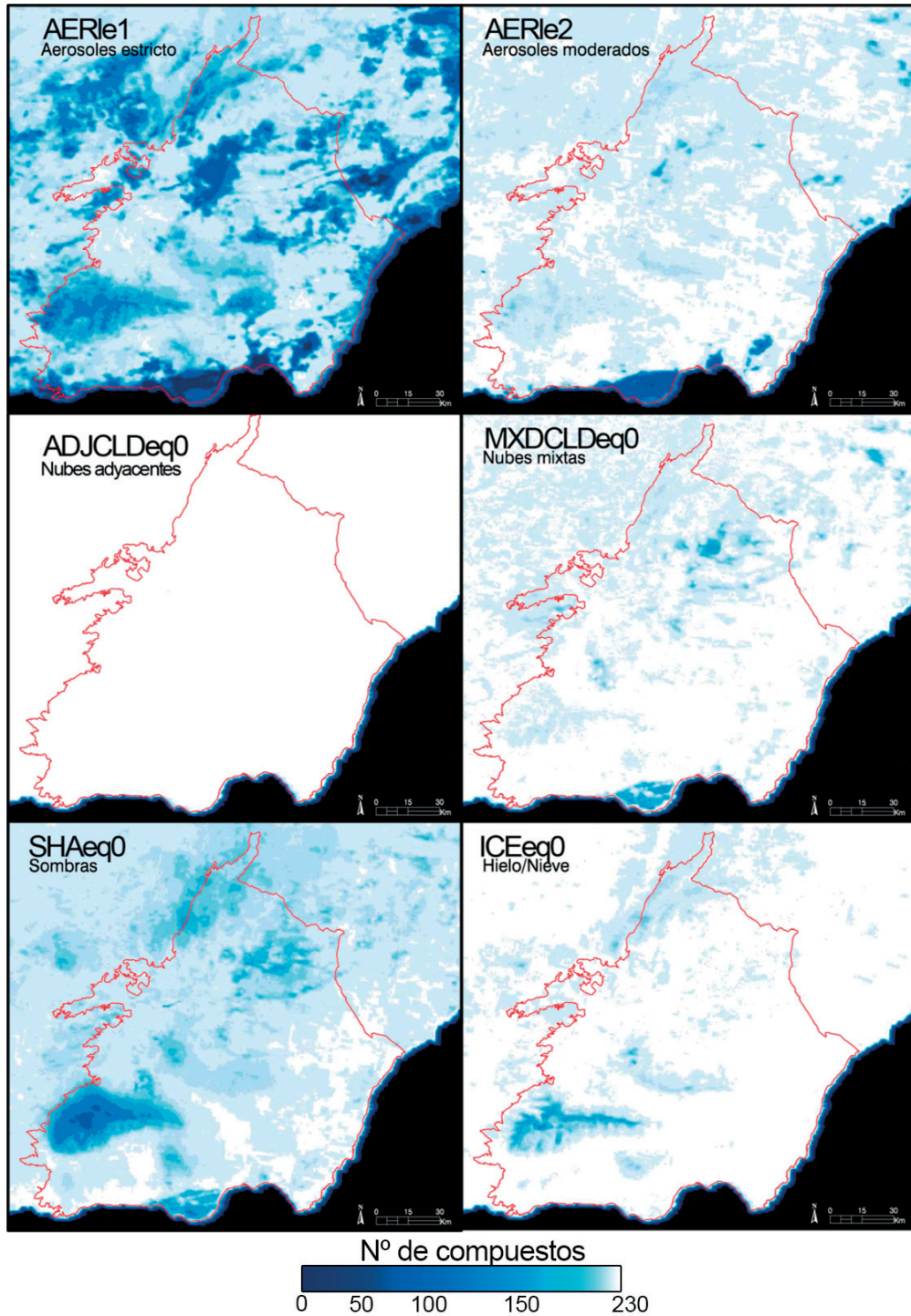
La Figura 3 muestra la distribución espacial de las pérdidas de compuestos tras el filtrado de toda la serie temporal, informando sobre el número de compuestos disponibles en cada píxel del área de estudio post-filtrado. Se identificó un patrón de concentración de pérdidas en las llanuras litorales (Campo de

Dalias, en la región más meridional del área de estudio y al oeste de la Bahía de Almería) y en zonas montañosas (Sierra Nevada (SN), y en menor medida las Sierras de Orce de María y de los Filabres). Se identificó una gran zona de pérdidas intensas en el área del Embalse del Negratín (cercano a Hoya de Baza) para la imagen de AERle1 que aparece de nuevo de forma menos intensa en AERle2. Para AERle1, las pérdidas se repartieron por todo el área de estudio, las de mayor intensidad ligadas a accidentes geográficos, sobre todo a las cadenas montañosas. Las imágenes filtradas con ADJCLDeq0 y MXDCLDeq0 reflejan la poca influencia de los filtros referentes a las nubes: MXDCLDeq0 generó pérdidas de muy baja intensidad a lo largo del área de estudio y una pequeña región de mayor cantidad de pérdidas en torno a la Sierra de Orce; ADJCLDeq0 no provoca ninguna pérdida apreciable. La imagen filtrada con SHAEq0 mostró una distribución homogénea de pérdidas moderadas, con mayores pérdidas en las zonas montañosas, especialmente en Sierra Nevada. Las pérdidas al filtrar con ICEeq0 se concentraron en regiones altas como Sierra Nevada, Sierra de los Filabres y de Gádor en la mitad sur del área de estudio, y en la parte más al sur de la Sierra de Cazorla y de Segura.

