

Evolución de la cobertura forestal en los alcornoques próximos al estrecho de Gibraltar a través del índice de vegetación EVI

P. Reyes^{1,*}, E. Burdett²

(1) Cima (Centro Internacional de Migración de las Aves), Fundación Migres N-340, Km.85, 11380, Tarifa, España.
(2) School of Biological Sciences, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, United Kingdom.

* Autor de correspondencia: P. Reyes [pablosrmz@gmail.com]

> Recibido el 17 de junio de 2019 - Aceptado el 20 de noviembre de 2019

Reyes, P., Burdett, E. 2019. Evolución de la cobertura forestal en los alcornoques próximos al estrecho de Gibraltar a través del índice de vegetación EVI. *Ecosistemas* 28(3):73-80. Doi.: 10.7818/ECOS.1787

Mediante información basada en teledetección hemos cuantificado cambios porcentuales en el índice de vegetación EVI (Enhanced Vegetation Index) como indicador del estado de conservación de los alcornoques (*Quercus suber*) próximos al estrecho de Gibraltar para un intervalo de tiempo entre 2000-2018. Los cambios analizados nos permiten localizar procesos de degradación en estos ecosistemas, los cuales albergan una gran biodiversidad, proporcionando además hábitat para las especies que utilizan el estrecho como ruta migratoria. Hemos analizado la evolución de la cobertura forestal sobre diferentes estructuras de alcornoque (bosque denso, disperso y combinado con matorral bajo y pastizal). Los cambios porcentuales observados en el intervalo de 2009-2018 con respecto al de 2000-2009 fluctúan entre +1.11% y +2.42%, en promedio, según el tipo de superficie analizada. Esto se traduce en un aumento generalizado del verdor sobre los diferentes territorios, localizándose no obstante parcelas con valores negativos del índice EVI. Hemos calculado las superficies afectadas por distintos niveles de pérdida de cobertura, siendo las más perjudicadas las dehesas de alcornoque disperso y pastizal. Además, hemos obtenido cartografía con la variación del índice EVI por píxel de 250 metros para un territorio que integra espacios protegidos cercanos al estrecho de Gibraltar. Contrastando esta información con la serie histórica de fotografías aéreas del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) hemos detectado procesos de degradación ecológica debido a diferentes causas. En este trabajo se muestran algunos ejemplos.

Palabras clave: bosque mediterráneo; MODIS (Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada); *Quercus suber*; series temporales; teledetección

Reyes, P., Burdett, E. 2019. Detecting forest cover changes in the cork oak forests surrounding the Strait of Gibraltar using the Enhanced Vegetation Index (EVI). *Ecosistemas* 28(3):73-80. Doi.: 10.7818/ECOS.1787

Information based on remote sensing was used to quantify percentage changes in the Enhanced Vegetation Index (EVI) values in cork oak forests (*Quercus suber*) surrounding the strait of Gibraltar, between the years 2000 and 2018, with EVI values serving as an indirect measure of forest health. The observed changes enable the detection of degradation of ecosystems within this area of high biodiversity, which also provides important habitat to migratory species passing through the strait of Gibraltar. Changes in vegetation cover were analysed for a range of different structural types of cork oak forest (dense forest, scattered forest, and forest mixed with scrubland and grassland). Percentage changes of between +1.11% and +2.42% were observed when comparing the time period of 2009-2018 to that of 2000-2009, depending on the type of forest structure analysed. These results show an overall increase in forest cover within the study area, however, by locating plots with negative EVI values, sparse cork oak forest with grassland was identified as having the greatest losses in forest cover. Cartography with EVI change values per 250 meter pixel was obtained for the protected areas surrounding the Strait of Gibraltar. This information was then matched against historic PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) images, revealing the presence of desertification. This article covers some of examples of such processes.

Key words: mediterranean forest; MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer); *Quercus suber*; remote sensing; time series

Introducción

El desarrollo de las actividades humanas (cambios de usos del suelo, sobrepastoreo, etc), junto al cambio climático o la acción de patógenos naturales están generando actualmente alteraciones en la estructura y composición de los bosques mediterráneos (Barbero et al. 1990; Carrasco et al. 2009; Peñuelas et al. 2017). Algunos ejemplos de estas alteraciones son el retroceso de la masa arbórea en favor de la masa arbustiva (Costa et al. 2011) o la fragmentación del paisaje (De Montis et al. 2017). Por otro lado, también se identifican áreas de recuperación forestal debido a planes de restauración concretos, o a cambios en los factores ambientales que condicionan el desarrollo de la vegetación (Aber et al. 2001).

La masa vegetal juega un papel importante en el cambio climático al actuar como sumidero de CO₂, favorecer la humedad en el aire por evapotranspiración, o facilitar la condensación de nubes a través de los SOC's - "compuestos orgánicos secundarios en la atmósfera" (Topping et al. 2013). Los alcornoques constituyen una importante extensión de área forestal en la región mediterránea, ocupando en torno a 1.5 millones de hectáreas en el sur de Europa y en torno a 700.000 hectáreas en el norte de África (Houston Durrant et al. 2016), contribuyendo a los procesos enumerados anteriormente (Pio et al. 2005). Además, el alcornoque está vinculado a la economía regional y proporciona numerosos servicios ecosistémicos (Kim et al. 2017). La extensión total de alcornoque en nuestro territorio de trabajo es de 26 240 ha, lo que supone en torno a

un 10.7% de los espacios naturales cercanos al estrecho de Gibraltar (PN de Los Alcornocales, PN del Estrecho, PN La Breña y Marismas del Barbate, y PN Sierra de Grazalema). (**Fig. 1**)

A través del sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua, los cuales forman parte del “Sistema de Observación de la Tierra” (EOS – NASA), se adquieren diariamente imágenes de la Tierra en diferentes intervalos de longitud de onda, lo que permite elaborar mediante algoritmos productos de información sobre la cubierta vegetal con resolución temporal de 16 días a partir de las imágenes diarias de ambos satélites (la periodicidad del paso de los satélites Terra y Aqua sobre un mismo punto de la Tierra a una misma hora es de 16 días). Utilizando el índice de vegetación EVI (Índice de Vegetación Mejorado de sus siglas en inglés) podemos visualizar tendencias en áreas forestales para un periodo de tiempo dado.

El índice EVI mide la diferencia de la radiación absorbida por la vegetación en el rango visible del azul y el rojo para llevar a cabo la fotosíntesis con respecto a la radiación reflejada, no activa fotosintéticamente en el rango del infrarrojo cercano (Huete et al. 2002). Esta diferencia se calcula a partir de la radiación captada por el sensor MODIS. La radiación absorbida proporciona información en conjunto sobre diferentes atributos de la vegetación, como el contenido de clorofila de la hoja, la fracción de la cubierta vegetal, el área de la hoja o la estructura del dosel forestal (Glenn et al. 2008). El EVI permite además realizar estimaciones sobre la producción primaria en distintos tipos de superficie (Shi et al. 2017). Según lo expuesto anteriormente, utilizaremos el EVI como indicador a la hora de visualizar tendencias a lo largo del tiempo sobre estos atributos de manera conjunta.