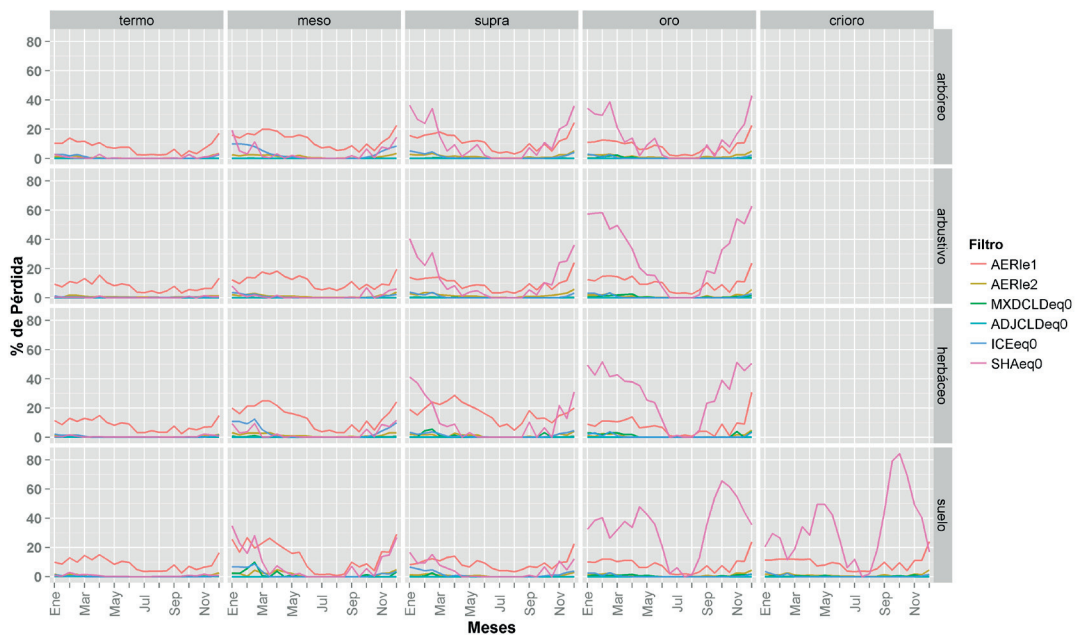


**Figura 2.** Aumento con la altitud del porcentaje de compuestos MOD13Q1 de 16 días perdidos al filtrar por baja calidad provocado por los distintos filtros en cada piso bioclimático del área de estudio (SE Ibérico) en el período (2001-2010). Las barras de error muestran la desviación estándar espacial. Ver Tabla 2 para abreviaturas de filtros. Para la interpretación de los colores consultar edición digital disponible en <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3316>.





**Figura 3.** Diferencias en la distribución espacial e intensidad de las pérdidas entre los distintos filtros. Se muestra la cantidad de compuestos MOD13Q1 disponibles para el período 2001-2010 (230 compuestos) tras el filtrado.



**Figura 4.** Diferencias a lo largo del año en el porcentaje de compuestos MOD13Q1 perdidos en el período 2001-2010 al aplicar los diferentes filtros de calidad en los distintos pisos bioclimáticos. Ver Tabla 2 para abreviaturas de filtros. Para la interpretación de los colores consultar edición digital disponible en <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3316>.

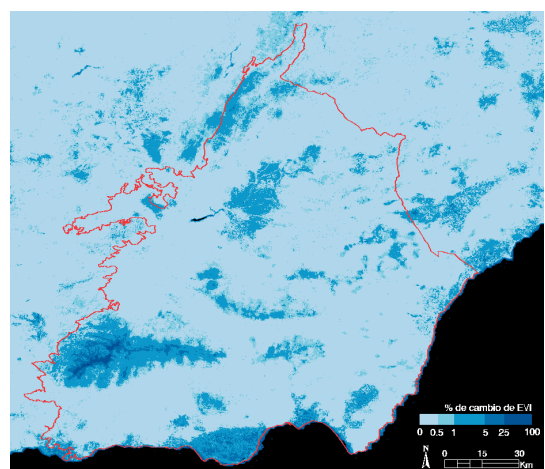
El otoño, el invierno y la primavera mostraron las mayores pérdidas de compuestos, mientras que durante el verano disminuyeron fuertemente (Figura 4). Para AERle1, las pérdidas fueron similares a lo largo del gradiente altitudinal y de las coberturas, si bien se hace visible un aumento en las fechas finales del invierno y comienzos de primavera para los pisos intermedios (meso y supramediterráneo), especialmente para la cobertura herbácea. El filtro SHAEq0 provocó unas diferencias entre el verano y el resto de fechas muy acusadas, esencialmente en los pisos altos (40-60% en el oro y crioromediterráneo, y superiores al 80% en compuestos del otoño). El resto de filtros provocaron pérdidas que no superan el 10% en ninguna categoría y sólo en los primeros compuestos del año.

### 3.2. Efecto del filtrado de calidad sobre el índice de vegetación EVI.

#### 3.2.1. Estabilidad del EVI frente a los distintos filtros.

Analizamos cuánto se vio modificado el EVI de cada píxel al filtrar con cualquiera de los filtros y su distribución espacial (Figura 5). Las áreas con EVI menos estable ante los filtros se concentraron

en zonas de relieve como sierras y cadenas montañosas, además de la zona de llanuras litorales del Campo de Dalías, Campo de Níjar y desembocadura del río Almanzora. En las áreas con un relieve importante, la estabilidad disminuyó al



**Figura 5.** Cambios relativos (%) en el EVI en función de los diferentes filtros de calidad aplicados. Las áreas claras indican un EVI estable (cambio <0,5%) independientemente del filtro que se emplee, mientras que las oscuras indican un valor del EVI sensible al filtrado.