Actualmente existe un gran volumen de trabajos en la literatura científica que ponen de manifiesto la utilidad de estos productos de

información basados en teledetección por satélite para evaluar procesos de degradación en diferentes zonas forestales del planeta, como los bosques tropicales (Hammer et al. 2009), el Amazonas (Maeda et al. 2014), la península ibérica (Novillo et al. 2019), o el área mediterránea en su conjunto (Ogaya et al. 2015; Jucker-Riva et al. 2017). Además, se han llevado a cabo otros estudios para modelizar la productividad primaria de los bosques como indicador de dichos procesos de degradación (Tucker y Pinzón 2017), considerando su influencia en el sistema climático (Topping et al. 2013).

Nuestra área de estudio está formada por los alcornocales presentes en los espacios naturales próximos al estrecho de Gibraltar, localizados en la cordillera Penibética, a una altitud máxima de 1091 metros y una composición litológica mayoritaria de areniscas y arcillas. El clima dominante es el Mediterráneo con influencia del Atlántico, produciéndose precipitaciones anuales comprendidas entre 800 y 1400 mm (Pérez Latorre et al. 1999). Los alcornocales están naturalmente asociados a vegetación de matorral bajo mediterráneo, habiéndose clasificado hasta 1300 taxones de plantas vasculares en nuestro territorio (Pérez Latorre et al. 1999). Estas áreas forestales tienen un papel clave al proporcionar hábitat para multitud de especies, y aportar los recursos necesarios a las poblaciones migrantes que utilizan esta vía para pasar entre Europa y África, o que las utilizan como área de invernada o de cría.

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un análisis basado en la utilización de una serie homogénea de imágenes EVI para cuantificar los cambios sufridos por la vegetación durante las últimas décadas en nuestro territorio de estudio. Mediante la metodología expuesta a continuación pretendemos comprobar si se están produciendo procesos de degradación en estos sistemas forestales, generando al mismo tiempo un sistema de alerta que permita visualizar y gestionar espacios naturales vulnerables.

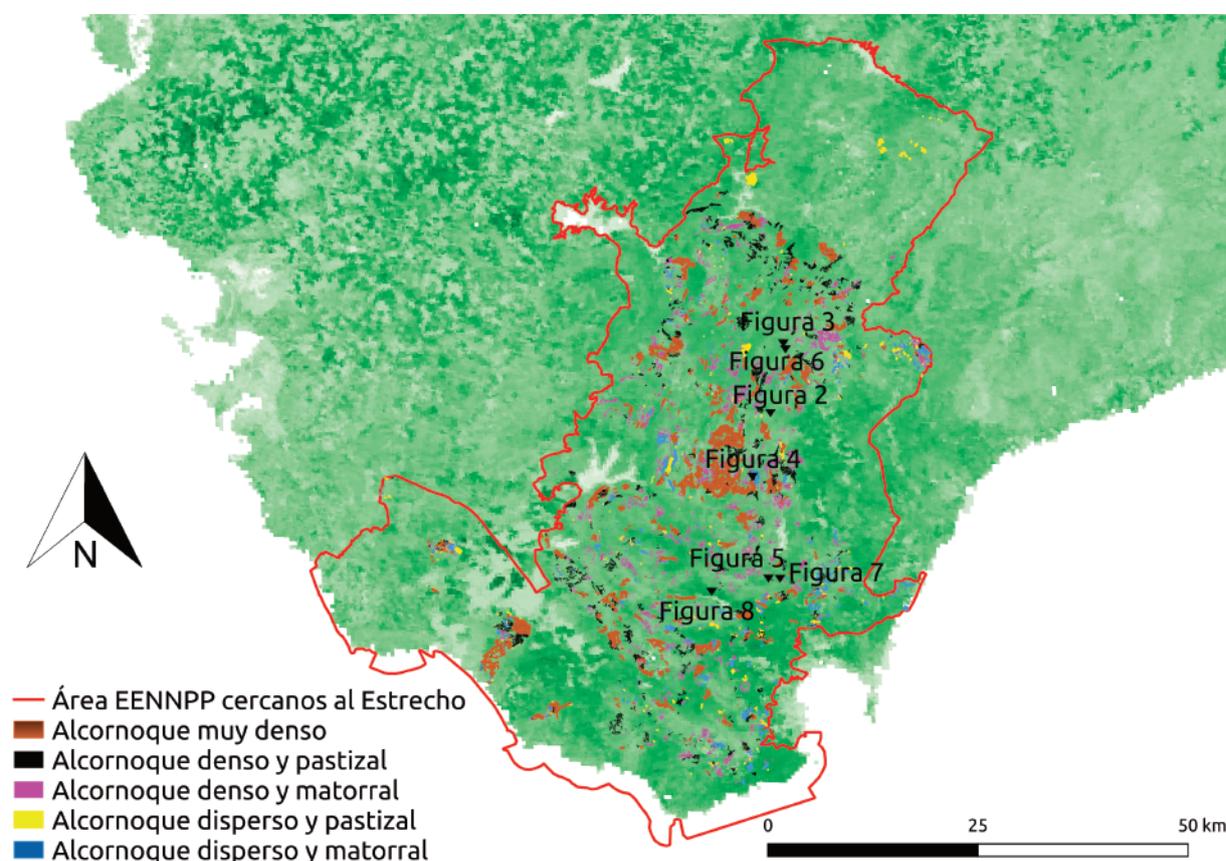


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de las distintas formaciones de alcornoque analizadas, junto a la ubicación de las ortofotos mostradas como ejemplo (figs. 2-8).

Figure 1. Study area (outlined in red), showing the distribution of different structures of cork oak forest analysed, together with the location of orthophotographs given as examples (figs. 2-8).

Material y métodos

Para estudiar los cambios en las masas forestales analizadas hemos utilizado la serie temporal del índice de vegetación EVI calculado cada 16 días, pues tal como se expone en el apartado anterior, existe una correlación entre este índice y algunas características fisiológicas de la vegetación, como el contenido de clorofila, la fracción de la cubierta vegetal sobre la superficie o la producción primaria. De esta forma, el EVI supone una imagen del estado de la vegetación cada 16 días, que al ser analizada para un largo intervalo de tiempo puede ayudarnos a visualizar su evolución. Identificamos además superficies forestales estables cuando no existe pendiente significativa en la serie temporal de datos EVI analizados.

La expresión matemática del EVI (Huete et al. 2002) se define como:

$$EVI = \frac{2.5 * (NIR - R)}{(NIR + C1 * R - C2 * B + L)}$$

donde: EVI: Enhanced Vegetation Index; NIR reflectancia en la banda del infrarrojo cercano; R: reflectancia en la banda del rojo; B: reflectancia en la banda del azul; los coeficientes adoptados en el algoritmo EVI-MODIS son: $L=1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$.

Podemos estimar la producción primaria (GPP) a partir de los índices de vegetación mediante modelos basados en las variables APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation) y LUE (Light Use Efficiency), a través de la siguiente expresión (Hashimoto et al. 2012; Cicuéndez et al. 2015):

$GPP = APAR \times LUE$. A su vez, APAR se calcula como:

$FPAR \times PAR$

donde FPAR es la "Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa" captada por la vegetación y PAR la "Radiación Fotosintéticamente Activa" que incide sobre la superficie. Por otra parte, LUE se calcula como:

$$LUE = LUE_{Max} \times T_{MINScalar} \times VPD_{scalar}$$

siendo LUE_{MAX} la eficiencia máxima en el uso de la radiación, y $T_{MINscalar}$ y VPD_{scalar} variables escalares definidas en función de las temperaturas mínimas diarias y el déficit de presión de vapor promedio diario. FPAR se obtiene a partir de los valores de reflectancia de MODIS, y LUE_{max} se obtiene empíricamente para cada tipo de Bioma (Zhao et al. 2011).

El modelo descrito anteriormente ha sido aplicado previamente a un ecosistema mediterráneo con presencia de encinas, análogo desde el punto de vista estructural y fisiológico a los ecosistemas abordados en este trabajo (Cicuéndez et al. 2015)

La correlación entre las variables GPP y EVI se ha establecido sobre diferentes tipos de superficies, obteniéndose coeficientes de correlación R^2 en el rango entre 0.93 para el caso de ecosistemas de sabana arbolada, y de 0.36 para el caso genérico de bosques de hoja ancha perenne (Shi et al. 2017), siendo este último el tipo de estructura general más afín a nuestros ecosistemas de estudio.

Las imágenes EVI para el territorio de análisis se han obtenido de la versión 6 del producto MOD13Q1 de MODIS (Didan 2015), descargable desde el sitio web <https://earthdata.nasa.gov>, con un nivel 3 de procesamiento —productos derivados de variables geofísicas calculadas a partir de datos brutos de radiación, permitiendo en este caso la representación de datos en celdillas a una resolución de 250 metros y 16 días—. Con un total de 414 imágenes hemos abarcado el intervalo temporal 2000-2018. La zona analizada comprende las áreas naturales próximas al estrecho de Gibraltar, incluyendo los espacios naturales de Los Alcornocales, el Estrecho, La Breña y Marismas del Barbate, y la sierra de Grazalema. (Fig. 1). El producto MOD13Q1 garantiza la calidad y consistencia de los datos, descartando para ello los píxeles con nubes altas y ángulo de visión elevado que puedan interferir en la correcta

toma de datos, y seleccionando los mayores valores de EVI durante los 16 días registrados por los satélites Terra y Aqua.

Decidimos utilizar el producto EVI frente a otros posibles índices de vegetación, como por ejemplo NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), al suponer el primero una versión mejorada sobre factores influyentes en la calidad de la señal captada por MODIS, como los aerosoles atmosféricos que, debido a su efecto de absorción – emisión sobre la radiación en el espectro del rojo producen una intensificación de la señal en esta longitud de onda (670 nm), o el efecto producido por el acoplamiento sobre regiones de alta biomasa, provocando baja sensibilidad para detectar variaciones en la vegetación. (Zhengxing et al. 2003). El algoritmo utilizado para el cálculo del EVI permite minimizar las variaciones en la señal atribuidas a dichos factores, utilizando para ello coeficientes de corrección e información comparativa en la banda del azul para corregir las alteraciones sobre la banda del rojo.

Para conocer la evolución del índice EVI sobre nuestro territorio de estudio, hemos analizado la serie temporal de datos, calculando la pendiente de la recta de regresión entre el índice EVI y la variable fecha. Esto nos permitirá a priori visualizar superficies asociadas a variaciones significativas en el EVI. El cálculo de la pendiente de la recta se calcula como:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

donde, por cada píxel, s es la pendiente, Y_i el valor de EVI asociado a la componente temporal X_i , \bar{Y} el promedio de valores EVI para toda la serie analizada, y finalmente \bar{X} la fecha promedio.

Paralelamente, hemos cuantificado la variación del índice EVI en términos relativos, evaluando para ello el porcentaje de cambio de EVI a lo largo de los últimos 18 años en dos intervalos de tiempo homogéneos, esto es dos periodos de 9 años. Para cada uno se ha promediado el valor por cada píxel, y seguidamente calculado el porcentaje relativo de cambio de los últimos 9 años con respecto a los primeros 9 años. Como resultado obtendremos una variación porcentual en el valor de EVI entre ambos periodos. Los dos intervalos abarcan exactamente las mismas estaciones del año para asegurar la homogeneidad en la fenología anual. No obstante, a lo largo de un periodo de 9 años los alcornoques pueden sufrir ciclos biológicos con frecuencia aleatoria, como por ejemplo las plagas de Lymantria dispar (Tiberi et al. 2016) que pueden explicar en cierta medida la variabilidad cuantificada en el índice EVI entre los dos periodos tomados como referencia.

Hemos seguido el siguiente procedimiento para obtener los porcentajes de cambio relativos de EVI:

Cálculo del promedio para cada serie de 9 años (18 de Febrero 2000 - 02 de Febrero de 2009 y 18 de Febrero de 2009 - 02 de Febrero de 2018)

$$\bar{X}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde, por cada píxel, \bar{X}_j representa el promedio para el periodo considerado, X_i es el valor de EVI por fecha, y n el tamaño de la muestra, siendo de 207 por cada periodo.

Finalmente tenemos $\Delta\bar{X}$ como el valor de pérdida o ganancia porcentual de EVI entre los periodos de tiempo 2000-2009 (\bar{X}_1) y 2009-2018 (\bar{X}_2) por cada píxel del territorio.

$$\Delta\bar{X} = \frac{100 * (\bar{X}_2 - \bar{X}_1)}{\bar{X}_1}$$

Para el cálculo de la pendiente de la recta de regresión EVI-fecha y los promedios de los valores de EVI por píxel sobre cada periodo de 9 años hemos utilizado la librería r.series (Glynn 2016) del SIG Grass (GRASS Development Team 2018).