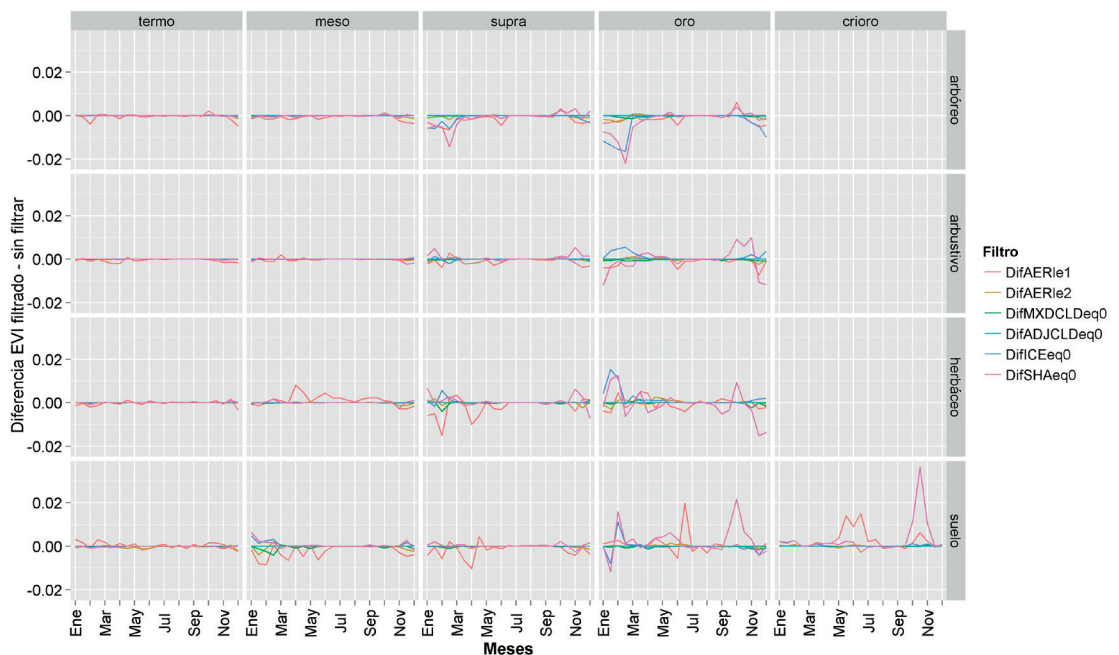
umentar la altitud, dando lugar a áreas concéntricas de cambio creciente del EVI. Se establecieron 5 grupos de cambio ante los filtros, que varían desde la estabilidad interfiltro total (0-0,5% de variación) a un cambio del EVI superior al 25%. En el 74% del área de estudio no se observa variación del EVI, Una ligera modificación de entre un 0,5 y 1% en el IV se aprecia en un 10% del área de estudio. Cambios entre el 1 y 5% aparecen en el 13,5% del área, mientras que variaciones entre un 5 y 25% ocurren solamente en 1,8% de la superficie. Modificaciones del EVI superiores al 25% se encuentran únicamente en un 0,25% de la superficie, concentrada sobretudo en el piso altitudinal crioromediterráneo, en las regiones más altas de Sierra Nevada.

### 3.2.2. Efecto del filtrado sobre la caracterización del funcionamiento de los ecosistemas.

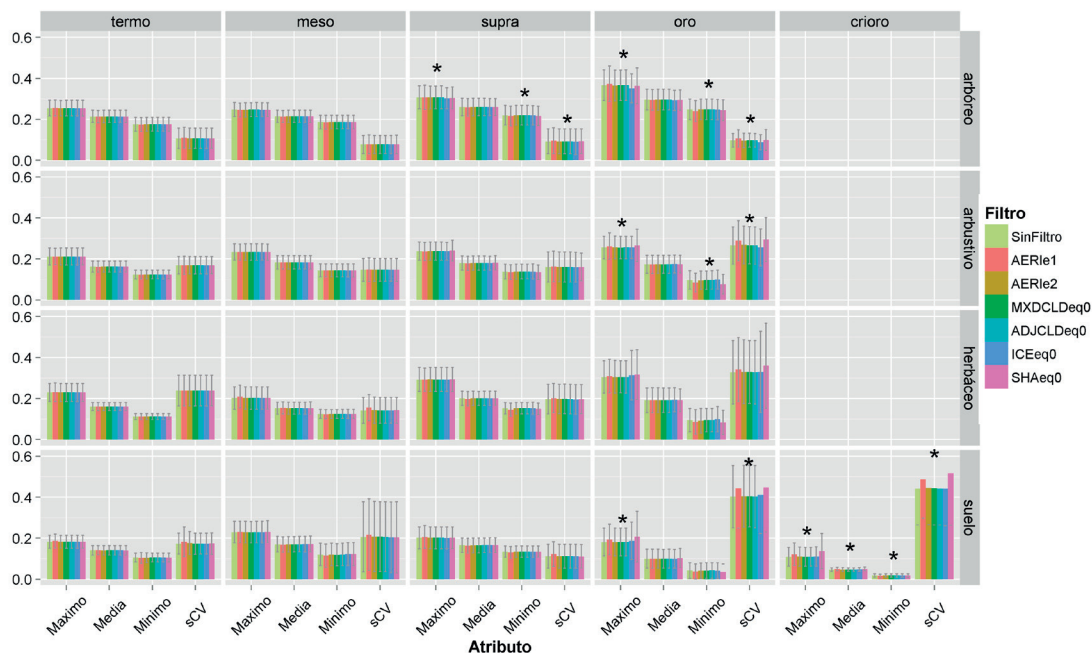
La curva de año medio del EVI se vio alterada en distinto grado en función del filtro aplicado (Figura 6). La mayor diferencia de carácter positivo (EVI filtrado fue mayor que EVI sin filtrar) fue 0,035 (SHAeq0) y la de carácter negativo fue

ligeramente superior 0,02 (SHAeq0). El efecto del filtrado comenzó en el piso supramediterráneo, haciéndose más evidente en los pisos superiores (oromediterráneo y crioromediterráneo). Las variaciones se situaron al final del otoño, invierno y comienzo de la primavera en las coberturas vegetales; apareciendo además en las primeras fechas del verano en la cobertura de suelo desnudo.