El análisis temporal del EVI se ha realizado considerando los distintos tipos de alcornoque presentes en la zona de estudio, dándonos una idea del estado de conservación de estas áreas naturales. La información sobre los distintos tipos de alcornoque se ha obtenido desde la Rediam (Red de Información Ambiental de la Junta de Andalucía; <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>). La cartografía de cambios de EVI por tipo de alcornoque se ha elaborado intersectando la capa de cambio porcentual de EVI con los polígonos vinculados a cada formación de alcornoque, mediante "Grass".

Adicionalmente se han utilizado ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea; <https://pnoa.ign.es/>) para realizar un análisis visual de detalle de las áreas naturales potencialmente en retroceso, identificadas por la variación porcentual negativa de EVI entre los dos periodos de referencia. Hemos comparado ortofotos obtenidas en 2006 y 2016 para contrastar el estado de la vegetación en fechas pertenecientes a los dos periodos de referencia. Las ortofotos tienen un tamaño de píxel de 0.5 metros. Algunas de estas ortofotos se muestran como ejemplo en las **figuras 2 – 8**.

Figuras 2-8: Procesos de pérdida o ganancia de cobertura forestal en un intervalo de 10 años (2006-2016) sobre diferentes formaciones y reflejados con variaciones de EVI entre los dos periodos de referencia. Las imágenes a) y b) son de 2006 y 2016 respectivamente. Las imágenes c) y d) muestran las celdas con los valores EVI promedio en 2000-2009 y 2009-2018 respectivamente (rango de valores EVI: -2000-10 000)

Figures 2-8: Processes of loss or gain in forest cover over a 10 year period (2006-2016) across different structures of cork oak forest, represented by changes in EVI values between two reference periods. Images a) and b) are from 2006 and 2016, respectively. Images c) and d) show cells with average EVI values from 2000- 2009 and 2009-2018, respectively (range of EVI values: -2000 – 10 000).

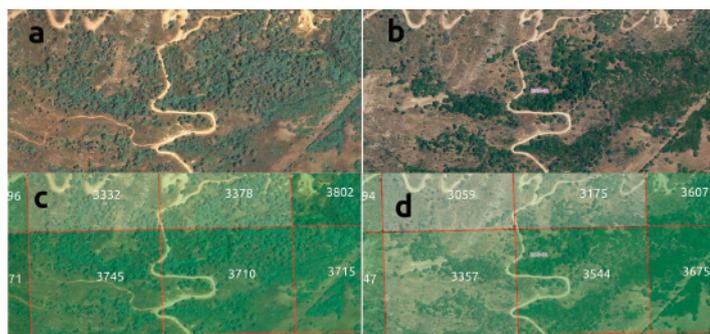


Figura 2: superficie arbolada densa de alcornoque y matorral, reflejado con una variación de EVI de -10.34%.

Figure 2: Loss of vegetation cover in an area of dense cork oak forest and scrub, with EVI variation of -10.34%.

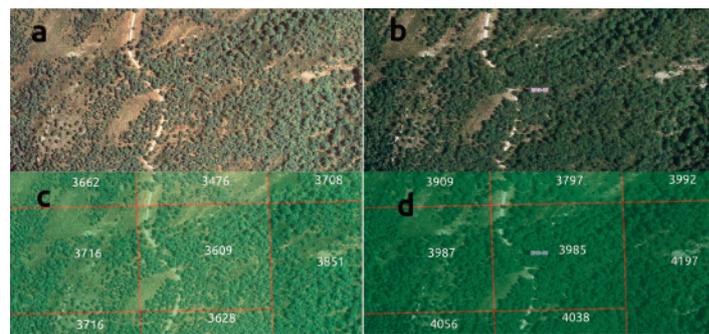


Figura 3: superficie arbolada densa de alcornoque y matorral, reflejado con una variación de EVI de +11.29%.

Figure 3: Gain in vegetation cover in an area of dense cork oak forest and scrub, with EVI variation of +11.29%.

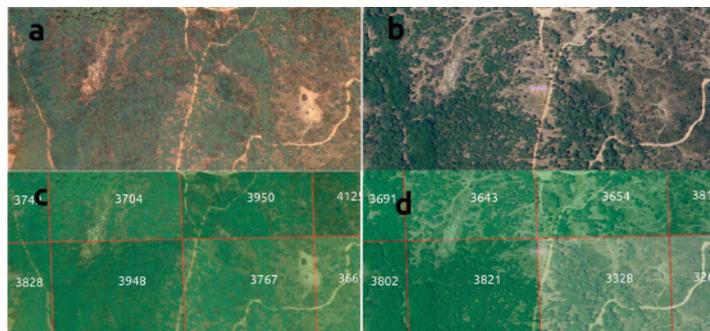


Figura 4: superficie arbolada densa de alcornoque y pastizal reflejado con una variación de EVI de -11.65%.

Figure 4: Loss in vegetation cover in an area of dense cork oak forest and grassland, with EVI variation of -11.65%.

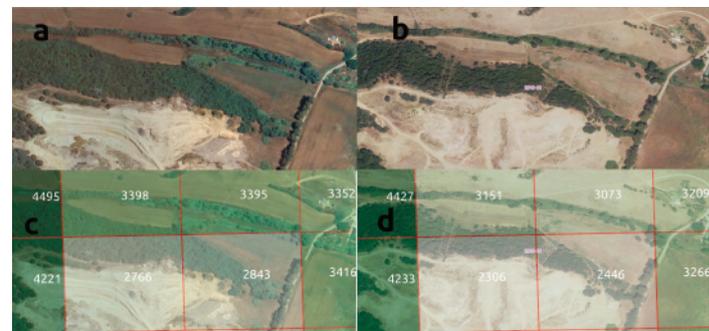


Figura 5: superficie arbolada muy densa de alcornoque reflejado con una variación de EVI de -13.95%.

Figure 5: Loss in vegetation cover in an area of dense cork oak forest, with EVI variation of -13.95%.

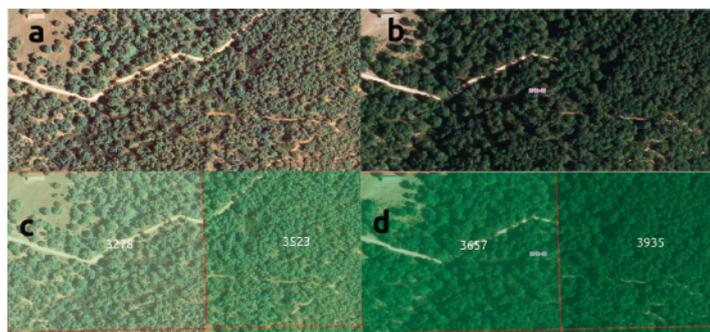


Figura 6: superficie arbolada muy densa de alcornoque reflejado con una variación de EVI de +11.67%.

Figure 6: Gain in vegetation cover in an area of dense cork oak forest, with EVI variation of +11.67%.

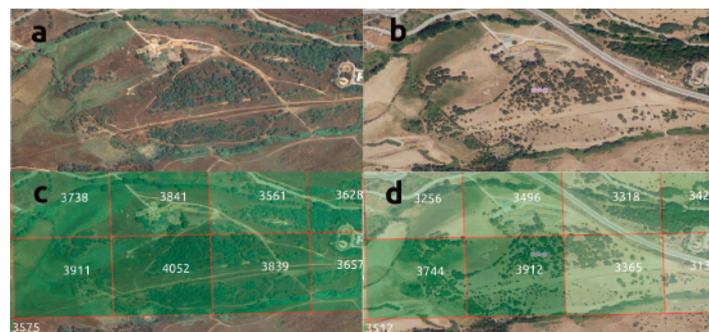


Figura 7: superficie de matorral y alcornoques dispersos, debido a cambio de uso del suelo, reflejado con una variación de EVI de -12.35%.

Figure 7: Loss in vegetation cover in an area of scattered cork oak forest and scrub, with EVI variation of -12.35%.

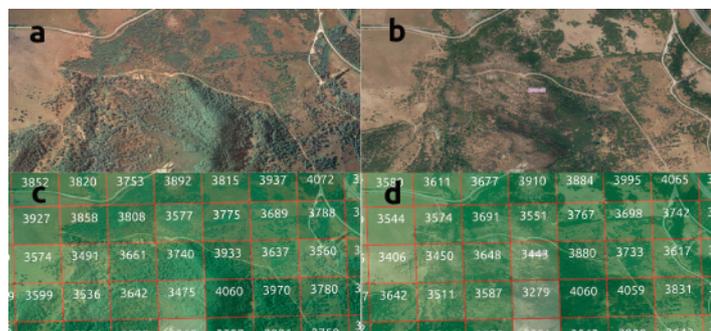


Figura 8: Proceso de pérdida de cobertura arbórea en un intervalo de 10 años (2006-2016) en superficie arbolada dispersa de alcornoques reflejado con una variación de EVI de -7.92%.

Figure 8: Loss in vegetation cover in an area of scattered cork oak forest and scrub, with EVI variation of -7.92%.

Resultados

Aplicando la metodología anteriormente expuesta obtenemos un mapa (Fig. 9) con valores de cambio en el EVI para el conjunto del área analizada.

En las distintas formaciones de alcornocal analizadas predominan las superficies con incremento en el índice EVI en un rango de 0 a 5% entre los dos periodos de referencia. Los valores de pérdida en el EVI ocupan un porcentaje variable del área estudiada según el tipo de formación (Tabla 1; Fig. 10). A continuación, se detallan los resultados para cada uno.

Formación arbolada densa de alcornoques con matorral

Con una superficie total de 10 760 ha, para esta estructura de alcornocal se observa en promedio un aumento de 1.98% en el índice EVI entre los dos intervalos de referencia. La figura 10a muestra en detalle la distribución de cambio de EVI con relación a la

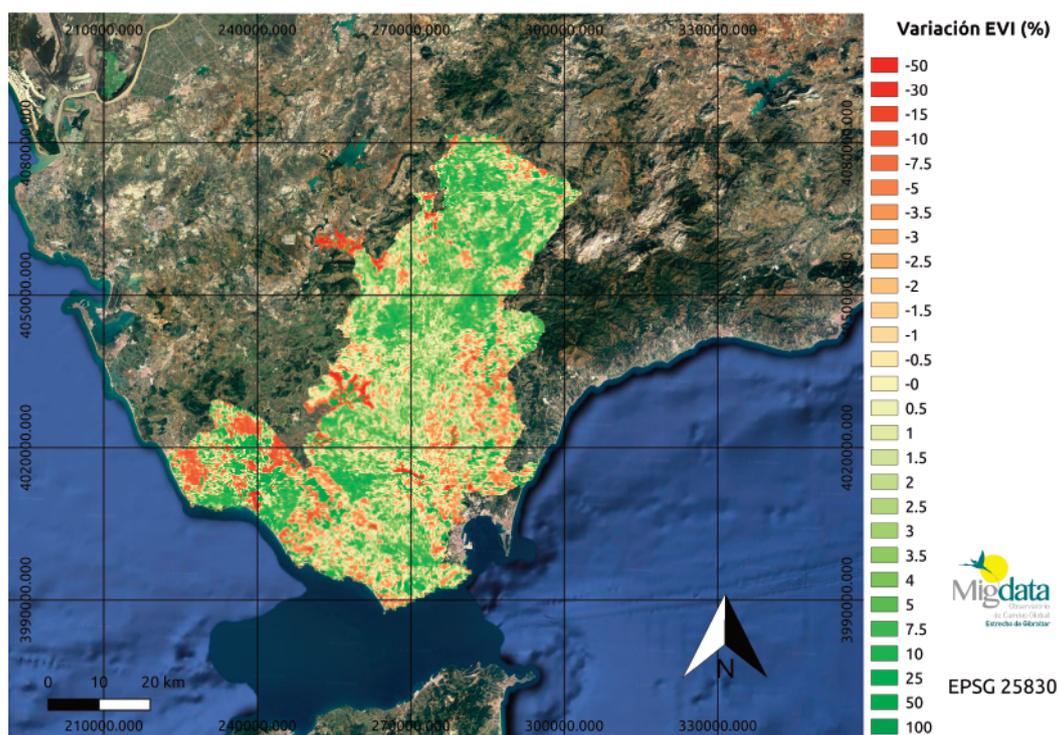


Figura 9: Mapa de variación porcentual de EVI entre los periodos 2000-2009 y 2009-2018. Los tonos amarillos a rojos representan variaciones negativas de EVI y los tonos verdes variaciones positivas.

Figure 9: Map showing EVI percentage changes during the periods of 2000-2009 and 2009-2018. Negative variations in EVI are represented in red, with increases represented in Green.

Tabla 1. Resumen de la distribución de superficies asociadas a ganancias o pérdidas en el índice EVI en las distintas formaciones de alcornocal analizadas.

Table 1. Summary of the distribution of surfaces related to gains or losses in EVI index in the different structures of forest analysed.