El efecto de los filtros sobre el EVI varió en función de dos aspectos: altitud, o piso bioclimático; y tipo de cobertura vegetal. En los dos pisos más bajos, termomediterráneo y mesomediterráneo y las cuatro coberturas, se obtuvieron diferencias máximas de 0,01 (AERle1). En el supramediterráneo, el filtro AERle1, que disminuyó el EVI en las coberturas herbácea y de suelo, apenas tuvo efecto en las coberturas arbustiva y arbórea. Sin embargo, para la cobertura arbórea si apareció una disminución del EVI en los primeros compuestos del año medio provocada por el filtro SHAeq0. El EVI en el piso oromediterráneo mostró unos efectos ante el filtrado más intensos. El filtro ICEeq0 mostró un efecto diferenciado en la cobertura arbórea, en la que disminuye el EVI entre



**Figura 6.** Diferencias de las curvas estacionales del EVI resultantes de los filtrados con respecto a la curva sin filtrar (EVI filtrado – EVI sin filtrar). Diferencias positivas representan disminuciones provocadas por el aspecto filtrado. Diferencias negativas representan aumentos del EVI provocados por el aspecto filtrado. Ver Tabla 2 para abreviaturas de filtros. Para la interpretación de los colores consultar edición digital disponible en <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3316>.



**Figura 7.** Diferencias en los atributos funcionales del EVI entre los distintos filtros y el valor sin filtrar. Las líneas de error representan la desviación estándar espacial. Los asteriscos (\*) indican diferencias significativas entre los atributos funcionales usando EVI filtrado frente a EVI sin filtrar. Ver tabla 2 para abreviaturas de filtros. Para la interpretación de los colores consultar edición digital disponible en <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3316>.

0,01 y 0,015 durante el invierno, mientras que en el resto de coberturas, apareció un aumento del EVI. Del mismo modo, el filtro SHAeq0 provocó una disminución del EVI durante el invierno y un aumento corto durante el otoño en las coberturas arbórea y arbustiva. En el crioromediterráneo los filtros AERle1 y SHAeq0 tuvieron un efecto más intenso, aumentando el EVI durante el verano entre 0,1 y 0,15 puntos el primero y provocando un gran aumento del EVI durante el otoño el segundo.

La influencia de la calidad de los píxeles del SE ibérico sobre los atributos funcionales fue baja en áreas de poca altitud, pero afectó a las áreas más altas (Figura 7). El filtrado tuvo efectos casi nulos en los pisos mesomediterráneo y termomediterráneo. A partir del supramediterráneo los atributos mostraron cierta variabilidad provocada por el filtrado. Los datos filtrados presentaron diferencias significativas con respecto a los datos sin filtrar en los pisos supramediterráneo para la cobertura arbórea, oromediterráneo y crioromediterráneo para todas las coberturas excepto la herbácea (Tabla 3). El test post hoc Tukey HSD

(una vez identificada la existencia de diferencias en las medias, el test Tukey HSD determina entre qué medias existe diferencia), encontró diferencias del EVI significativas ( $p < 0,05$ ) al filtrar con AERle1, ICEeq0 y SHAeq0 en los pisos supra, oro y crioromediterráneo. El sCv fue el atributo más modificado por los filtros. La mayor diferencia entre un atributo filtrado y sin filtrar estuvo provocada por SHAeq0 en crioromediterráneo en suelo desnudo y aumentó la variación estacional (sCv) en un 17%. El filtro SHAeq0, seguido por AERle1, tendieron a aumentar el valor máximo del EVI y a reducir el mínimo derivando en un aumento del sCv a partir del supramediterráneo. La media, no se vio tan afectada por los filtrados. El filtro de hielo/nieve tiene un efecto diferente al resto, dependiente del tipo de cobertura: disminución de los atributos en coberturas de mayor porte (arbustos y árboles) y aumento en la cobertura herbácea y de suelo.

**Tabla 3.** Combinaciones de piso bioclimático, cobertura y atributos funcionales del EVI en las que el filtrado produjo diferencias significativas en el valor del atributo resultante.

Piso Bioclimático	Cobertura	Atributo	df	F	p-valor
Crioromediterráneo	Suelo	Media	6	13,978	0,000
		Máximo	6	25,567	0,000
		Mínimo	6	4,471	0,000
		sCv	6	16,038	0,000
Oromediterráneo	Arbórea	Máximo	6	4,779	0,000
		Mínimo	6	3,017	0,006
		sCv	6	12,701	0,000
	Arbustiva	Máximo	6	4,554	0,000
		Mínimo	6	28,212	0,000
		sCv	6	19,791	0,000
	Suelo	Máximo	6	2,739	0,012
		sCv	6	2,431	0,024
Supramediterráneo	Arbórea	Máximo	6	3,056	0,005
		Mínimo	6	4,463	0,000
		sCv	6	2,494	0,021

sCv, coeficiente de variación estacional; df, grados de libertad.

## 4. Discusión

### 4.1. Implicaciones del filtrado por calidad sobre la cantidad de información disponible

La variabilidad espacial de la pérdida de información del índice de vegetación EVI al aplicar los filtros de calidad del producto MOD13Q1 se vio afectada por la heterogeneidad geográfica del área de estudio. En cuanto a la variabilidad temporal, la pérdida de información al aplicar los filtros de calidad (Figura 3) estuvo condicionada por la estacionalidad de los factores filtrados (aerosoles, nieve, sombras), siendo en general mayor en el invierno que en el verano.