	Tipo de formación				
	Alcornoques densos y matorral	Alcornoques densos y pastizal	Alcornoques muy densos	Alcornoques dispersos y matorral	Alcornoques dispersos y pastizal
Superficie (ha) por Δ EVI = 0 a -15%	2567 ha	1321 ha	1219 ha	428 ha	327 ha
Superficie (ha) por Δ EVI = 0 a +15%	8193 ha	4684 ha	6010 ha	932 ha	559 ha
Superficie relativa (%) por Δ EVI = 0 a -15%	24 %	22 %	16.86 %	31.52 %	36.92 %
Superficie relativa (%) por Δ EVI = 0 a +15%	76 %	78 %	83.13 %	68.48 %	63.08 %
Δ EVI promedio por territorio de estudio	1.98 %	2.41 %	2.42 %	2.05 %	1.11 %

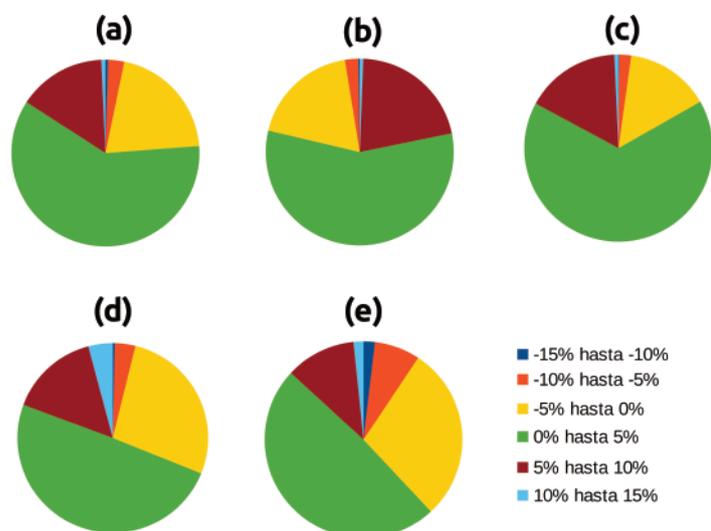


Figura 10: Distribución de las variaciones porcentuales de EVI entre los periodos 2000-2009 y 2009-2018 y para las distintas formaciones de alcornoque analizados: a) alcornoque denso y matorral, b) alcornoque denso y pastizal, c) formación muy densa de alcornoques, d) matorral y alcornoques dispersos, e) pastizal y alcornoques dispersos.

Figure 10: Graphics showing EVI percentage changes in different cork tree forest surfaces between the periods of 2000- 2009 and 2009-2018, and for different structures of cork oak forest: a) dense forest with scrub, b) dense forest with grassland, c) very dense forest, d) scrub and sparse forest, e) grassland and sparse forest.

superficie afectada. Las ganancias entre 0 y 15% corresponden a un área de 8193 ha, lo que supone un 76% del territorio analizado mientras que las variaciones negativas en el EVI entre 0 y -15% se producen en un área de 2567 ha, un 24% del territorio.

Para este tipo de formación forestal, las superficies con fuerte variación de EVI podrían estar vinculadas a diferentes causas: alteración en la composición de la vegetación (aumento de la masa arbustiva sobre la masa arbórea o viceversa), mejora o empeoramiento del estado fisiológico de la vegetación, densificación debido a actuaciones concretas (planes de protección o reforestación) o procesos de desertificación. Para identificar las causas de dicha variación realizamos un análisis mediante series históricas de ortofotos del PNOA.

En las **figuras 2 y 3** se contrastan ortofotos históricas para observar procesos de degradación y de crecimiento de la masa forestal respectivamente. En la **figura 2** observamos que la masa arbórea ha ido cediendo en favor de suelo desnudo y matorral. Esta parcela presenta un valor de pérdida del EVI de -10.34% entre los valores promedio de los dos periodos de referencia. La **figura 3** nos muestra el proceso inverso, en el que una superficie forestal ha aumentado su densidad de masa arbórea. En este caso, la variación del EVI fue de +11.29%

Formación arbolada densa de alcornoques con pastizal y/o suelo

En este caso tenemos una superficie total de 6005 ha de las cuales 4684 ha presentan variaciones de EVI positivas, con 1321 ha de variación negativa, lo que supone en términos relativos un 78% frente a un 22% del territorio. En promedio, se detecta un aumento del 2.41% en el índice EVI entre los dos periodos de referencia para el área total analizada. La superficie porcentual con variación EVI entre 5% y 10% es mayor que en el caso anterior, en decremento de la superficie con variación 0% a 5%. En cuanto a los valores de pérdida más acusados (entre -15% y -10%), observamos en la **figura 4** un ejemplo de degradación de alcornoque, dejando paso a una superficie formada por pastizal. Este proceso se refleja con una variación de EVI de -11.65%

Formación arbolada muy densa de alcornoques

Esta formación ocupa una superficie de 7229 ha, de las cuales 6010 ha presentan variación positiva de EVI, frente a las 1219 ha con variación negativa. Esto es un 83.13% y un 16.86% respectivamente. El índice EVI promediado para el área total de estudio aumenta en un 2.42% entre los dos periodos de referencia. La variación positiva relativa a la superficie analizada aumenta respecto a los anteriores casos, según se observa en la **figura 10c**. En los ejemplos mostrados en las **figuras 5 y 6** se observa un proceso de pérdida de alcornoques, y del otro lado una densificación de la estructura arbórea, con variaciones de -13.95% y +11.67% respectivamente.

Formación de matorral disperso arbolado: alcornoques dispersos

Ocupan un área de 1361 ha, de las cuales, 932 ha están asociadas a variaciones positivas de EVI, con 428 ha de variaciones negativas (en porcentajes relativos 68.48% y 31.52% respectivamente). El aumento promedio de EVI para toda el área es de 2.05%. En este caso, en comparación con las formaciones anteriores ganan mayor peso las superficies con pérdidas entre 0 y -5% de EVI, posiblemente asociadas al retroceso de la masa arbórea, la cual, al presentarse de forma dispersa es más vulnerable a los procesos de desertificación, al carecer de una buena cobertura que limite los factores erosivos o facilite la regeneración (López Bermúdez 2008; Zamora et al. 2008). En la **figura 7** observamos un cambio en la formación del suelo, reflejado con una variación de EVI porcentual de -12.35%. No se detectan mediante secuencias de ortofotos casos de aumento en la masa arbórea para esta formación.

Formación de pastizal arbolado: alcornoques dispersos

Al igual que en el caso anterior, las superficies de pastizal y alcornoques dispersos con pérdidas de EVI aumentan en proporción a la superficie analizada (de 887 ha) al compararlas con los casos de alcornoques densos. Se observa un 63.08% de ganancias (559 ha) y 36.92% de pérdidas (327 ha). En promedio, se observa un aumento en los valores EVI de 1.11% para el territorio compuesto por este tipo de formación. De los casos analizados anteriormente, es el que presenta una mayor superficie relativa con variación negativa de EVI.

Las imágenes observadas en la **figura 8** nos muestran además procesos de pérdida en la estructura arbórea, con variaciones de EVI de -13.35%

Discusión

Los resultados obtenidos nos muestran el mismo patrón en cuanto a la predominancia de superficies con variaciones positivas de EVI entre los dos periodos de referencia, para todos los tipos de cobertura forestal analizados. Sin embargo, existen diferencias en cuanto al peso que suponen las superficies afectadas con variaciones negativas de EVI entre los distintos casos. Atribuimos estas diferencias a las características de las formaciones analizadas frente a los procesos de deforestación. Como observamos en los distintos gráficos de la **figura 10**, las formaciones más vulnerables serían las de alcornoques dispersos, las cuales, al presentar una menor cobertura vegetal, serían más vulnerables a diversos impactos como por ejemplo la erosión hidrológica o el pastoreo. La lluvia y la escorrentía modifican con mayor intensidad estos suelos debido a la escasa protección en este tipo de formación, existiendo además una limitación en la disponibilidad de agua y materia orgánica, lo que a su vez influye negativamente en el desarrollo de la vegetación (López Bermúdez 2008). Algunos trabajos han contabilizado las pérdidas de suelo sobre distintos tipos de ecosistemas, confirmando la influencia del porcentaje de cobertura vegetal sobre las mismas (López Bermúdez 2008). En el caso de las dehesas, las pérdidas se producirían en un rango comprendido entre 0.23 y 39.05 t/h/año en función de distintas variables, entre las cuales se

incluyen el porcentaje de cobertura vegetal (López Bermúdez 2008). Otro factor de degradación vinculado a las dehesas es el pastoreo, el cual dificulta la regeneración forestal debido a la depredación de frutos y semillas (Zamora et al. 1996), especialmente en espacios abiertos, al producirse una mayor presión relativa a la productividad forestal (Rodríguez 2017; Zamora et al. 2008).

Los resultados promedios obtenidos para cada tipo de formación de alcornoque nos informan de que existe una pequeña variación positiva en términos generales en cuanto a la variación de EVI. Sin embargo, esta información hay que interpretarla cautelosamente, en especial en las formaciones de alcornoque disperso, ya que no siempre significa que tal aumento esté vinculado a una evolución positiva de la comunidad arbórea, de manera que cuando la misma va desapareciendo, dejando paso a una estructura arbustiva o de pastizal, ésta puede presentar diferente estructura, extensión y propiedades ópticas, viéndose reflejado este proceso en un aumento porcentual de EVI (Glenn et al. 2008). Por otro lado, en algunos sistemas forestales ocurren fenómenos cíclicos o puntuales, tales como incendios, plagas de patógenos, etc. que podrían alterar la dinámica productiva de los ecosistemas, viéndose reflejado dichos sucesos en los cambios de EVI, pero no implicando necesariamente una degradación irreversible del ecosistema (Tiberi et al. 2016). Estos episodios no siempre son detectables mediante ortofotos, debido a la falta de la resolución temporal en las imágenes para visualizar dichos procesos.

En términos generales, los resultados de este trabajo son comparables a otro realizado a escala de la península ibérica en el que se detecta que las formaciones esclerófilas con tendencia positiva significativa en el índice de vegetación NDVI ocupan mayor proporción del territorio que aquellos que presentan tendencias negativas (Novillo et al. 2019). En este último trabajo se observa en torno a un 12% de píxeles significativos con tendencia positiva frente a un 5% con tendencia negativa, siendo nuestros resultados para las formaciones densas entre 15% y 21% del territorio considerando ganancias en el EVI en un intervalo entre 5% y 10% y en torno a 3% del territorio con pérdidas acusadas (Fig. 10a, b y c).

En contraste con los resultados obtenidos en este trabajo acerca de un aumento del EVI generalizado en los alcornoques próximos al estrecho de Gibraltar durante los últimos 18 años, encontramos evidencias sobre la decadencia generalizada del alcornoque en la cuenca mediterránea (Carrasco et al. 2009; Kim et al. 2017). Este proceso complejo se desarrolla de manera heterogénea en diferentes territorios, ritmos e intensidades y debido a diversas causas (Carrasco et al. 2009; Kim et al. 2017). La magnitud de esta afección en nuestra área de estudio es visible, a priori, a partir de los resultados de variación negativa de EVI sobre nuestro territorio. Sin embargo, según se expone previamente, algunos procesos de degradación podrían estar enmascarados bajo resultados de aumento porcentual en el EVI. Determinar la proporción de estas áreas en retroceso, no detectables mediante el análisis de series temporales de EVI se presenta como un objetivo de trabajos futuros.

Conclusiones

En este trabajo hemos utilizado un método basado en el análisis de series temporales de EVI para detectar áreas donde se están produciendo cambios en las distintas formaciones de alcornoque (*Quercus suber*) próximos al estrecho de Gibraltar en el periodo comprendido entre 2000-2018. Nuestro estudio se centra en una región clave para los procesos migratorios a escala mundial, el estrecho de Gibraltar, de manera que esta información puede servir para detectar procesos de degradación forestal y poder evaluar sus repercusiones ecológicas sobre otros eslabones de la cadena trófica en trabajos futuros, así como poder gestionar estos cambios mediante actuaciones concretas. Según nuestros resultados existe una predominancia de superficies con aumento en el índice EVI, en todas las formaciones analizadas, sugiriendo un buen estado de conservación generalizado de los espacios naturales analizados. No obstante, se detectan superficies con fuertes variaciones negativas en el EVI entre -15% y -10%. Para algunas de estas su-

perficie se ha hecho un análisis visual mediante ortofotos del año 2006 y 2016, observándose algunos ejemplos de pérdida de cobertura arbórea y de cambios de usos del suelo. Las capas de variación de EVI resultado nos sirven como sistema de alerta de procesos de degradación forestal, tal como se muestra a modo de ejemplo en las figuras 2-8.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de un proyecto de adaptación al cambio climático: "el estrecho de Gibraltar: escenario de referencia para el seguimiento del cambio global a escala intercontinental" (CA_CC2017), financiado por la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica. Queremos agradecer el esfuerzo realizado por los revisores de este artículo, los cuales han contribuido en gran medida a mejorar el enfoque del trabajo. Por último, queremos agradecer al Sistema de Información y Datos del Sistema de Información de la Tierra (EOSDIS) perteneciente a la NASA (National Aeronautics and Space Administration) por la distribución de los datos que hacen posible la realización de este tipo de estudios.