La presencia de sombras (SHAeq0) fue el filtro con mayor variación intraanual de pérdidas de compuestos. El aumento de pérdidas durante las fechas cercanas al invierno y la ausencia de pérdidas durante el verano se explica por el menor ángulo de incidencia del sol durante el invierno. Espacialmente, la mayor magnitud de pérdidas ocurrió en los pisos más altos debido al relieve más abrupto que da lugar a una mayor cantidad de áreas con sombra. Las pérdidas ocasionadas por el filtro de aerosoles (AERle1) en la primavera se relacionan con los principales aportes de partículas

provenientes de las masas de aire de origen africano (Querol *et al.*, 2004). Sin embargo, los aportes importantes de aerosoles durante el verano (Querol *et al.*, 2004) no quedan reflejados en un aumento importante en el porcentaje de pérdidas generadas por el filtro AERle1. Filtrar las nubes (mixtas o adyacentes) en el SE ibérico no influyó en la cantidad de información disponible tras el filtrado, ya que los compuestos de MOD13Q1 de 16 días, logran imágenes casi libres de nubes en todas las épocas del año y regiones del área de estudio. No obstante, los filtros referentes a nubes no deben descartarse en otras regiones, ya que la técnica MVC y la información sobre la calidad no consiguen compuestos libres de nubes en algunas regiones del planeta con mayor persistencia de la nubosidad (Ali *et al.*, 2013).

Los filtros aplicados a la serie temporal del EVI no ocasionan pérdidas de compuestos que imposibiliten el posterior uso del producto MOD13Q1, si bien el filtrado de las sombras en alta montaña requieren especial atención. El número de píxeles sin valor del EVI y el tamaño del hueco, es decir la cantidad de compuestos consecutivos eliminados para un píxel, son aspectos críticos durante la fase de interpolado en series temporales (Colditz *et al.*, 2006) o del cálculo de pendiente para tendencias de series temporales (Cabello *et al.*, 2012).

## 4.2. Implicaciones del filtrado por calidad sobre los valores del EVI y atributos derivados

Las variaciones en la magnitud de la curva de año medio y de los atributos funcionales del EVI debidas al filtrado no estuvieron directamente relacionadas con los patrones espaciales y temporales del porcentaje de pérdidas de compuestos. Una gran cantidad de compuestos afectados (eliminados o substituidos por ceros) no siempre conllevó una variación significativa del EVI.

Nuestros resultados también revelaron la importancia crítica de tener en cuenta explícitamente el filtrado por calidad de los datos de índices de vegetación, especialmente si la calidad de los datos es baja. Por ejemplo, la máxima diferencia observada en el SE ibérico entre valores filtrados y sin filtrar en el año medio del EVI fue de 0,035. Esta diferencia puede parecer pequeña si se compara con otros trabajos en los que se aplica el filtrado QA donde reportan diferencias entre 0,1 y 0,2 en NDVI (Colditz *et al.*, 2006, Poulter y Cramer, 2009). Sin embargo, una variación del EVI de 0,035 es un orden de magnitud superior al de las tendencias identificadas por Cabello *et al.* (2012) en 10 años en la misma zona de estudio, inferiores a 0,003 unidades del EVI al año (0,03 unidades del EVI entre 2001 y 2010).

La media anual del EVI resultó ser un atributo bastante estable ante los distintos filtros de calidad, lo que la convierte en el indicador más robusto para evaluar cambios abruptos o tendencias de largo plazo en el funcionamiento ecosistémico en regiones con baja calidad de los datos.

El efecto del filtrado sobre los valores de la curva estacional del EVI varió fuertemente con la altitud entre pisos bioclimáticos. En el supramediterráneo encontramos diferencias entre el EVI filtrado y sin filtrar aproximadamente 2,5 veces mayores que las tendencias de -0,005 unidades del EVI por año detectadas entre 2001 y 2009 en primavera para los robledales supramediterráneos de Sierra Nevada (Dionisio *et al.*, 2012). El cambio detectado con las tendencias puede no estar ocurriendo realmente, si no ser un resultado de la baja calidad de los datos.

Los efectos del filtrado sobre la curva estacional del EVI variaron además en función del filtro

aplicado (Figura 6). Las alteraciones provocadas por los aerosoles coinciden con los aportes masivos de aerosoles saharianos en altitudes elevadas durante el verano. Los aerosoles tienen un efecto significativo sobre los índices de vegetación: dispersan la radiación electromagnética, reduciendo el contraste entre las reflectancias del rojo e infrarrojo cercano y, en consecuencia, disminuyendo los valores del EVI (Prasad *et al.*, 2006, Fraser y Kaufman, 1985, Huete *et al.*, 1999). Durante el verano, los aerosoles provocan un descenso del EVI en los pisos oro y crioromediterráneo. Este hecho se corresponde con los aportes estivales de aerosoles de origen africano (Querol *et al.*, 2004) que son transportados a alturas entre 1500 y 4000 metros de altitud (Talbot *et al.* 1986) y explica que el macizo de Sierra Nevada reciba una gran cantidad de aerosoles saharianos (Morales-Baquero *et al.*, 2001). Las áreas de sombra experimentan un descenso en las reflectancias y suponen una reducción de los valores de los índices de vegetación (Chen *et al.*, 2005). Esta disminución del EVI que producen las sombras explicaría las reducciones observadas a grandes altitudes de la estacionalidad y del máximo del EVI. Por tanto, filtrar o no la información afectada por sombras, especialmente de fechas invernales y áreas elevadas o con relieve abrupto, afecta significativamente a los resultados y conclusiones derivadas del análisis de los índices de vegetación.

Filtrar los píxeles con nieve o hielo tiene efectos diferentes en función del porte de la cobertura. Al contrario que los árboles, los arbustos, herbazales y el suelo desnudo pueden quedar totalmente cubiertos por nieve, lo que provoca en la imagen sin filtrar valores negativos. Dada la relación lineal EVI-producción primaria, los valores negativos del EVI no pueden ser interpretados como productividad negativa. Para evitar esto, los valores negativos del EVI son normalmente transformados en cero, ya que con temperaturas que rondan los 0°C la producción primaria es casi nula. Esto es debido a que la fotosíntesis de las plantas es sensible a las bajas temperaturas, existiendo un límite de temperatura mínima que varía en función de las características de la vegetación, pero que toma valores entre los extremos de -2°C y 5°C a nivel global (Larcher y Bauer, 1981; Öquist, 1983; Jolly *et al.*, 2005). Sin embargo, en zonas con árboles es más difícil que la nieve cubra totalmente la vegetación y esto puede provocar

alteraciones tanto positivas como negativas del EVI. Cuando no hay nieve sobre los árboles pero sí sobre el suelo (es decir, una vez la nieve se cae de las ramas de los árboles al suelo) se pueden observar valores anormalmente positivos del EVI. Esto es debido a que la nieve incrementa la reflectancia en la región del azul más que en la del rojo o el infrarrojo cercano, lo que provoca valores anormalmente altos del EVI (Huete *et al.*, 2002). Estos aumentos influyen tanto en la curva de año medio (Figura 6) como en los atributos funcionales (Figura 7). Por lo tanto, el filtrado de hielo-nieve en las regiones de alta montaña, como en Sierra Nevada, se hace necesario para una correcta caracterización funcional de estos ecosistemas.

Este estudio caracteriza los factores que afectan a la calidad de las imágenes MODIS en el periodo 2001-2010. Sin embargo, al tratarse de una serie temporal larga, los patrones espaciales y estacionales de los efectos sobre la calidad obtenidos con MODIS pueden ser empleados para orientar el seguimiento en otros periodos y con otros sensores. De hecho, el análisis de Evaluación de la Calidad de MODIS ha sido reproducido en otros productos como los derivados de Suomi-NPP VIIRS.

## 5. Conclusiones

Nuestro estudio analizó cualitativamente y cuantitativamente las implicaciones del filtrado por calidad de la banda del EVI (índice de vegetación mejorado, *Enhanced Vegetation Index*) del producto MOD13Q1 mediante la capa QA. Como resultado principal, mostramos cómo el filtrado por calidad de las series temporales del EVI resulta imprescindible para realizar caracterizaciones de referencia y evaluar tendencias de largo plazo en el funcionamiento de los ecosistemas. Tanto es así, que las diferencias observadas entre los valores del EVI filtrados y sin filtrar pueden llegar a ser un orden de magnitud superior a las tendencias de largo plazo detectadas en esos mismos ecosistemas.

Los resultados revelaron cómo el efecto del filtrado sobre la cantidad de fechas con buena calidad y sobre los valores del EVI y sus atributos derivados varió en función 1) del factor de calidad aplicado, 2) de la época del año, 3) de la altitud, y 4) de la métrica o atributo funcional del EVI considerado. En consecuencia, nuestro estudio

nos permite enumerar una serie de recomendaciones que los programas de seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas deberían seguir en relación con el uso de la información de calidad, especialmente en regiones muy heterogéneas. Los factores de calidad cuyo filtrado tuvo un efecto considerable sobre el EVI fueron las sombras, los aerosoles (concentraciones medias y altas) y en menor medida, la presencia de hielo o nieve. El uso del filtro de hielo o nieve es imprescindible además si se usan datos sobre vegetación arbórea, que no queda cubierta totalmente, pero cuyo EVI sí se ve influenciado por la alta reflectancia de una superficie como la nieve. El efecto del filtrado presenta variabilidad temporal, y es más intenso en período comprendido desde el inicio del otoño hasta el comienzo de la primavera. Por lo tanto, los datos adquiridos con posible influencia de sombras, aerosoles o nieve y durante el período entre otoño a primavera requieren prestar atención a su calidad. En las zonas de menor altitud (i.e., pisos bioclimáticos termo y mesomediterráneo) el efecto del filtrado fue muy bajo por lo que no resulta imprescindible emplear la información de calidad. Por el contrario, a altitudes mayores y zonas de relieve importante sí es altamente recomendable emplear la información de calidad para disminuir la incertidumbre sobre los mismos. Así, las zonas de alta montaña pueden tratarse como unidades homogéneas en cuanto al filtrado por calidad. Desde el punto de vista del funcionamiento ecosistémico, la estacionalidad (sCV) y el máximo (MAX) de EVI fueron los atributos funcionales más afectados por el filtrado, por lo que su uso requiere atender a la calidad de los datos de origen. Sin embargo, la media de EVI (EVI medio), subrogado de la productividad, se mostró más estable frente al filtrado por calidad, lo que lo convierte en el descriptor del funcionamiento ecosistémico si se pretende prescindir del filtrado por calidad.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Innovación y Ciencia (Proyecto CGL2010-22314), la Junta de Andalucía (Proyecto SEGALERT, P09-RNM-5048) y el Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG) (Proyecto GLOCHARID).