Referencias

- Aber, J., Neilson, R.P., McNulty, S., Lenihan, J.M., Bachelet, D., Drapek, R.J. 2001. Forest Processes and Global Environmental Change: Predicting the Effects of Individual and Multiple Stressors. *BioScience* 51: 735-751.
- Barbero, M., Bonin, G., Loisel, R., Quézel, P. 1990. Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the mediterranean basin. *Vegetation* 87: 151-173.
- Carrasco, A. y cols. 2009. *Procesos de Decaimiento Forestal (la Seca)*. Situación del Conocimiento. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. 112 pp. Córdoba, España.
- Cicuéndez López-Ocaña, V., Litago, J., Huesca, M., Rastroero, M., Recuero, L., Merino de Miguel, S., Palacios-Orueta, A. 2015. Assessment of the gross primary production dynamics of a Mediterranean holm oak forest by remote sensing time series analysis. *Agroforestry Systems* 89(3): 491-51.
- Costa, A., Madeira, M., Santos, J.L., Oliveira, Â. 2011. Change and dynamics in Mediterranean evergreen oak woodlands landscapes of Southwestern Iberian Peninsula. *Landscape and Urban Planning* 102: 164-176.
- De Montis, A., Martín Ramos, B., Pérez, E., Ledda, A., Serra, V. 2017. Landscape fragmentation in Mediterranean Europe: A comparative approach. *Land Use Policy* 64: 83-94.
- Didan, K. 2015. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>. [Consultado en 07-2019]
- Glenn, E.P., Huete, A.R., Nagler, P.L., Nelson, S.G. 2008. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors* 8: 2136-2160.
- Glynn Clements, G.C. 2016. R Series library. Disponible en: <https://grass.osgeo.org/grass76/manuals/r.series.html>.
- GRASS Development Team 2018. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- Hammer, D., Kraft, R., Wheeler, D. 2009. Forma: Forest Monitoring for Action- Rapid Identification of Pan-tropical Deforestation Using Moderate-Resolution Remotely Sensed Data. *Center for Global Development Working Paper* No. 192.
- Hashimoto, H., Wang, W., Cristina, M., White, M., ganguly, sangram, Gamo, M., Hirata, R., Myneni, R., Nemani, R. 2012. Exploring Simple Algorithms for Estimating Gross Primary Production in Forested Areas from Satellite Data. *Remote Sensing* 4: 303-326.
- Houston Durrant, T., de Rigo, D., Caudullo, G. 2016. *Quercus suber* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. En: San-Miguel-Ayán, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*, e01ff11+. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

- 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: 195-213.
- Jucker-Riva, M., Daliakopoulos, I., Eckert, S., Hodel, E., Liniger, H. 2017. Assessment of land degradation in Mediterranean forests and grazing lands using a landscape unit approach and the normalized difference vegetation index. *Applied Geography* 86: 8-21.
- Kim, H.N., Jin, H.Y., Kwak, M.J., Khaine, I., You, H.N., Lee, T.Y., Ahn, T.H., Woo, S.Y. 2017. Why does *Quercus suber* species decline in Mediterranean areas? *Journal of Asia-Pacific Biodiversity* 10: 337-341.
- López Bermúdez, F. 2008. Interacción entre vegetación, erosión y desertificación. En: 2º Seminario WCRP-DIVERSITAS, "Predicciones de cambio climático y vegetación" en Valencia, 27 y 28 de noviembre de 2008, p. 95-121. Disponible en: <http://www.divulgameteo.es/uploads/Vegetación-erosión-desertificación.pdf>
- Maeda, E., Heiskanen, J., Aragão, L., Rinne, J. 2014. Can MODIS EVI monitor ecosystem productivity in the Amazon rainforest? *Geophysical Research Letters* 41: 7176-7183.
- Novillo, C.J., Arrogante-Funes, P., Romero-Calcerrada, R. 2019. Recent NDVI Trends in Mainland Spain: Land-Cover and Phytoclimatic-Type Implications. *International Journal of Geo-Information* 8(1):43.
- Ogaya, R., Barbeta, A., Başnou, C., Penuelas, J. 2015. Satellite data as indicators of tree biomass growth and forest dieback in a Mediterranean holm oak forest. *Annals of Forest Science* 72:135-144.
- Peñuelas, J., Sardans, J., Filella, I., Estiarte, M., Llusà, J., Ogaya, R., et al. 2017. Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services. *Forests* 8(12):463.
- Pérez Latorre, A. V., Galán De Mera, A., Navas, P., Navas, D., Gil, Y., Cabezudo, B. 1999. Datos sobre la flora y vegetación del parque natural de los Alcornocales (Cádiz-Málaga, España). *Acta Botanica Malacitana* 24: 133-184
- Pío, C.A., Silva, P.A., Cerqueira, M.A., Nunes, T.V. 2005. Diurnal and seasonal emissions of volatile organic compounds from cork oak (*Quercus suber*) trees. *Atmospheric Environment* 39(10): 1817-1827.
- Rodríguez Sánchez, F. 2017. Impactos de la herbivoría por ungulados en las comunidades de plantas leñosas del parque natural de los Alcornocales. *Almoraima Revista de Estudios Campogibraltareños* 49: 251-263.
- Shi, H., Li, L., Eamus, D., Huete, A., Cleverly, J., Tian, X., Yu, Q., Wang, S. et al. 2017. Assessing the ability of MODIS EVI to estimate terrestrial ecosystem gross primary production of multiple land cover types. *Ecological indicator* 72: 153-164
- Tiberi, R., Branco, M., Bracalini, M., Croci F., Panzavolta T. 2016. Cork oak pests: a review of insect damage and management. *Annals of Forest Science* 73: 219.
- Topping, D., Connolly, P., McFiggans, G. 2013. Cloud droplet number enhanced by co-condensation of organic vapours. *Nature Geoscience*. 6: 443-446.
- Tucker, C., Pinzón, J. 2017. *Using spectral vegetation indices to measure gross primary productivity as an indicator of land degradation*. GEF-Land Degradation Monitoring Project Report One. Conservation International, Betty and Gordon Moore Center for Science, Arlington, VA, Estados Unidos. Disponible en: http://vitalsigns.org/sites/default/files/VS_GEFLDMP_Report1_C1_R3_WEB_HR.pdf
- Zamora, R., Gómez, A.S., Soriquer, R., Fernández, J.H., Jordano Barbudo, D., Jordano, P. 1996. Herbivoría en espacios protegidos. *Ecosistemas* 8: 70-71.
- Zamora, R., García-Fayos, P., Gómez Aparicio, L. 2008. Las interacciones planta-planta y planta animal en el contexto de la sucesión ecológica. En: Valladares, F. (ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante 2ª ed.*, pp. 373-396. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, España.
- Zhao, M., Running, S., Heinsch, F., Nemani, R. 2011. MODIS-Derived Terrestrial Primary Production. En: Ramachandran, B., Justice, C., Abrams, M. (eds.) *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*, pp. 635-660. Springer, New York, NY, Estados Unidos.
- Zhengxing, W., Chuang, L., Alfredo, H. 2003. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica* 23(5) 979-987