## Referencias

- Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J. M., Cabello, J. 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, 15(2), 200-212. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00215.x>
- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J. M., Delibes, M. 2009. Use of Descriptors of Ecosystem Functioning for Monitoring a National Park Network: A Remote Sensing Approach. *Environmental Management*, 43(1), 38-48. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-008-9154-y>
- Alcaraz-Segura, D., Chuvieco, E., Epstein, H. E., Kasischke, E. S., Trishchenko, A. 2010. Debating the greening vs. Browning of the North American boreal forest: Differences between satellite datasets. *Global Change Biology*, 16(2), 760-770. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01956.x>
- Alexandridis, T. K., Gitas, I. Z., Silleos, N. G. 2008. An estimation of the optimum temporal resolution for monitoring vegetation condition on a nationwide scale using MODIS/Terra data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(12), 3589-3607. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701564618>
- Ali, A., de Bie, C. A. J. M., Skidmore, A. K. 2013. Detecting long-duration cloud contamination in hyper-temporal NDVI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 24, 22-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.02.001>
- Beck, P. S. A., Jönsson, P., Høgda, K. A., Karlsen, S. R., Eklundh, L., Skidmore, A. K. 2007. A ground-validated NDVI dataset for monitoring vegetation dynamics and mapping phenology in Fennoscandia and the Kola Peninsula. *International Journal of Remote Sensing*, 28(19), 4311-4330. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701241936>
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Ferrero, R., Castro, A. J., Liras, E. 2012. The role of vegetation and lithology in the spatial and inter-annual response of EVI to climate in drylands of Southeastern Spain. *Journal of Arid Environments*, 79, 76-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.12.006>
- Chen, X., Vierling, L., Deering, D. 2005. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment*, 98(1), 63-79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.021>
- Chuvieco, E. 2010. *Teledetección ambiental*. Barcelona. Editorial Ariel.
- Colditz, R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M. y Dech, S. 2006. Generation and Assessment of MODIS Time Series using Quality Information. *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 779-782. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2006.200>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <http://dx.doi.org/10.1038/387253a0>
- De Abelleira, D., Verón, S. R. 2014. Comparison of different BRDF correction methods to generate daily normalized MODIS 250 m time series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 46-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.019>
- Dionisio, M. A., Alcaraz-Segura, D., Cabello, J. 2012. Satellite-Based Monitoring of Ecosystem Functioning in Protected Areas: Recent Trends in the Oak Forests (*Quercus pyrenaica* Willd.) of Sierra Nevada (Spain). In S. S. Young & S. E. Silvertown (Eds.), *International Perspectives on Global Environmental Change*, pp. 355-374. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/27711>
- Dozier, J., Painter, T. H., Rittger, K., Frew, J. E. 2008. Time-space continuity of daily maps of fractional snow cover and albedo from MODIS. *Advances in Water Resources*, 31(11), 1515-1526. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.08.011>
- Foley, J. A., Asner, G. P., Costa, M. H., Coe, M. T., DeFries, R., Gibbs, H. K., Howar, E. A., Olson, S., Patz, J., Ramankutty, N., Snyder, P. 2007. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(1), 25-32. [http://dx.doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[25:ARFDAL\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[25:ARFDAL]2.0.CO;2)
- Fraser, R. S., Kaufman, Y. J. 1985. The relative importance of scattering and absorption in remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23(5), 625-633. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.1985.289380>
- Gao, X., Huete, A. R., Ni, W., Miura, T. 2000. Optical-Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 609-620. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00150-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00150-4)
- Giner, C., Martínez, B., Gilabert, M. A., Alcaraz-Segura, D. 2012. Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009). *Revista de Teledetección*, 38, 51-64. Obtenido de [http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38\\_05.pdf](http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_05.pdf). Fecha de acceso: marzo de 2015.



- Giorgi, F., Lionello, P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 90-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Gu, J., Li, X., Huang, C., Okin, G. S. 2009. A simplified data assimilation method for reconstructing time-series MODIS NDVI data. *Advances in Space Research*, 44(4), 501-509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2009.05.009>
- Hess, L., Ratana, P., Huete, A., Potter, C., Melack, J. 2009. Use of MODIS Enhanced Vegetation Index to detect seasonal patterns of leaf phenology in central Amazon várzea forest. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, 4, 1007-1010. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5417550>
- Hoare, D., Frost, P. 2004. Phenological description of natural vegetation in southern Africa using remotely-sensed vegetation data. *Applied Vegetation Science*, 7(1), 19-28. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1654-109X.2004.tb00591.x>
- Huete, A., Justice, C. O., van Leeuwen, W. 1999. MODIS Vegetation Index (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Obtenido de [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf). Fecha de acceso: marzo de 2015.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A., Didan, K., Shimabukuro, Y. E., Ratana, P., Saleska, S. R., Hutyra, L. R., Yang, W., Nemani, R.R., Myneni, R. 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 33(6), 2-5. <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL025583>
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jacquín, A., Sheeren, D., Lacombe, J. P. 2010. Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(S1), S3-S10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.004>
- Jolly, W. M., Nemani, R., Running, S. W. 2005. A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology*, 11(4), 619-632. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00930.x>
- Justice, C., Townshend, J., Vermote, E., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., Roy, D. P., Morisette, J. T. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 3-15. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6)
- Kerr, J. T., Ostrovsky, M. 2003 From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(6), 299-305. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00071-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00071-5)
- Larcher, W., Bauer, H. 1981. Ecological significance of resistance to low temperature. *Encyclopedia of plant physiology, new series, volume 12A. Physiological plant ecology. I. Responses to the physical environment*, 403-437. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8\\_14](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8_14)
- Li, Z., Wang, Y., Zhou, Q., Wu, J., Peng, J., Chang, H. 2008. Spatiotemporal variability of land surface moisture based on vegetation and temperature characteristics in Northern Shaanxi Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 72(6), 974-985. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.11.014>
- Lloyd, D. 1990. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 11(12), 2269-2279. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169008955174>
- McNaughton, S. J., Oesterheld, M., Frank, D. A., Williams, K. J. 1989 Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341(6238), 142-144. <http://dx.doi.org/10.1038/341142a0>
- Milchunas, D. G., Laurenroth, W. K. 1995. Inertia in plant community structure: State changes after cessation of nutrient enrichment stress. *Ecological Applications*, 5(2), 1195-2005. <http://dx.doi.org/10.2307/1942035>
- Monteith, J. L., Moss, C. J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 281(980), 277-294. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>
- Morales-Baquero, R., Pérez-Martínez, C., Reche, I. 2001. Ecosistemas de alta montaña, las atalayas de la troposfera. *Revista Ecosistemas*, 10(3).
- Morton, D. C., Nagol, J., Carabajal, C. C., Rosette, J., Palace, M., Cook, B. D., Vermote E. F., Harding, D. J., North, P. R. J. 2014. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. *Nature*, 506(7487), 221-224. <http://dx.doi.org/10.1038/nature13006>

- Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G. R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J. T., Votava, P., Nemani, R. R., Running, S.W. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 214-231. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00074-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3)
- Öquist, G. 1983. Effects of low temperature on photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, 6(4), 281-300.
- Oyonarte, C., Alcaraz-Segura, D., Oyarzábal, M., Paruelo, J. M., Cabello, J. 2010. Sistema de apoyo a la gestión de reservas de la biosfera basado en el monitoreo de la productividad primaria: ensayo en Cabo de Gata-Níjar (Almería-España). In P. Araya & M. Clüsener-Godt (Eds.), *Reservas de la Biosfera: Su contribución a la provisión de servicios de los ecosistemas. Experiencias exitosas en Iberoamérica* (pp. 118-140). Paris: UNESCO.
- Paruelo, J. M., Lauenroth, W. K., Epstein, H. E., Burke I. C., Aguiar, M. R., Sala, O. E. 1995. Regional climatic similarities in the temperate zones of North and South America. *Journal of Biogeography*, 22(4-5), 2689-2699. <http://dx.doi.org/10.2307/2845992>
- Paruelo, J. M., Oesterheld, M., Di Bella, C. M., Arzadum, M., Lafontaine, J., Cahuepé, M., Rebella, C. M. 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science*, 3(2), 189-195. <http://dx.doi.org/10.2307/1478997>
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Sala, O. E. 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*, 4(7), 683-698. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-001-0037-9>
- Piñeiro, G., Oesterheld, M., Paruelo, J. 2006. Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. *Ecosystems*, 9(3), 357-373. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-005-0013-x>
- Piquer-Rodríguez, M., Kuemmerle, T., Alcaraz-Segura, D., Zurita-Milla, R., Cabello, J. 2012. Future land use effects on the connectivity of protected area networks in southeastern Spain. *Journal for Nature Conservation*, 20(6), 326-336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnc.2012.07.001>
- Potter, C. S., Brooks, V. 1998. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 19(15), 2921-2948. <http://dx.doi.org/10.1080/014311698214352>
- Poulter, B., Cramer, W. 2009. Satellite remote sensing of tropical forest canopies and their seasonal dynamics. *International Journal of Remote Sensing*, 30(24), 6575-6590. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160903242005>
- Prasad, A. K., Singh, R. P., Singh, A. 2006. Seasonal climatology of aerosol optical depth over Indian subcontinent: trend and departures in recent years. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), 2323-2329. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160500043665>
- Querol, X., Alastuey, A., Viana, M. M., Rodríguez, S., Artíñano, B., Salvador, P., Garcia do Santos, S., Fernández-Patier, R., Ruiz, C. R., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Menéndez, M., Gil, J. I. 2004. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in Spain. *Journal of Aerosol Science*, 35(9), 1151-1172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.04.002>
- Reinart, A., Reinhold, M. 2008. Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 603-611. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.015>
- Requena-Mullor, J., López, E., Castro, A., Cabello, J., Virgós, E., González-Miras, E., Castro, H. 2014. Modeling spatial distribution of European badger in arid landscapes: an ecosystem functioning approach. *Landscape Ecology*, 29(5), 843-855. <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-014-0020-4>
- Rivas-Martínez, S. 1983. Pisos bioclimáticos de España. *Lazaroa*, 5, 33-43.
- Sellers, P. J., Berry, J. A., Collatz, G. J., Field, C. B., Hall, F. G. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment*, 42(3), 187-216. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90102-P](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(92)90102-P)
- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., Huete, A. 2010. MODIS Vegetation Indices (MOD13) C5 User's Guide. Versión 2, 2010.
- Talbot, R. W., Harriss, R. C., Browell, E. V., Gregory, G. L., Sebacher, D. I., Beck, S. M. 1986. Distribution and Geochemistry of Aerosols in the Tropical North Atlantic Troposphere: Relationship to Saharan Dust. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.*, 91(D4), 5173-5182. <http://dx.doi.org/10.1029/JD091iD04p05173>
- Tucker, C. J., Sellers, P. J. 1986. Satellite remote-sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395-1416. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948944>
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., Steininger, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(6), 306-314. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)

- Virginia, R. A., Wall, D. H., Levin, S. A. 2001. Principles of ecosystem function. *Encyclopedia of biodiversity*. Academic Press, San Diego, 345-352. <http://dx.doi.org/10.1016/B0-12-226865-2/00090-0>
- Wang, Q., Tenhunen, J., Dinh, N., Reichstein, M., Otieno, D., Granier, A., Pilegarrd, K. 2005. Evaluation of seasonal variation of MODIS derived leaf area index at two European deciduous broadleaf forest sites. *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4), 475-484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.003>
- Wiegand, T., Snyman, H. A., Kellner, K., Paruelo, J. M. 2004. Do grasslands have a memory: Modeling phytomass production of a semiarid South African grassland. *Ecosystems*, 7(3), 243-258. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-003-0235-8>
- Zhang, L., Huang, J., Guo, R., Li, X., Sun, W., Wang, X. 2013. Spatio-temporal reconstruction of air temperature maps and their application to estimate rice growing season heat accumulation using multi-temporal MODIS data. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 14(2), 144-161. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.B1200169>
- Zhao, M., Running, S. W. 2010. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science*, 329(5994), 940-943. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1192666>
- Zhou, L., Tian, Y., Myneni, R. B., Ciais, P., Saatchi, S., Liu, Y., Piao, S., Chen, H., Vermote, E.F., Song, C., Hwang, T. 2014. Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 509(7498), 86-90. <http://dx.doi.org/10.1038/nature13265>